

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

FERNANDO CLAUDIO SPENGLER

**ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE ALETAS EM
ARMAZENADORES DE CALOR DE TUBOS CONCÊNTRICOS EM PROCESSO
DE FUSÃO DE ÁCIDO LÁURICO**

São Leopoldo

2019

FERNANDO CLAUDIO SPENGLER

**ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE ALETAS EM
ARMAZENADORES DE CALOR DE TUBOS CONCÊNTRICOS EM PROCESSO
DE FUSÃO DE ÁCIDO LÁURICO**

Trabalho apresentado como pré-requisito
parcial para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica, pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
UNISINOS

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rejane de Césaroliveski

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Banca Examinadora

Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry

Prof^a. Dr^a. Flavia Schwarz Franceschini Zinani

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

São Leopoldo

2019

S474e

Spengler, Fernando Claudio.

Estudo numérico do efeito da geometria de aletas em armazenadores de calor de tubos concêntricos em processo de fusão de ácido láurico / Fernando Claudio Spengler. – 2019.

89 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

“Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rejane de César Oliveski
Coorientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha.”

1. Estudo numérico. 2. Geometria - Aletas. 3. Fusão. I. Título.

CDU 621

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

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Rejane de Césaroliveski pela orientação, pelo comprometimento com a qualidade da pesquisa desenvolvida e pela difusão do conhecimento. Agradeço a minha família pelo apoio e incentivo para a execução deste trabalho. Agradeço aos meus colegas de pesquisa pelo suporte.

Agradeço a bolsa concedida pela CAPES e Unisinos para a realização do mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Classificação de sistemas de armazenamento de energia térmica.....	13
Figura 1.2 – Comparação do armazenamento de calor sensível de diferentes materiais com o calor latente de um PCM.	14
Figura 1.3 – Processo de mudança de fase com temperatura constante ou com propriedades contínuas.....	15
Figura 1.4 – Análise bibliométrica de publicações em revistas acerca de PCM e sistemas de armazenamento de energia térmica.....	16
Figura 2.1 - Geometrias do problema.....	23
Figura 2.2 - Fração líquida para $t = 1, 10, 20$ e 60 min: (a) presente trabalho; (b) Yuan et al. (2016).	27
Figura 2.3 – Campos de β e vetores de velocidade, com detalhe na região de cisalhamento.	28
Figura 2.4 – Fração mássica por Fourier: experimental de Yuan et al. (2016) e presente trabalho.	28
Figura 2.5 – Comportamento transiente da fração líquida dos casos com aletas verticais (V) e horizontais (H), para 5 valores de RA	29
Figura 2.6 – Campos de β (esquerda) e T (direita), em diferentes instantes, para os casos com aletas verticais e horizontais, com RA : (a) $7/8$, (b) $1/2$ e (c) $1/8$	31
Figura 2.7 – Variação temporal do fluxo de calor dos casos com aletas verticais (V) e horizontais (H), para 5 valores de RA	32
Figura 3.1 - Tubo anular com aletas: (a) verticais e (b) horizontais.....	35
Figura 3.2 – Variação temporal da fração líquida para diferentes casos.....	38
Figura 3.3 - RA vs. t_{max} para diferentes casos.....	38
Figura 4.1 - Tubo anular com aletas: (a) verticais e (b) horizontais.....	43
Figura 4.2 – Fluxograma com aplicação do Design Construtal para o estudo de caso. Adaptado de Razera et al. (2018).	44
Figura 4.3 – Malha computacional empregada para as simulações numéricas com detalhes na extremidade da aleta (A) e na base da aleta e parede do cilindro interno(B).....	49
Figura 4.4 – β vs. Fo : experimental de Yuan et al. (2016) e o presente trabalho.....	50
Figura 4.5 – Campos de β em $t = 1, 10, 20$ e 60 min: (a) presente trabalho e (b) Yuan et al. (2016).	50

Figura 4.6 – Campos de T e linhas de corrente, com detalhes dos vetores de velocidade para $RA = 7/8$ e $\phi = 0.003$: (a) aletas verticais, (b) aletas horizontais e (c, d, e, f, g, h) relacionadas respectivamente aos Detalhes J, K, L, M, N e O.	52
Figura 4.7 – Interface sólido-líquido para diferentes instantes do processo de fusão para $RA = 1/4, 1/2$ e $7/8$ e $\phi =$ (a) 0.003, (b) 0.005, (c) 0.01, (d) 0.02 e (e) 0.03.....	54
Figura 4.8 – Comportamento de β vs. Fo para aletas verticais e horizontais, $\phi = 0.01$ e $RA = 1/8, 1/4, 1/2, 3/4$ e $7/8$	55
Figura 4.9 – Campos de β (esquerda) e T (direita), em $t = 600$ e 2270 s, para aletas verticais e horizontais, com $\phi = 0.03$ e RA igual: (a) $7/8$, (b) $1/2$ e (c) $1/4$	56
Figura 4.10 – Comportamento de Nu por Fo dos casos com aletas verticais e horizontais, para $\phi = 0.01$ e $RA = 1/8, 1/4, 1/2, 3/4$ e $7/8$	58
Figura 4.11 – Comportamento da efetividade da taxa de fusão em relação a um sistema sem aletas, por Fo , para os casos com aletas verticais e horizontais, com $\phi = 0.01$ e $RA = 1/8, 1/4, 1/2, 3/4$ e $7/8$	59
Figura 4.12 – Comportamento de t_m em função de RA para 5 valores de ϕ : (a) aletas horizontais e (b) aletas verticais.	60
Figura 4.13 - Valores de $t_{m, min}$ vs. ϕ para: (a) aletas horizontais e (b) aletas verticais.	61
Figura 5.1 - Tubo anular com aleta ramificada.....	66
Figura 5.2 – Fluxograma com aplicação do Design Construtal para o estudo de caso. Adaptado de Razera et al. (2018).	66
Figura 5.3 – Malha computacional empregada para as simulações numéricas com detalhes na extremidade da aleta (A) e na base da aleta e parede do cilindro interno(B).....	71
Figura 5.4 – β vs. Fo : experimental de Yuan et al. (2016) e o presente trabalho.....	72
Figura 5.5 – Campos de β em $t = 1, 10, 20$ e 60 min: (a) presente trabalho e (b) Yuan et al. (2016).	72
Figura 5.6 – Campos de T e linhas de corrente, com detalhes dos vetores de velocidade para $\phi = 0.03$ com: (a) $\theta = 60^\circ$, (b) $\theta = 90^\circ$, (c) Detalhe M e (d) Detalhe N.....	74
Figura 5.7 – Interface sólido-líquido para $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ e 90° : (a) $\phi = 0.02$ e (b) $\phi = 0.03$	75
Figura 5.8 – Comportamento de β vs. Fo para ϕ : (a) 0.02 e (b) 0.03 com θ variando entre 30° e 90°	76

Figura 5.9 – Comportamento de Nu por Fo para ϕ : (a) 0.02 e (b) 0.03 com θ variando entre 30° e 90°	78
Figura 5.10 – Campos de β (esquerda) e T (direita), em $t = 600$ e 1050 s, para aletas com $\phi = 0.03$ e θ igual: (a) 60° , (b) 75° e (c) 90°	79
Figura 5.11 – Comportamento da efetividade da taxa de fusão em relação a um sistema sem aletas, por Fo , para $\phi = 0.02$ e θ entre 30° e 75°	80
Figura 5.12 – Campos de β (esquerda) e T (direita), em $t = 600$, para casos com $\phi = 0.03$ e: (a) aletas retas verticais, (b) aletas retas horizontais e (c) aleta ramificada com $\theta = 75^\circ$	81
Figura 5.13 – Comportamento da efetividade da taxa de fusão em relação a um sistema com aletas retas verticais e horizontais, por Fo , para $\phi = 0.02$ e θ entre 30° e 75°	82
Figura 5.14 – Variação de t_m em função de θ para $\phi = 0,02$ e $0,03$	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Dimensões da aleta.....	23
Tabela 2.2 - Propriedades termofísicas do ácido láurico.....	26
Tabela 3.1 – Dimensões da aleta.....	36
Tabela 4.1 - Dimensões das aletas.....	45
Tabela 4.2 - Propriedades termofísicas do ácido láurico.....	46
Tabela 5.1 - Dimensões das aletas.....	67
Tabela 5.2 - Propriedades termofísicas do ácido láurico.....	68

LISTA DE SIGLAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
GCI	Grid Convergence Index
LHTES	Latent Heat Thermal Energy Storage
PCM	Phase Change Material
TES	Thermal Energy Storage

LISTA DE SIMBOLOS

Nomenclatura

A	área	$[m^2]$
a	largura da aleta	$[m]$
b	comprimento da aleta	$[m]$
C	constante da zona porosa (Mushy Zone)	$[kg\ m^{-3}\ s^{-1}]$
C_p	calor específico	$[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
D	diâmetro	$[m]$
dt	intervalo de tempo	$[s]$
e	espessura	$[mm]$
Fo	número de Fourier	$[-]$
g	aceleração da gravidade	$[m\ s^{-2}]$
GCI	índice de convergência da malha	$[-]$
h	coeficiente de transferência de calor	$[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
k	condutividade térmica	$[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$
l	comprimento	$[mm]$
L	calor latente	$[J\ kg^{-1}]$
L_c	comprimento característico	$[m]$
m	massa	$[kg]$
Nu	número de Nusselt	$[-]$
p	pressão	$[Pa]$
\dot{Q}	taxa de transferência de calor	$[W]$
q''	fluxo de calor	$[W\ m^{-2}]$
R	raio	$[m]$
RA	razão de aspecto	$[-]$
Ra	número de Rayleigh	$[-]$
S	termo fonte	$[Pa\ m^{-1};\ W\ m^{-3}]$
T	temperatura	$[K]$
t	tempo	$[s]$
V	velocidade	$[m\ s^{-1}]$
\vec{V}	vetor velocidade	$[m\ s^{-1}]$
x	posição na direção x	$[m]$

y posição na direção y [m]

Símbolos Gregos

α	difusividade térmica	[m ² s ⁻¹]
β	fração líquida	[-]
γ	fração volumétrica	[-]
Δ	variação	[-]
ε	constante numérica	[-]
ζ	coeficiente de expansão térmica	[K ⁻¹]
η_f	efetividade da aleta	[-]
λ	entalpia específica	[J kg ⁻¹]
μ	viscosidade dinâmica	[kg m ⁻¹ s ⁻¹]
ν	viscosidade cinemática	[m ² s ⁻¹]
ρ	massa específica	[kg m ⁻³]
ϕ	fração de área da aleta na cavidade	[-]

Subíndices

0	sem aletas
a	aproximado
ex	externo
ext	extrapolado
f	aleta
in	interno
l	líquido
L	latente
m	mudança de fase
min	mínimo
r	aletas retas
s	sólido
se	seção
sen	sensível
w	parede

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Tema	18
1.2 Delimitação do Tema	18
1.3 Problema	18
1.4 Objetivos	18
1.4.1 Objetivo Geral	19
1.4.2 Objetivos Específicos	19
1.5 Justificativa	19
1.6 Estrutura do trabalho	20
2 ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE UMA ALETA EM UM TROCADOR DE CALOR CILÍNDRICO PARA A FUSÃO DE PCM	21
2.1 Introdução	21
2.2 Apresentação do Problema	22
2.2.1 Modelo Matemático	23
2.2.2 Abordagem Numérica	25
2.2.3 Índice de Convergência da Malha	26
2.3 Resultados e Discussões	26
2.3.1 Validação Numérica	26
2.3.2 Estudo de Caso	29
2.4 Conclusões	32
3 APLICAÇÃO DO DESIGN CONSTRUTAL EM ALETAS DE TROCADOR DE CALOR DE SEÇÃO ANULAR COM FUSÃO DE PCM	34
3.1 Introdução	34
3.2 Apresentação do Problema	35
3.2.1 Modelo Matemático	36
3.2.2 Abordagem Numérica e Malha Computacional	37
3.3 Resultados e Discussões	37
3.3.1 Validação Numérica	37
3.3.2 Estudo de caso	37
3.4 Conclusões	39

4 ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE ALETAS EM UM TROCADOR DE CALOR ANULAR EM PROCESSO DE FUSÃO DE ÁCIDO LÁURICO EMPREGANDO O DESIGN CONSTRUTAL.....	40
4.1 Introdução.....	40
4.2 Apresentação do Problema.....	42
4.3 Abordagem Numérica.....	46
4.3.1 Modelo Matemático.....	46
4.3.2 Avaliação de Malha.....	48
4.3.3 Validação Numérica.....	49
4.4 Resultados e Discussões.....	51
4.5 Conclusões.....	61
5 ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE ALETAS COM RAMIFICAÇÕES RADIAIS EM UM TROCADOR DE CALOR ANULAR NO PROCESSO DE FUSÃO.....	63
5.1 Introdução.....	64
5.2 Apresentação do Problema.....	65
5.3 Abordagem Numérica.....	68
5.3.1 Modelo Matemático.....	68
5.3.2 Avaliação de Malha.....	70
5.3.3 Validação Numérica.....	71
5.4 Resultados e Discussões.....	73
5.5 Conclusões.....	83
6 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a sociedade tem enfrentado o desafio de aprimorar a qualidade de vida e reduzir os impactos ambientais, buscando formas econômicas e eficientes para tal. Cada dia aumenta mais a preocupação com o desenvolvimento e implementação de novas soluções energéticas limpas, a fim de enfrentar os desafios globais de energia segura, mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. (BEEREPOOT et al., 2012). Como o consumo de energia é um fator essencial para o desenvolvimento da sociedade, uma transição para formas mais avançadas, inovadoras e eficientes de sistemas de conversão de energia se tornam imperativas. (PINA; LOZANO; SERRA, 2018).

Tal como mencionado por Kalapala e Devanuri (2018), o atual desafio é encontrar formas sustentáveis de armazenar a energia, que possam ser requeridas facilmente. Armazenar energia na forma de calor é uma solução que vem sendo amplamente empregada. Schreiber; Lanzerath e Bardow (2018) comentam o benefício desta forma de armazenamento que provém equilíbrio entre a oferta e demanda de energia, pois armazena a energia sobressalente para uso posterior, evitando conseqüentemente picos de consumo. Conforme apresentado na Fig.1.1, Jaguemont et al. (2018) apresentam sistemas de armazenamento térmico (TES – Thermal Energy Storage) amplamente classificados em três grupos: armazenamento por reações químicas, armazenamento de calor sensível e armazenamento de calor latente.

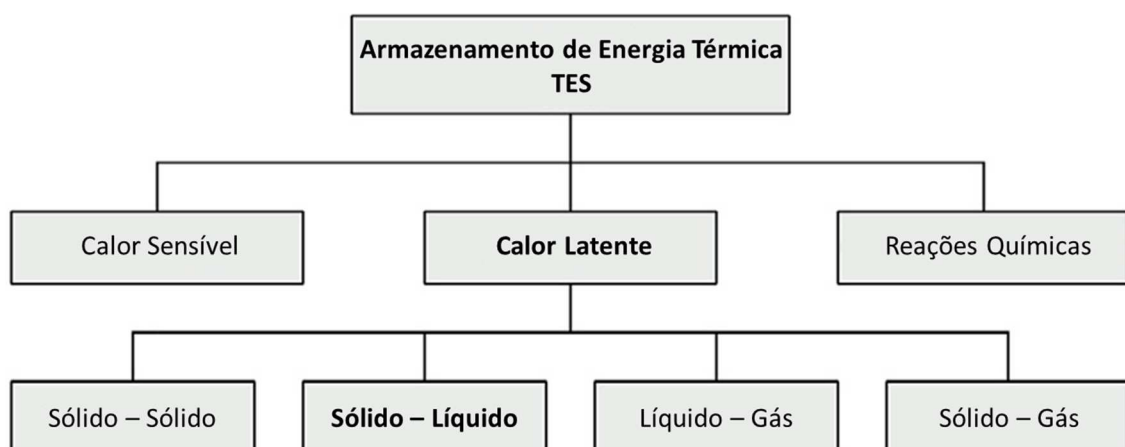


Figura 1.1 – Classificação de sistemas de armazenamento de energia térmica

Fonte: adaptado de Jaguemont et al. (2018)

Devido a suas vantagens em relação aos demais, sistemas de armazenamento de calor latente (LHTES – Latent Heat Thermal Energy Storage) possuem vasta aplicação. O carregamento e descarregamento energético de LHTES ocorre pela mudança de estado físico de um material definido de acordo com as necessidades e aplicação do sistema. Esta mudança pode ser de sólido para sólido, se tratando da mudança da estrutura cristalina do material, de líquido para gás em processos de ebulição, de sólido para gás em processos de sublimação e de sólido para líquido em processos de fusão. A energia empregada para a transição de um estado físico para outro é tecnicamente chamada por energia latente. Estes sistemas de armazenamento de calor empregam algum material como elemento de mudança de fase, o qual é denominado pela sigla PCM (Phase Change Material). (JAGUEMONT et al., 2018).

Conforme apresentado por Alva; Lin e Fang (2018), a grande densidade energética de sistemas empregando calor latente possibilita a criação de sistemas mais compactos de armazenamento de energia. A Figura 1.2 compara as capacidades de armazenamento de calor sensível de diferentes materiais, com uma variação de temperatura de 15°C, em relação a capacidade de armazenamento de calor latente de um PCM.

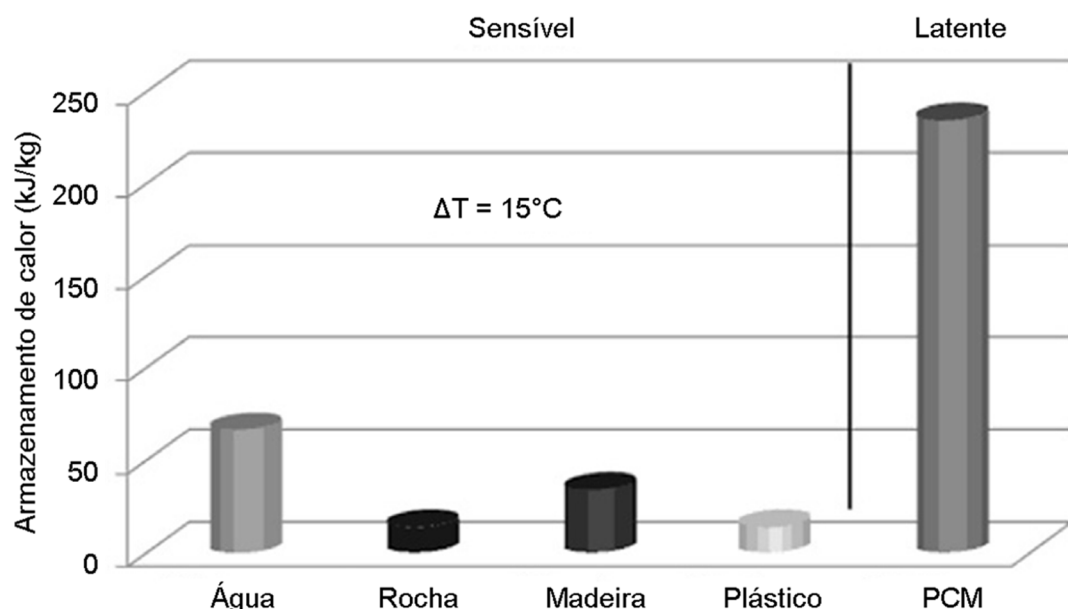


Figura 1.2 – Comparação do armazenamento de calor sensível de diferentes materiais com o calor latente de um PCM.

Fonte: Jaguemont et al. (2018).

Conforme estudado por Egolf e Manz (1994) o processo de mudança de fase pode ocorrer de forma isotérmica ou com propriedades contínuas. A Figura 1.3 apresenta a variação da entalpia (λ) durante o processo de fusão, sendo a linha contínua relativa a um processo de com propriedades contínuas e a linha tracejada relativa a um processo com temperatura constante. O processo de mudança de fase com propriedades contínuas ocorre dentro de uma faixa de temperaturas de estado sólido (T_s) e líquido (T_l). Entre esta faixa de temperaturas ocorre uma zona porosa, definida por *mushy zone*, a qual faz interface entre a região líquida e a região sólida.

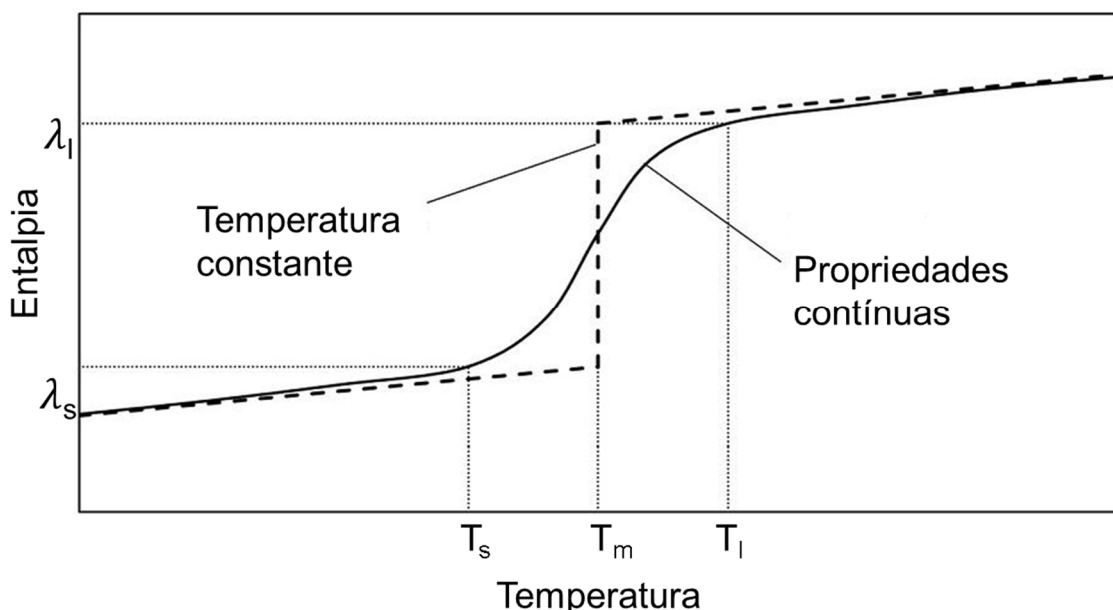


Figura 1.3 – Processo de mudança de fase com temperatura constante ou com propriedades contínuas.

Fonte: Adaptado de Egolf e Manz (1994)

Dado o potencial de sistemas de armazenamento de calor latente, pesquisas acerca do tema estão com grande visibilidade. Nazir et al. (2019) indicam um crescimento expressivo no número de publicações relacionadas à PCM e LHTES. Conforme apresentado pela Figura 1.4 as publicações tiveram um aumento de 15 vezes nos últimos 20 anos. Neste mesmo período a quantidade anual de patentes relacionadas à PCM e LHTES aumentou mais de 5 vezes.

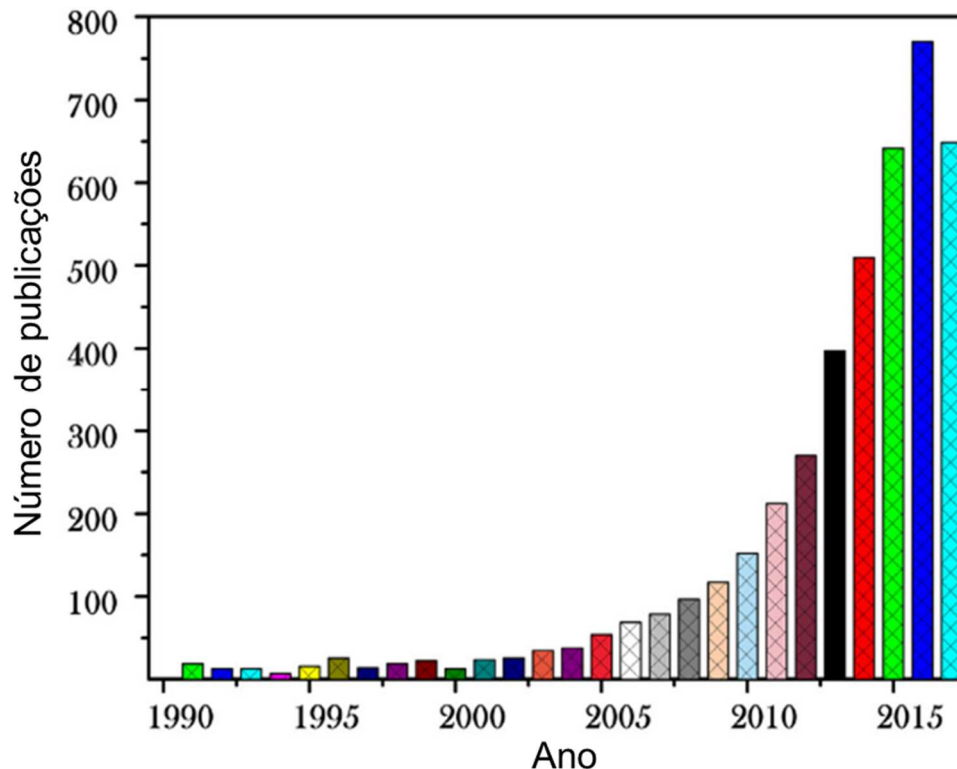


Figura 1.4 – Análise bibliométrica de publicações em revistas acerca de PCM e sistemas de armazenamento de energia térmica

Fonte: Nazir et al. (2019).

Atualmente sistemas com PCM são largamente empregados em soluções de aquecimento e arrefecimento de diversas áreas. Kalapala e Devanuri (2018) citam diversas aplicações, tais como: construção civil, conforto térmico de veículos, soluções de transporte de produtos médicos, farmacêuticos e químicos, no resfriamento de eletrônicos, em sistemas solares de aquecimento de água, e na indústria têxtil.

A performance de LHTES é associada a diversos fatores. Fornarelli et al. (2018) apresenta abordagens de pesquisa relacionadas aos processos convectivos, à constituição do PCM para adequação da temperatura de mudança de fase requerida e às configurações geométricas. Estas devem ser projetados visando rápida carga e descarga, provendo área para troca térmica mais efetiva possível.

Conforme apontado por Agyenim et al. (2010), estão em voga estudos de materiais de mudança de fase na faixa de temperaturas entre 0 e 60°C, adequada para finalidades de conforto térmico. Tal faixa de temperatura é compatível com a

mudança de fase (sólida-líquida) de PCM orgânicos. Materiais orgânicos são quimicamente estáveis, não tóxicos, não corrosivos e com vasta disponibilidade na natureza. Contudo, a maioria dos PCM possuem baixa condutividade térmica. O que acaba requerendo técnicas para o aumento da transferência de calor, com a finalidade de otimizar as taxas de carga e descarga de energia. Na literatura encontra-se uma vasta gama de trabalhos associados às técnicas de maximização da transferência de calor de PCM. Aplicação de diferentes configurações geométricas do receptáculo, agitação por bolhas, micro encapsulamento, inserção de matriz metálica, dispersão de partículas de alta condutividade, adição de nanopartículas e misturas de diferentes PCM, são exemplos de técnicas empregadas para o aprimoramento da eficiência de sistemas empregando PCM. Devido à facilidade de aplicação e ao baixo custo de fabricação, a maior parte dos processos de aprimoramento de troca térmica emprega aletas. Diversos são os parâmetros e formas de disposição associados a geometria das aletas, visando aprimorar a troca térmica do LHTES.

Já foram realizados diversos estudos acerca do efeito da geometria de LHTES. Darzi, Farhadi e Sedighi (2012) e Pahamli et al. (2016, 2018), investigaram o efeito da excentricidade dos tubos em conjuntos anulares. Al-Abidi et al. (2013), Mat et al. (2013) e Rathod e Banerjee (2015), constataram aprimoramento na eficiência de LHTES, empregando múltiplas aletas longitudinais. Novas geometrias de aleta foram propostas por Abdulateef et al. (2017) e Sciacovelli, Gagliardi e Verda (2015). Sendo que variações na geometria do próprio tubo foram testadas por Darzi, Jourabian e Farhadi (2016). A variação do ângulo das aletas foi abordada por Wang et al., (2016) e Yuan et al. (2016). O emprego combinado de nanopartículas e aletas foi apresentado por Mahdi e Nsofor (2017, 2018). A influência do comprimento das aletas foi abordado por Ji et al. (2018). Propostas de otimização e configurações inovadoras de aletas longitudinais foram apresentadas por Deng et al. (2019) e Mahdi et al. (2018, 2019).

De forma geral os estudos buscam soluções geométricas que aprimorem o processo de fusão, principalmente nas fases finais do processo. Para uma análise do efeito das diversas configurações da aleta na cavidade pode se empregar o Design Construtal, uma ferramenta que auxilia a concepção de geometrias que vem ganhando atenção nos últimos anos, conforme exposto por Feng, Chen e Xia (2019).

Conforme apresentado por Ziaei, Lorente e Bejan (2016) o método do Design Construtal permite que a geometria estudada se modifique livremente, de acordo com

os graus de liberdade, como o objetivo de melhorar a performance de um indicador de desempenho escolhido.

Lorente, Bejan e Niu (2015) empregaram o Design Construtal no estudo de tanques cilíndricos para o armazenamento de calor latente (LHTES) e relataram o potencial do emprego combinado de simulações numéricas com análise geométrica, para o avanço do projeto de sistemas de armazenamento de energia térmica.

O presente trabalho emprega o Design Construtal para a análise numérica do efeito do posicionamento e da geometria de aletas envolvidas por PCM, sobre o processo de fusão, no interior de cavidades anulares.

1.1 Tema

No presente trabalho é explorado o processo de fusão de um PCM em uma cavidade anular com diferentes disposições e geometrias de aleta.

1.2 Delimitação do Tema

É estudado o processo de fusão do PCM ácido láurico no interior de uma cavidade cilíndrica anular aletada, bem como o efeito da variação de posicionamento e dimensões da aleta. O estudo é realizado através CFD e Teoria Construtal.

Não é analisada o efeito dos processos de troca de calor que extrapolam a camada limite. Assim como não são abordados aspectos de compatibilidade química do PCM com o material do invólucro, processos construtivos do armazenador de calor e custos associados.

1.3 Problema

Os materiais de mudança de fase empregados em sistemas de armazenamento de calor latente possuem baixa condutividade térmica, o que torna os ciclos de carga e descarga longos, limitando algumas aplicações práticas.

1.4 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos, apresentados a seguir.

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral determinar o efeito da geometria de aletas sobre o tempo de fusão e taxa de transferência de calor, em cavidades cilíndricas anulares, preenchidas com ácido láurico, empregando simulação numérica por CFD e Design Construtal.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) validar um modelo de CFD do processo de fusão do PCM em geometria cilíndrica anular bidimensional;
- b) identificar padrões comportamentais da fração líquida pelo tempo, para diferentes propostas de aletas;
- c) identificar padrões comportamentais da taxa de transferência de calor pelo tempo, para diferentes propostas de aletas;
- d) determinar o efeito da geometria das aletas na transferência de calor e no tempo de fusão.

1.5 Justificativa

Sistemas de armazenamento de energia térmica latente em cavidades cilíndricas aletadas já se provaram eficazes e atendem necessidades práticas. Contudo, o estudo de mecanismos para o aprimoramento do processo de troca térmica de PCM se faz necessário. Embora a literatura apresente diferentes propostas de aprimoramento, o emprego do Design Construtal para a análise das variações geométricas de aletas em trocadores de calor em processo de fusão ainda não foi explorado na literatura.

1.6 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é dividido em 6 Capítulos, sendo este primeiro relativo as motivações e objetivos. Os próximos 4 Capítulos são apresentados na forma de artigos.

O Capítulo 2 é apresentado na forma de um artigo completo. Este foi apresentado na 8ª Conferência Sul em Modelagem Computacional e publicado no Volume 18 da Revista de Engenharia Térmica (RETERM). O texto introduz a linha de pesquisa dessa dissertação. São apresentados tópicos relativos ao modelo matemático, abordagem numérica e verificação da malha computacional, sendo então apresentados os resultados e discussões acerca da validação do modelo numérico e do estudo de caso. As conclusões fazem o fechamento do Capítulo.

O Capítulo 3 é baseado no resumo estendido apresentado na 11ª Conferência Internacional da Lei Construtal e Segunda Lei. Este trabalho introduz a aplicação do método do Design Construtal para o dimensionamento de aletas em armazenadores de calor de seção anular. Os resultados e conclusões indicam o efeito do posicionamento, tamanho e percentual de ocupação das aletas na cavidade.

O Capítulo 4 apresenta a análise do efeito das geometrias de aletas, aprofundando a aplicação do método do Design Construtal e apresentando casos relacionados a cinco taxas de ocupação da aleta na seção anular. Os resultados são apresentados na forma de campos de fração líquida e temperatura, vetores de velocidade, assim como o comportamento da fração líquida e fluxo de calor pelo tempo. Também são apresentados valores de efetividade dos sistemas com aletas. O fechamento do capítulo aborda as conclusões relativas a sistemas com aletas retas.

O Capítulo 5 aborda uma nova solução geométrica, desenvolvida com base nos resultados e conclusões dos capítulos que antecedem e analisada com o auxílio do Design Construtal. Os resultados são apresentados na forma de campos de fração líquida e temperatura, linhas de fluxo e vetores de velocidade comparados entre si e com resultados das soluções geométricas abordadas no Capítulo 4. Também são apresentados os comportamentos da fração líquida e do fluxo de calor pelo tempo na forma adimensional e valores de efetividade dos sistemas com aletas. O fechamento do capítulo aborda as conclusões relativas a sistemas com aletas ramificadas radialmente.

O Capítulo 6 relaciona os principais resultados e conclusões do trabalho.

2 ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE UMA ALETA EM UM TROCADOR DE CALOR CILÍNDRICO PARA A FUSÃO DE PCM

Resumo. *O armazenamento de energia térmica é um meio eficaz de adequar a disponibilidade energética com o horário de demanda. A energia térmica pode ser armazenada na forma de calor sensível ou latente, sendo que sistemas de armazenamento de calor latente utilizam um material denominado Phase Change Materials (PCM), o qual é provido como compostos orgânicos, sais hidratados, parafinas, entre outros. Os sistemas de armazenamento de calor latente oferecem uma série de vantagens, como processo de carga e descarga praticamente isotérmicos e alta densidade energética. Contudo, a baixa condutividade térmica, torna longos os ciclos destes sistemas, restringindo sua aplicabilidade. Através da fluidodinâmica computacional foi estudado o comportamento do processo de fusão do PCM, em cavidades cilíndricas com aletas horizontais e verticais, visando a otimização da geometria da aleta. Desta forma a área da aleta foi mantida constante, variando sua razão de aspecto. O modelo numérico validado com base na literatura é composto pelas equações da quantidade de movimento, conservação de massa e energia, acrescidas do modelo de mudança de fase. São apresentados resultados qualitativos e quantitativos, referentes à convergência da malha, campos de velocidade, fração líquida e temperatura em diferentes momentos do processo. Os resultados do estudo apontam que a posição da aleta no trocador de calor influencia no processo de fusão, evidenciando que apesar das aletas verticais possuírem um processo de fusão total mais rápido, os trocadores de calor com aletas horizontais podem atingir frações líquidas parciais maiores em menor tempo, assim como o aumento do comprimento da aleta propicia a redução do tempo de fusão, evidenciando a razão de aspecto ótima.*

Palavras-chave: *PCM. CFD. Influência geométrica.*

2.1 Introdução

Com a crise energética da década de 70, vieram estudos acerca de formas de armazenamento de energia. Conforme mencionado por Agyenim et al. (2010), a partir deste período entraram em evidência os materiais de mudança de fase, definidos

pela Sigla PCM (phase change material) e pesquisas sobre seu comportamento e formas de aplicação. Os estudos permanecem em voga, sendo abordados de forma experimental e numérica.

O efeito de parâmetros térmicos e geométricos de sistemas com PCM, tem sido o foco de estudos, tais como o acréscimo da transferência de calor em aletas, sendo exposto por Agyenim, Eames e Smyth (2009) que aletas longitudinais possuem desempenho superior às circulares, tanto em processos de carga quanto descarga. Ao passo que Wang et al. (2016) demonstrou o efeito da disposição de aletas em uma cavidade circular, revelando desempenho superior para angulações entre 60° e 90°. O efeito de diferentes inclinações também foi abordado por Kamkari e Shokouhmand (2014), sendo variada a inclinação de uma cavidade retangular preenchida com o PCM ácido láurico, foi registrada uma influência significativa no tempo de fusão e taxa de transferência de calor.

Simulações numéricas por CFD provém resultados concisos em relação a sistemas de armazenamento de energia térmica, tal como apresentado por Almsater et al. (2017) o qual relatou que a duração do processo de mudança de fase de fusão é geralmente mais rápida em comparação com o processo de solidificação devido ao efeito da convecção natural.

Sistemas de armazenamentos com aletas, que podem ser intercambiáveis entre verticais e horizontais possibilitam aplicações de interesse industrial. O objetivo deste trabalho é analisar numericamente o efeito da geometria e do posicionamento de aletas internas a cavidades circulares, quando submetidas ao processo de fusão de PCM.

2.2 Apresentação do Problema

O problema a ser estudado consiste em um trocador de calor constituído por um tubo de seção anular, cujos raios interno e externo são, respectivamente, $R_{in} = 20$ mm e $R_{ex} = 40$ mm. As aletas possuem área (A_f), obtida pelo produto do seu comprimento (l) pela sua espessura (e). O trocador é preenchido pelo PCM ácido láurico, inicialmente no estado sólido. Para esta geometria foram abordadas duas propostas de aletas: alinhadas horizontal e verticalmente, de acordo com a Fig. 2.1.

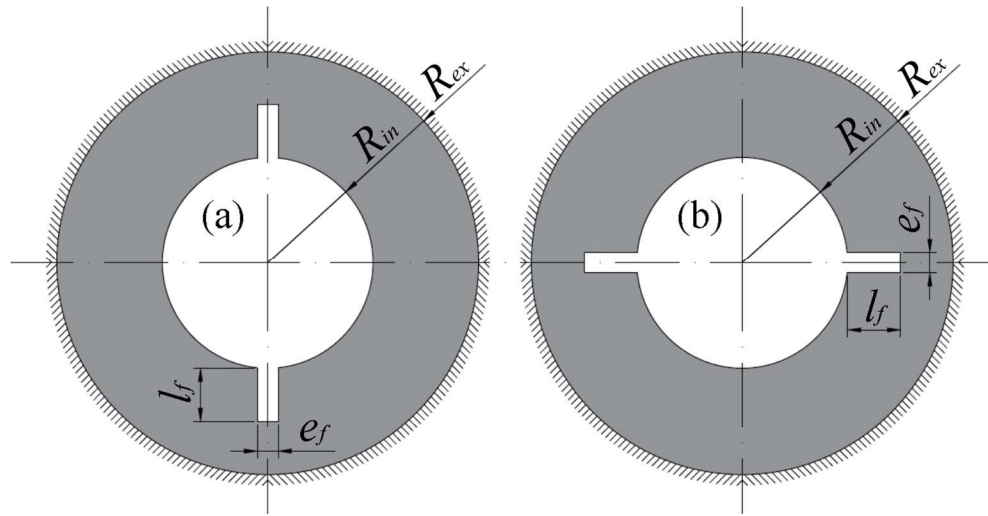


Figura 2.1 - Geometrias do problema.

A área das aletas (A_f) foi mantida constante e igual a 10 mm^2 . Optou-se por estudar 5 aletas verticais e 5 horizontais. O comprimento ($l_f = \Delta R \times RA$) destas foi obtido considerando as seguintes razões de aspecto (RA), também pré-determinadas: $1/8$, $1/4$, $1/2$, $3/4$ e $7/8$, sendo $\Delta R = R_{ex} - R_{in}$. Assim, a espessura da aleta (e_f) foi obtida como: $e_f = A_f / l_f$. As dimensões analisadas estão relacionadas na Tab. 2.1

Tabela 2.1 - Dimensões da aleta.

	l_f [mm]	2,50	5,00	10,00	15,00	17,50
$\phi = 0,01$	e_f [mm]	15,08	7,54	3,77	2,51	2,15

2.2.1 Modelo Matemático

O modelo matemático é composto pelas equações da conservação da massa (2.1), quantidade de movimento (2.2), acrescidas do modelo de mudança de fase, que é apresentado na sequência.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\vec{\nabla} p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + S \quad (2.2)$$

onde ρ é a massa específica, t o tempo, \vec{V} o vetor velocidade, p é a pressão, \vec{g} aceleração da gravidade e S o termo fonte (Eq. (2.3)):

$$S = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} C \vec{V} \quad (2.3)$$

onde γ é a fração líquida durante a mudança de fase, ε é uma constante de valor 0,001 para evitar divisão por zero e C é a constante da zona porosa, que dependente da morfologia da zona porosa. (VOLLER; PRAKASH, 1987). A fração líquida durante a mudança de fase é obtida através da Eq. (2.4)

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (2.4)$$

onde T_s é a temperatura do sólido e T_l a temperatura do líquido. A conservação de energia está representada pela Eq. (2.5),

$$\frac{\partial(\rho \lambda)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \lambda) = \nabla(k \nabla T), \quad (2.5)$$

onde λ é a entalpia total, obtida pela soma da entalpia sensível (λ_{sen}) e a variação da entalpia na mudança de fase (λ_L). A entalpia sensível é obtida através da Eq. (2.6), (SHMUELI; ZISKIND; LETAN, 2010).

$$\lambda_{sen} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (2.6)$$

onde λ_{ref} é a entalpia na temperatura de referência (T_{ref}). A variação da entalpia na mudança de fase é em função da temperatura, que está associada à fração líquida na zona porosa, obtida através da Eq. (2.7) ou então pela Eq. (2.8)

$$\lambda_L = \gamma L \quad (2.7)$$

$$\lambda_L = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ L & \text{se } T > T_l \\ \gamma L & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (2.8)$$

em que L é o calor latente.

2.2.2 Abordagem Numérica

O domínio computacional foi considerado bidimensional e possui três contornos de controle, as quais são: aleta, superfície cilíndrica interna e superfície cilíndrica externa, além do plano de simetria. Ao passo que a superfície externa é adiabática, a da aleta e superfície interna tem temperatura constante de 80°C, sendo que a temperatura inicial do PCM é de 20°C. Todas as superfícies foram consideradas impermeáveis e sem deslizamento.

O estudo foi executado por fluidodinâmica computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics). Sendo empregado o método dos volumes finitos com o software Workbench 18.2 e seus módulos DesignModeler, Meshing, Fluent e CFD-Post, da empresa ANSYS.

Quanto às condições de controle de simulação, para o acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o método *SIMPLE*, o gradiente e a pressão foram definidos como *Last Squares Cell Based* e *Presto* respectivamente, ao passo que o momento e a energia foram estabelecidos como *Second Order Upwind*. Os fatores de relaxamento utilizados para a pressão, massa específica, forças de campo, quantidade de movimento, fração de líquido e energia foram, respectivamente: 0,3; 1; 0,5; 0,5; 0,6 e 1. O passo de tempo utilizado foi de 0,01 s, com limitação de mil interações por passo de tempo. Em relação aos critérios de convergência, para continuidade e velocidade foi adotado 10^{-6} , já para a energia adotou-se o valor de 10^{-8} .

As propriedades do PCM ácido láurico são apresentadas na Tab. 2.2, onde constam os valores de temperatura de fusão (T_m), calor específico (c_p), condutividade térmica (k), coeficiente de expansão térmica (ζ), calor latente (L), massa específica (ρ), e viscosidade dinâmica (μ).

Tabela 2.2 - Propriedades termofísicas do ácido láurico.

T_m	c_p	k	ζ	L	ρ	μ		
						60 °C	70 °C	80 °C
44.22	2300	0.147	0.000615	173800	862.9	0.005336	0.004269	0.003469

Fonte: Yuan et al. (2016)

2.2.3 Índice de Convergência da Malha

Foram criadas três malhas computacionais ($M1$, $M2$, $M3$) com 28457, 14520 e 10118 elementos respectivamente. A análise da convergência da malha foi realizada pelo método GCI, o qual surtiu um valor máximo de 1,2241%, ao passo que o valor médio foi de 0,0026%.

2.3 Resultados e Discussões

Os resultados aqui apresentados estão divididos nas seguintes situações: Validação Numérica e Estudo de Caso. Primeiramente são apresentados os resultados da validação numérica, comparando-os com aqueles obtidos por Yuan et al. (2016), na forma de campos de fração líquida. Posteriormente são apresentados resultados do comportamento do processo de fusão do PCM de acordo com a variação da razão de aspecto da aleta. Estes resultados são apresentados na forma de campos de temperatura e fração líquida, assim como em termos do comportamento de β em função do tempo.

2.3.1 Validação Numérica

Para validação numérica utilizou-se os resultados experimentais de Yuan et al. (2016), o qual também consiste em um trocador de calor anular aletado internamente e preenchido com o PCM ácido láurico.

Nas Figs. 2.2(a, b) são apresentados campos de fração de líquido (β) para $t = 1, 10, 20$ e 60 min, obtidos pelo presente trabalho e por Yuan et al. (2016),

respectivamente. Nestas figuras, a região azul representa a fase sólida, enquanto a vermelha representa a fase líquida do PCM. Verifica-se grande semelhança entre resultados, tanto nos instantes iniciais, onde há predomínio do processo de condução de calor, por apresentar maior quantidade de sólido, quanto nos instantes onde há predomínio do processo de convecção natural, onde a fase líquida está mais presente

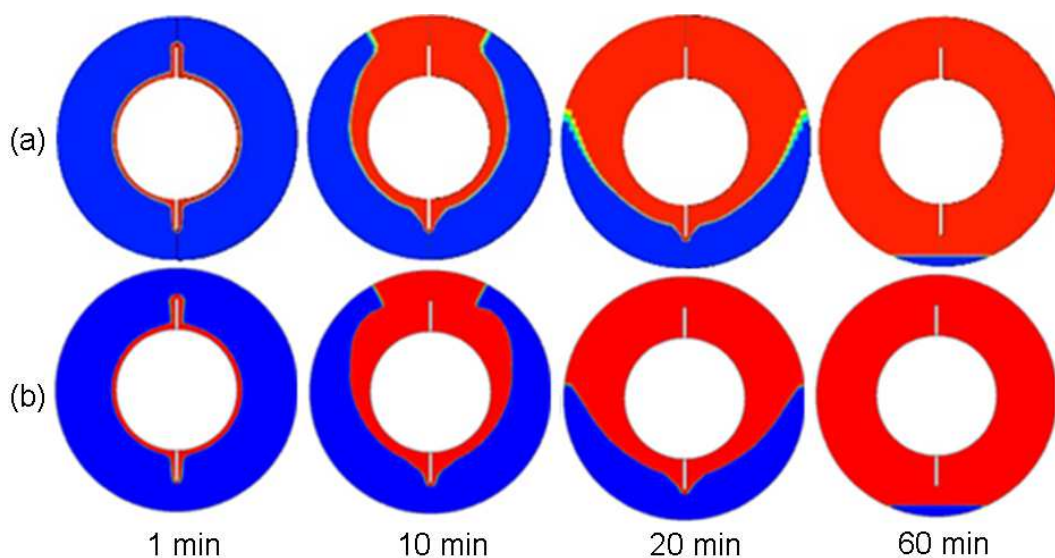


Figura 2.2 - Fração líquida para $t = 1, 10, 20$ e 60 min: (a) presente trabalho; (b) Yuan et al. (2016).

O processo convectivo, mencionado anteriormente, pode ser observado na Fig. 2.3, onde constam os campos de fração líquida, na seção esquerda do trocador e os vetores de velocidade em sua direita. No detalhe do campo de velocidade, pode-se observar duas correntes convectivas: uma ascendente e outra descendente. Como o raio interno do trocador está aquecido em relação ao PCM, isto provoca redução da massa específica do PCM naquela região e conseqüente empuxo, o que ocasiona a corrente convectiva ascendente. Pela conservação da massa, uma corrente convectiva descendente também está presente.

Ainda em relação ao detalhe da Fig. 2.3, observa-se também uma região de cisalhamento bem definida entre as duas correntes convectivas. Além disso, observa-se que os perfis de velocidade estão muito bem definidos, tanto aqueles do

escoamento ascendente quanto descendente, o que indica um bom refinamento de malha.

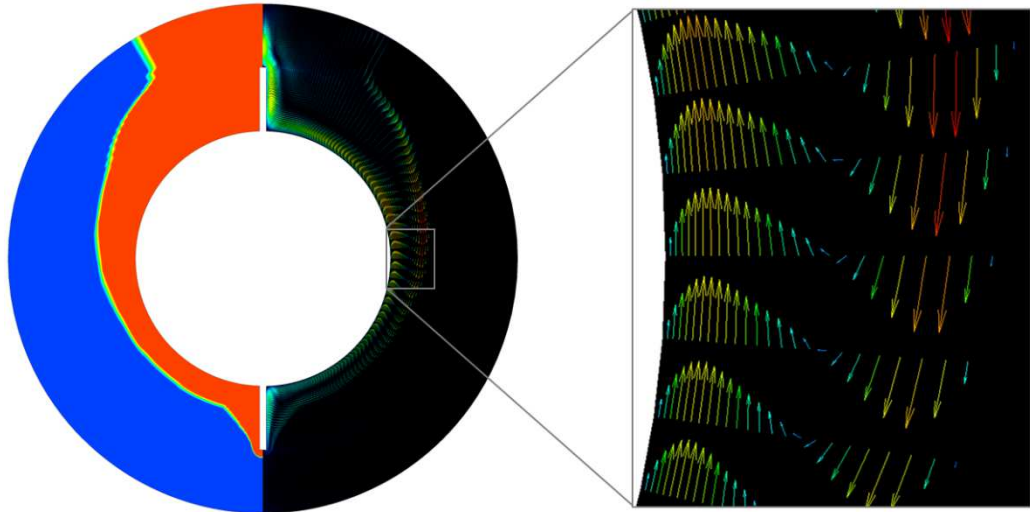


Figura 2.3 – Campos de β e vetores de velocidade, com detalhe na região de cisalhamento.

Em termo quantitativos, a validação numérica foi realizada através do comportamento da fração líquida em função no número de Fourier. Os resultados obtidos pelo presente trabalho e aqueles obtidos por Yuan et al. (2016) podem ser observados na Fig. 2.4.

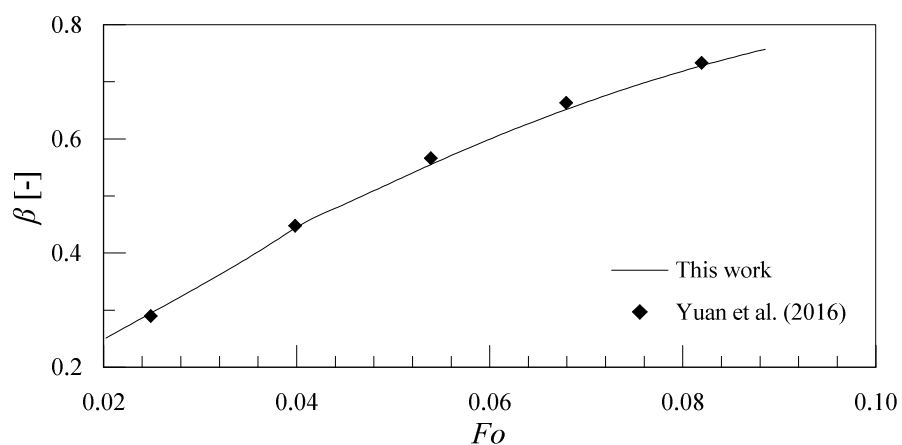


Figura 2.4 – Fração mássica por Fourier: experimental de Yuan et al. (2016) e presente trabalho.

Ainda em relação a Fig. 2.4, observa-se uma boa concordância entre resultados. Neste caso, a diferença percentual média foi de, aproximadamente, 2%, sendo que, ao final do processo, este valor reduz para 0,1%. Diante dos bons resultados apresentados nas Fig. 2.2, 2.3 e 2.4, considera-se o modelo validado e apto para Estudo de Caso.

2.3.2 Estudo de Caso

A Fig. 2.5 apresenta a fração de líquido em função do tempo para 5 aletas verticais ($RA = 7/8, 3/4, 1/2, 1/4$ e $1/8$) e o mesmo número e dimensões de aletas horizontais. Inicialmente pode-se observar que, para todos os casos, até, aproximadamente, 100 s, os valores de β são praticamente iguais. Em seguida os comportamentos ficam discriminados, notando-se a prevalência de fusão para as aletas horizontais, sendo o processo de fusão mais célere na aleta com razão de aspecto 7/8.

A partir de $t = 1000$ s ocorre uma transição na declividade dos casos relativos às aletas horizontais, sendo o processo de fusão mais lento a partir deste instante. Nos segundos que seguem, verifica-se a fusão completa dos casos com aletas verticais sendo, iniciando pelo caso com maior razão de aspecto ($RA 7/8$) e seguindo de forma ordenada até a fusão do caso com menor razão de aspecto ($RA 1/8$). Após todos os casos com aletas verticais terem atingido $\beta = 1$, que os casos com aletas horizontais completam a fusão, também de forma ordenada, iniciando pelo caso com maior RA , até o caso com menor RA .

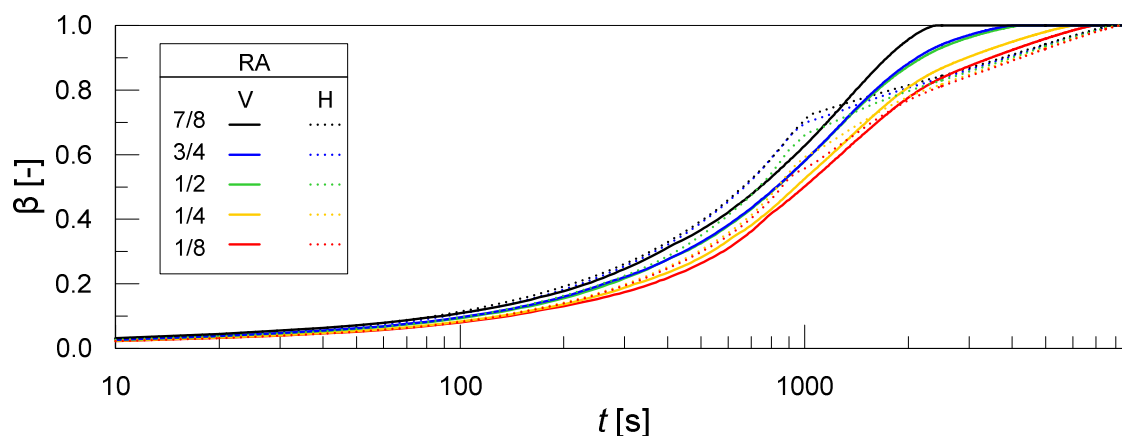


Figura 2.5 – Comportamento transiente da fração líquida dos casos com aletas verticais (V) e horizontais (H), para 5 valores de RA .

Os processos descritos até este ponto podem ser contrapostos com campos de fração líquida e de temperatura, os quais são apresentados nas Figs. 2.6(a, b, c), para RA de $7/8$, $1/2$ e $1/8$, respectivamente, para aletas verticais e horizontais, nos tempos de 600 e 2400 s. No que se refere aos instantes dos campos apresentados, o parâmetro utilizado foi o tempo de fusão total do caso mais rápido, 2400 s, relativo ao caso com aleta vertical com $RA = 7/8$ e um instante inicial (600 s) que permite a visualização dos processos de troca de calor envolvidos no princípio do processo de fusão. No centro das cavidades é indicado o valor de β .

Contrapondo as colunas relativas ao instante 600 s com aletas verticais e horizontais da Fig. 2.6, confirma-se o que já tinha sido evidenciado na Fig. 2.5, sendo a região fundida nos casos com aleta horizontal superior à observada nos casos com aleta vertical. Tal comportamento pode ser explanado observando os campos de temperatura nos mesmos instantes, ao passo que os casos com aletas verticais apresentam regiões relativamente estratificadas, indicando apenas escoamento ascendente na região próxima a parede aquecida e aleta, os casos relativos às aletas horizontais indica campos de temperatura difusos. Tal comportamento é congruente com o padrão convectivo de Rayleigh-Bénard, esperado sobre uma superfície plana aquecida. Dado o maior dinamismo dos casos com aleta horizontal, nos instantes iniciais, o processo de fusão é mais rápido do que os casos com aletas verticais.

Ainda em relação a Fig. 2.6, para $t = 2400$ s, observa-se uma mudança no comportamento em relação aos resultados em $t = 600$ s, sendo a fusão mais rápida nos casos com aletas verticais. Visto que a região sólida está restrita a seção inferior da cavidade cilíndrica, e os perfis de temperatura em todos os casos está estratificado, constatando-se comportamento pouco difuso. Contudo os casos com aletas verticais têm a particularidade de maior proximidade com a região sólida após este período, diferentemente dos casos com aletas horizontais, cuja região aquecida mais próxima é a própria parede do cilindro. Tal fato faz com que o processo de fusão das aletas horizontais se delongue em demasia em relação aos casos com aletas verticais.

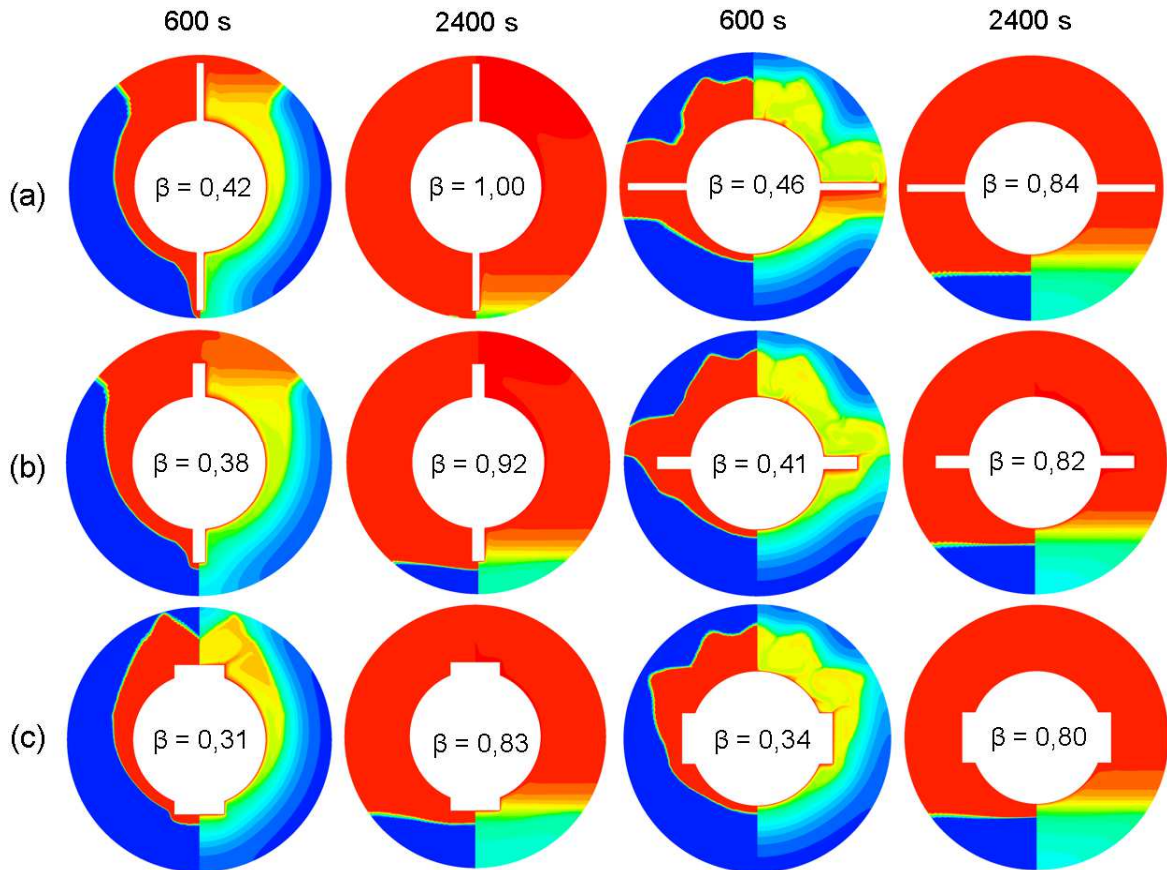


Figura 2.6 – Campos de β (esquerda) e T (direita), em diferentes instantes, para os casos com aletas verticais e horizontais, com RA : (a) $7/8$, (b) $1/2$ e (c) $1/8$.

Na Fig. 2.7 pode-se observar a variação temporal do fluxo de calor para todos os casos analisados. Observa-se que todos iniciam com um valor máximo de q superior à 15000 W m^{-2} , e que decrescem gradativamente até 100 s, aproximadamente. A partir deste instante o comportamento apresenta pequenas flutuações até, aproximadamente, 1000 s. Neste período, os casos que mais oscilação são os referentes a aletas horizontais, representadas pelas linhas tracejadas. Tal comportamento pode ser correlacionado com os fenômenos já descritos anteriormente, dado o maior dinamismo do processo, decorrente do padrão convectivo de Rayleigh-Bénard. A partir de 1000 s, aproximadamente, nota-se uma queda acentuada no valor de q para os casos com aleta horizontal, sendo que tal se deve ao fim dos processos difusivos ativos até então, ficando a transferência de calor restrita a um processo praticamente condutivo no líquido fundido e estacionário. Já para os casos com aletas verticais o valor de q cai gradativamente, até valor nulo, à medida que a fusão se aproxima do fim.

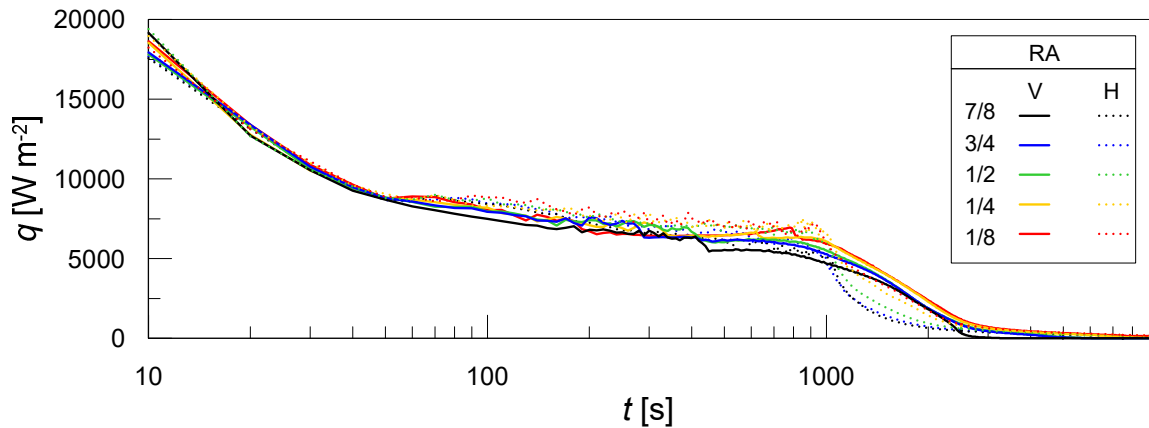


Figura 2.7 – Variação temporal do fluxo de calor dos casos com aletas verticais (V) e horizontais (H), para 5 valores de RA.

2.4 Conclusões

O objetivo deste trabalho era a verificação do efeito da geometria de uma aleta, em um trocador de calor latente preenchido com PCM, empregando simulação numérica computacional. Para isso utilizou-se o software comercial ANSYS Fluent. O modelo matemático é composto pelas equações da quantidade de movimento, conservação de massa e energia, acrescidas do modelo de mudança de fase. O domínio computacional é bidimensional e formado por uma malha quadrilátera refinada nas regiões com maior variação térmica e fluidodinâmica.

Foi realizada validação do modelo numérico empregado através da comparação de campos de velocidade e comportamento da vazão mássica com resultados da literatura, tendo-se obtido bons resultados, viabilizando, então, o seguimento da pesquisa.

Os resultados do estudo de casos para cavidades cilíndricas de seção anulares, com aletas dispostas verticalmente ou horizontalmente, preenchidas com o PCM ácido láurico, indicaram que:

- apesar dos casos com aletas horizontais possuírem um processo de fusão mais intenso no princípio, os trocadores de calor com aletas verticais possuem um processo de fusão total mais rápido;

- o tempo de fusão parcial e total é menor para aletas com maior razão de aspecto;
- os aspectos geométricos e de posicionamento da aleta influenciam significativamente o processo de fusão em um trocador de calor.

O estudo realizado oportuniza um estudo de otimização da aleta em um trocador de calor, para o menor tempo de fusão do PCM, para diferentes relações de área da aleta e cavidade, além do comportamento com outros PCM, sendo estas sugestões de continuidade deste trabalho.

3 APLICAÇÃO DO DESIGN CONSTRUTAL EM ALETAS DE TROCADOR DE CALOR DE SEÇÃO ANULAR COM FUSÃO DE PCM

Resumo. *Energia pode ser armazenada na forma de calor sensível ou latente, sendo que a última utiliza Phase Change Materials (PCM). Estes oferecem uma série de vantagens, como processo de carga e descarga praticamente isotérmicos e alta densidade energética. Contudo, a baixa condutividade térmica torna longos os ciclos destes sistemas, restringindo sua aplicabilidade. O presente trabalho apresenta um estudo de Design Construtal em aletas inseridas em tubo anular, sendo mantidas constantes as áreas e o PCM, tendo por objetivo minimizar o tempo de fusão do PCM no qual está envolta. O estudo foi concebido por meio da fluidodinâmica computacional. O modelo numérico foi validado com resultados experimentais da literatura e é composto pelas equações da quantidade de movimento, conservação de massa e energia, acrescidas do modelo de mudança de fase. Os resultados do estudo de casos apontam que a posição da aleta no trocador de calor influencia no processo de fusão, evidenciando que, apesar das aletas verticais possuírem um processo de fusão total mais rápido, os trocadores de calor com aletas horizontais podem atingir frações líquidas parciais maiores em menor tempo. Tal como a posição da aleta, o aumento de seu comprimento propicia a redução do tempo de fusão.*

Palavras-chave: *PCM, CFD, Design Construtal, Aletas.*

3.1 Introdução

Sistemas de armazenamento de calor latente possuem alta densidade de armazenamento energético de calor latente. Além disso contam com o benefício da temperatura constante durante o carregamento e descarregamento (JAGUEMONT et al., 2018). Contudo, a maioria dos materiais de mudança de fase (PCM) possuem baixa condutividade térmica, requerendo técnicas para otimizar as taxas de carga e descarga de energia (ALVA; LIN; FANG, 2018). A aplicação de aletas é um meio eficaz e largamente empregado para o aumento da troca térmica, podendo estas ser

geometricamente alteradas e dispostas de diferentes formas. (KALAPALA; DEVANURI, 2018). Empregando CFD, este trabalho tem como objetivo empregar o Design Construtal em aletas instaladas em trocador de calor com cavidade anular, visando identificar a tendência de redução do tempo de fusão total do PCM ácido láurico.

3.2 Apresentação do Problema

O problema consiste em um trocador de calor de seção anular, preenchido pelo PCM ácido láurico, inicialmente no estado sólido. Os raios interno e externo são, respectivamente, $R_{in} = 20$ mm e $R_{ex} = 40$ mm. Quanto a disposição das aletas, foram analisadas orientações vertical e horizontal, conforme apresentado na Fig. 3.1(a,b) respectivamente.

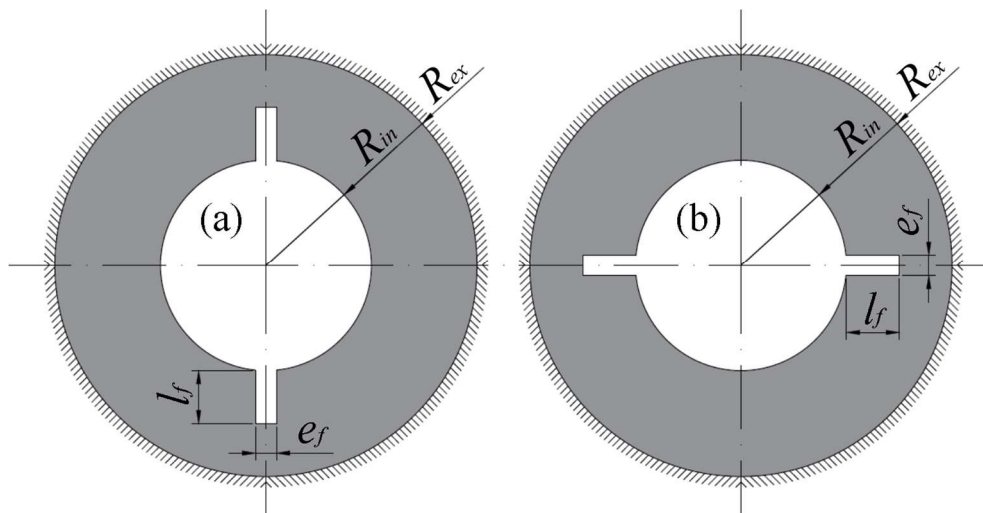


Figura 3.1 - Tubo anular com aletas: (a) verticais e (b) horizontais.

A proporção de ocupação das aletas na seção é dada por ϕ . As aletas possuem área constante (A_f), para cada valor de ϕ , obtida pelo produto do seu comprimento (l_f) pela sua espessura (e_f). O comprimento ($l_f = \Delta R \times RA$) destas foi obtido considerando as seguintes razões de aspecto (RA), também pré-determinadas: 1/8, 1/4, 1/2, 3/4 e 7/8, sendo $\Delta R = R_{ex} - R_{in}$. Assim, e_f foi obtida como: $e_f = A_a / l_f$, conforme apresentado na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Dimensões da aleta

		<i>RA</i>	1/8	1/4	1/2	3/4	7/8
ϕ	0.003	e_f	4.00	2.00	1.00	0.67	0.57
		l_f	2.50	5.00	10.00	15.00	17.50
	0.01	e_f	15.08	7.54	3.77	2.51	2.15
		l_f	2.50	5.00	10.00	15.00	17.50

3.2.1 Modelo Matemático

O modelo matemático é composto pelas equações da conservação da massa (3.1), quantidade de movimento (3.2), acrescidas do modelo de mudança de fase e pelo termo fonte (3.3), as quais são apresentadas na sequência.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + S \quad (3.2)$$

$$S = \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} C \vec{V} \quad (3.3)$$

onde ρ é a massa específica, t o tempo, \vec{V} o vetor velocidade, p é a pressão, \vec{g} aceleração da gravidade, γ é a fração líquida durante a mudança de fase (3.4), ε é uma constante de valor 0,001 para evitar divisão por zero e C é a constante da zona porosa, que dependente da morfologia da zona porosa. (VOLLER; PRAKASH, 1987). Por sua vez a conservação de energia é contemplada pelas Eq. (3.5-3.7) (SHMUELI; ZISKIND; LETAN, 2010).

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial(\rho\lambda)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{V}\lambda) = \nabla(k\nabla T), \quad (3.5)$$

$$\lambda_{sen} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3.6)$$

$$\lambda_L = \gamma L \quad (3.7)$$

onde T_s é a temperatura do sólido e T_l a temperatura do líquido, λ é a entalpia total, obtida pela soma da entalpia sensível (λ_{sen}) e a variação da entalpia na mudança de fase (λ_L), onde λ_{ref} é a entalpia na temperatura de referência (T_{ref}) e λ_L é em função da temperatura da fração líquida na zona porosa, onde L é o calor latente.

3.2.2 Abordagem Numérica e Malha Computacional

A análise por CFD empregou o método dos volumes finitos com domínio computacional bidimensional. Para tal foi utilizada uma malha computacional com 28457 elementos. A análise da convergência da malha foi realizada pelo método GCI, o qual apresentou índice máximo de 1,22%. As propriedades físicas utilizadas foram obtidas de Yuan et al. (2016).

3.3 Resultados e Discussões

3.3.1 Validação Numérica

A validação numérica foi realizada com base nos resultados apresentados por Yuan et al. (2016). A diferença percentual média foi de, aproximadamente, 2%, sendo que, ao final do processo, este valor reduz para 0,1%.

3.3.2 Estudo de caso

A Fig. 3.1 apresenta o comportamento da fração de líquido (β) em função do tempo para casos com aleta vertical (V) e horizontal (H) para os valores extremos de

RA (7/8 e 1/8) aplicados à duas proporções de ocupação da aleta na cavidade ($\phi = 0.01$ e 0.003). Nota-se a prevalência na fusão dos casos H $RA=7/8$ nos instantes iniciais, contudo a partir de $t = 1000$ s a velocidade de fusão destes decresce, dado o afastamento do PCM sólido com as interfaces aquecidas. Também se percebe que durante todo o processo $\phi = 0.01$ prevaleceu em velocidade de fusão.

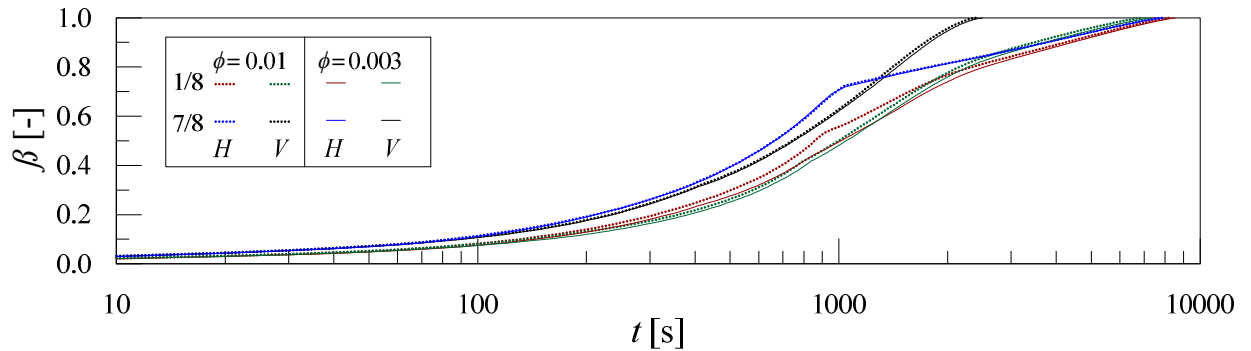


Figura 3.2 – Variação temporal da fração líquida para diferentes casos

O tempo total de fusão (t_m) de cada caso é apresentado na Fig. 3.2, onde nota-se um decréscimo no tempo de fusão com o aumento do valor de RA e de ϕ . Também é visível a grande diferença de tempo para os casos com disposição vertical das aletas em relação aos casos com disposição horizontal.

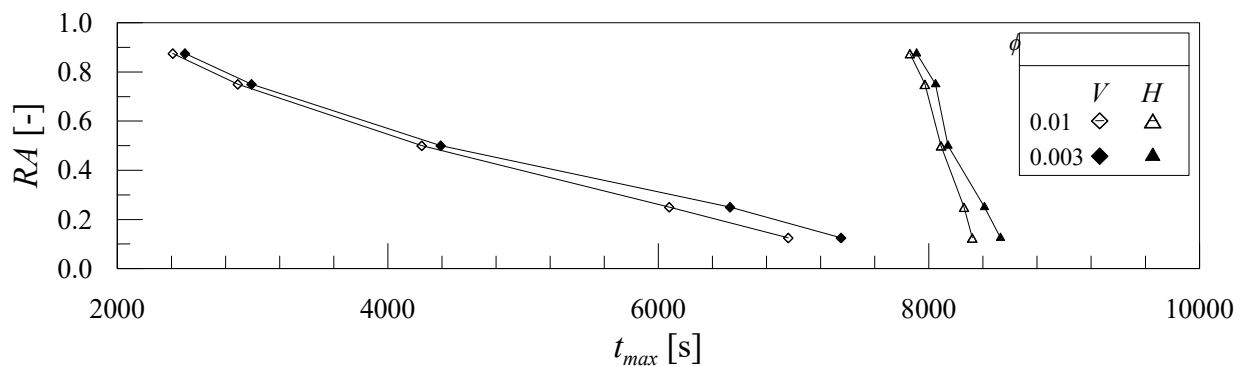


Figura 3.3 - RA vs. t_{max} para diferentes casos

3.4 Conclusões

Este estudo tinha como objetivo analisar o efeito de variações dimensionais das aletas, sobre o tempo de fusão total do PCM ácido láurico, em uma cavidade cilíndrica, por meio da abordagem numérica fluidodinâmica computacional e Design Construtal. A validação do modelo numérico foi realizada com resultados numéricos e experimentais fornecidos pela literatura. A análise de malha foi realizada através do método GCI, o qual resultou em um valor médio de 1,22%.

Através dos resultados obtidos, pode-se dizer que, apesar dos casos com aletas horizontais possuírem um processo de fusão mais intenso no princípio, os trocadores de calor com aletas verticais possuem um processo de fusão total mais rápido. Também se constatou que o tempo de fusão total é inversamente proporcional à RA e ϕ . Dentre os casos apresentados o mínimo valor de t_m é dado por $RA = 7/8$ e $\phi = 0.01$ com aleta vertical.

O presente trabalho oportuniza a continuidade do estudo do efeito de outras frações de área da aleta na cavidade e outras soluções geométricas, sobre o comportamento da fusão do PCM.

4 ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE ALETAS EM UM TROCADOR DE CALOR ANULAR EM PROCESSO DE FUSÃO DE ÁCIDO LÁURICO EMPREGANDO O DESIGN CONSTRUTAL

Resumo. *Em razão de seus benefícios, sistemas de armazenamento de calor latente, utilizando materiais de mudança de fase (PCM) são amplamente empregados e estudados nas mais diversas áreas. Uma das características dos PCM é sua baixa condutividade térmica, o que torna os ciclos de carga e descarga prolongados. Dentre as diferentes soluções para aumentar a taxa de fusão do PCM, o emprego de aletas ainda é a mais difundida. Mesmo assim, o estudo de diferentes propostas geométricas de aletas em cavidades cilíndricas contendo PCM e empregando o método Design Construtal ainda não foi explorado. Assim, o objetivo do presente estudo é analisar o efeito da geometria e da disposição de aletas em um trocador anular contendo o PCM ácido láurico. As dimensões das aletas foram definidas seguindo as etapas do do Design Construtal, totalizando 46 diferentes configurações geométricas. As simulações numéricas foram realizadas através de CFD, cujo modelo numérico composto pelas equações da quantidade de movimento, conservação de massa e energia, acrescidas do modelo de mudança de fase foi validado com resultados da literatura. Os resultados são apresentados na forma de campos de fração líquida e temperatura, linhas de fluxo e vetores de velocidade, além do comportamento da fusão e troca térmica ao longo do processo. Com estes pode-se observar o efeito da geometria sobre o processo de fusão e concluir que a razão de aspecto das aletas é inversamente proporcional ao tempo total de fusão. Além disso, verificou-se que aletas verticais minimizam o tempo total de fusão e inverso ocorre para aletas horizontais.*

Palavras-chave: *Fusão. Ácido Láurico. CFD. Design Construtal.*

4.1 Introdução

Sistemas com PCM (materiais com mudança de fase) são largamente empregados em soluções de aquecimento e arrefecimento de diversas áreas, tais

como: construção civil, conforto térmico de veículos, soluções de transporte de produtos médicos, farmacêuticos e químicos, no resfriamento de eletrônicos, em sistemas solares de aquecimento de água, e na indústria têxtil. (KALAPALA; DEVANURI, 2018). Estes sistemas de armazenamento de calor latente (LHTES) possuem alta densidade de armazenamento energético, acarretando sistemas mais compactos de armazenamento de energia. (ALVA; LIN; FANG, 2018). Além disso, contam com o benefício da temperatura constante (para substâncias puras) durante o carregamento e descarregamento (JAGUEMONT et al., 2018).

Materiais de mudança de fase na faixa de temperaturas entre 0 e 60°C são adequados para finalidades de conforto térmico. Tal faixa de temperatura é compatível com a mudança de fase (sólida-líquida) de PCM orgânicos. Estes são quimicamente estáveis, não tóxicos, não corrosivos e com vasta disponibilidade na natureza. Contudo, a maioria dos PCM possuem baixa condutividade térmica. Isto que acaba requerendo técnicas para o aumento da transferência de calor, com a finalidade de otimizar as taxas de carga e descarga de energia (ALVA; LIN; FANG, 2018). Diversos métodos já foram propostos na literatura, tais como: aplicação de diferentes configurações geométricas do receptáculo, agitação por bolhas, micro encapsulamento, inserção de matriz metálica, dispersão de partículas de alta condutividade, adição de nanopartículas, o emprego de misturas de PCM, imersão em espuma metálica e superfícies estendidas. Dentre todos estes, a aplicação de aletas apresenta os melhores resultados. Diferentes formas de disposição e parâmetros geométricos das aletas permitem o aprimoramento da troca térmica do LHTES (AGYENIM et al., 2010; ABDULATEEF et al., 2018; KALAPALA; DEVANURI, 2018).

O emprego de tubos cilíndricos é predominante em sistemas de engenharia, sendo comum o emprego de arranjos anulares, devido à menor perda de calor desta configuração (AGYENIM et al., 2010). Em vista disso, geometrias de seção anular representam mais de 70% das publicações relacionados à LHTES. (ABDULATEEF et al., 2018). Por sua vez a relação entre os diâmetros do casco e do tubo está fortemente atrelado com o tempo de fusão e solidificação do PCM e a capacidade de armazenamento energético. Neste tipo LHTES podem ser empregadas aletas longitudinais, radiais ou em forma de pinos. Dentre estas, as aletas longitudinais são as mais difundidas, provavelmente em função do projeto e fabricação facilitados,

provendo alta eficiência de troca de calor (ABDULATEEF et al., 2018; KALAPALA; DEVANURI, 2018).

Já foram realizados diversos estudos acerca do efeito da geometria de LHTES de seção anular. Darzi, Farhadi e Sedighi (2012) e Pahamli et al. (2016, 2018), por exemplo, investigaram o efeito da excentricidade dos tubos em conjuntos anulares. Al-Abidi et al. (2013), Mat et al. (2013) e Rathod e Banerjee (2015), constataram aprimoramento na eficiência de LHTES, empregando múltiplas aletas longitudinais. Novas geometrias de aleta foram propostas por Abdulateef et al. (2017) e Sciacovelli, Gagliardi e Verda (2015). Variações na geometria do próprio tubo foram testadas por Darzi, Jourabian e Farhadi (2016). A variação do ângulo das aletas foi abordada por Wang et al. (2016) e Yuan et al. (2016). O emprego combinado de nanopartículas e aletas foi apresentado por Mahdi e Nsofor (2017, 2018). O efeito do comprimento das aletas foi abordado por Ji et al. (2018). Propostas de otimização e configurações inovadoras de aletas longitudinais foram apresentadas por Deng et al. (2019) e Mahdi et al. (2018, 2019).

Cavidades cilíndricas aletadas, contendo PCM, já provaram ser eficazes e atendem necessidades práticas. Embora a literatura apresente diferentes propostas de aprimoramento, o emprego do Design Construtal para a análise das variações geométricas de aletas em trocadores de calor em processo de fusão ainda não foi explorado na literatura. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da geometria e da disposição de aletas em um trocador de calor anular, contendo o PCM ácido láurico, empregando o Design Construtal e fluidodinâmica computacional bidimensional.

4.2 Apresentação do Problema

O trocador de calor estudado possui seção anular, cujos raios interno (R_{in}) e externo (R_{ex}) são, respectivamente, 20 e 40 mm. As aletas possuem comprimento (l_f) e espessura (e_f). O trocador é preenchido com PCM ácido láurico, inicialmente no estado sólido. Foram estudadas duas propostas de aletas: horizontais e verticais, conforme mostra a Fig. 4.1(a, b), respectivamente.

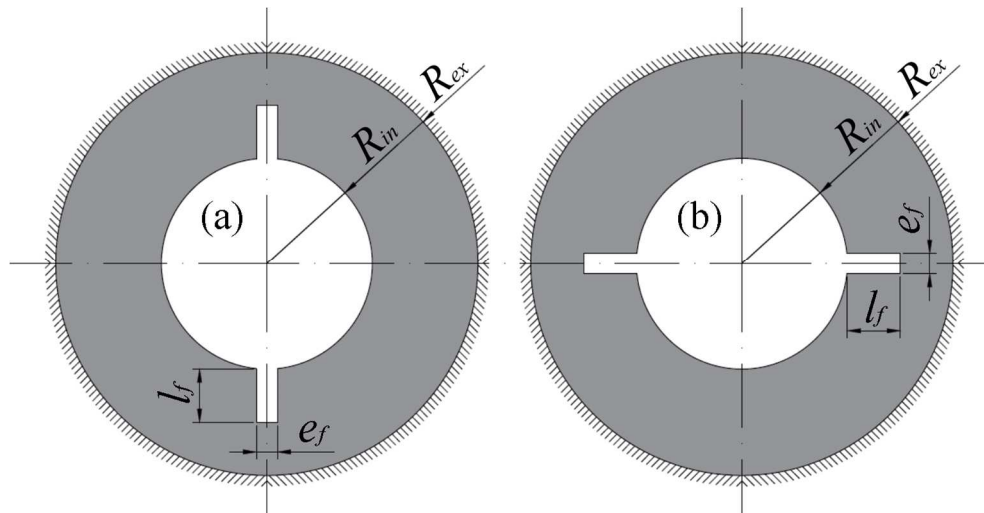


Figura 4.1 - Tubo anular com aletas: (a) verticais e (b) horizontais.

O projeto de aletas deve ser realizado visando a melhor eficiência para o sistema. O Design Construtal é uma ferramenta que auxilia a concepção de geometrias e vem ganhando atenção nos últimos anos (BEJAN; LORENTE, 2013; FENG; CHEN; XIA, 2019). O emprego combinado de simulações numéricas com análise geométrica é um método poderoso para o avanço do projeto de sistemas de armazenamento de energia térmica (LORENTE; BEJAN; NIU, 2015).

O Design Construtal se baseia na ideia de que as geometrias com liberdade para se transformar permitem maior liberdade para o fluxo (calor ou fluido) do sistema, visando a performance global dentro das restrições do sistema (ZIAEI; LORENTE; BEJAN, 2016). No presente trabalho o fluxo de calor promove o processo de fusão do PCM, sendo o tempo de fusão total deste (t_m) um indicador de desempenho usual para sistemas de energia latente.

O fluxograma mostrado na Fig. 4.2 detalha o emprego do Design Construtal associado ao estudo de caso deste trabalho para definição dimensional das aletas.

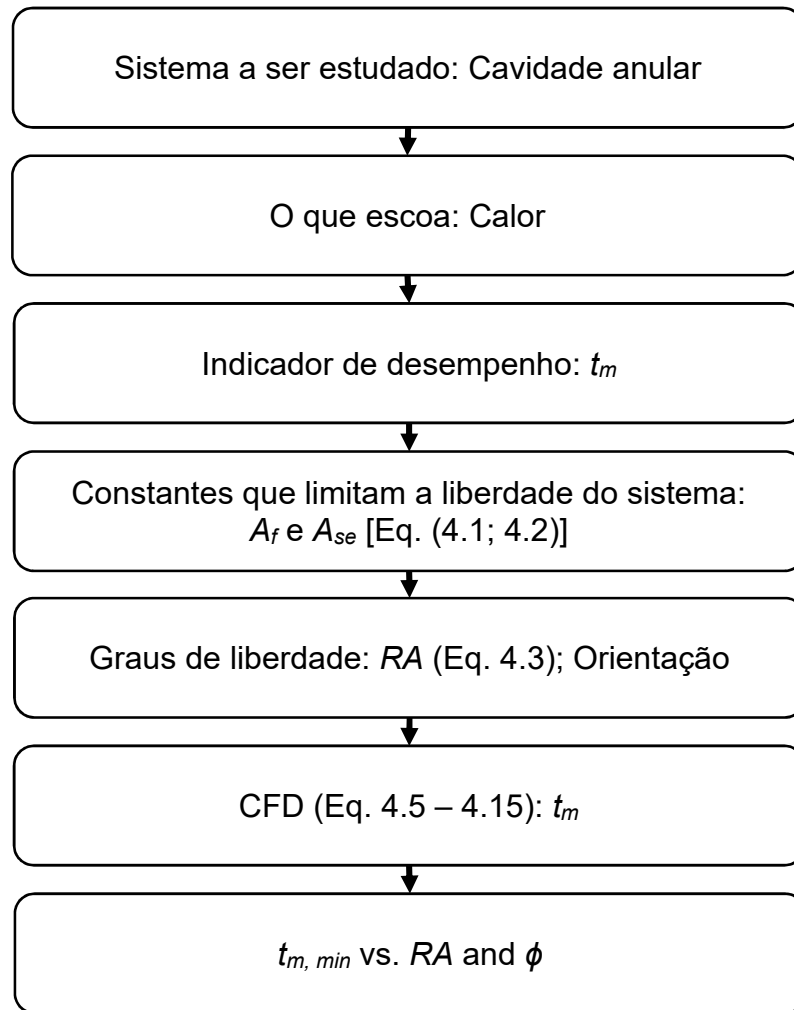


Figura 4.2 – Fluxograma com aplicação do Design Construtal para o estudo de caso. Adaptado de Razera et al. (2018).

Considerando o trocador de calor, com seção cilíndrica anular (Fig. 4.1), as áreas transversais das aletas (A_f) e da cavidade (A_{se}), são obtidas pelas Eqs. (4.1, 4.2) respectivamente, as quais são mantidas constantes em todos os casos estudados. Os graus de liberdade do sistema são definidos pela razão de aspecto (RA), conforme Eq. (4.3), onde $\Delta R = R_{ex} - R_{in}$. As diferentes proporções da área ocupada pelas aletas (ϕ) são obtidas pela Eq. (4.4).

$$A_f = H_f e_f \quad (4.1)$$

$$A_{se} = \pi(R_{ex}^2 - R_{in}^2) \quad (4.2)$$

$$RA = \frac{l_f}{\Delta R}. \quad (4.3)$$

$$\phi = \frac{A_f}{A_{se}} \quad (4.4)$$

Inicialmente foram definidos 5 diferentes valores de ϕ : 0.003, 0.005, 0,01, 0,02 e 0.03. Também foram definidas 5 RA : 1/8, 1/4, 1/2, 3/4 e 7/8. Uma vez que A_{se} é constante, foram então obtidos 5 diferentes de A_f , pela definição de ϕ ($\phi = A_f / A_{se}$). Para cada ϕ foram estudadas 5 aletas verticais e 5 horizontais. Os valores de L_f foram obtidos pela definição de RA ($RA = L_f / \Delta R$). Assim, e_f foi obtida como: $e_f = A_f / L_f$. As dimensões analisadas estão apresentadas na Tab. 4.1. Observa-se que e_f para $RA = 1/8$ e $\phi = 0.02$ e 0.03 não são fisicamente viáveis, pois excedem o valor de ΔR .

Tabela 4.1 - Dimensões das aletas.

		RA				
		1/8	1/4	1/2	3/4	7/8
0.003	e_f	4.00	2.00	1.00	0.67	0.57
	l_f	2.50	5.00	10.00	15.00	17.50
0.005	e_f	7.54	3.77	1.88	1.26	1.08
	l_f	2.50	5.00	10.00	15.00	17.50
ϕ 0.01	e_f	15.08	7.54	3.77	2.51	2.15
	l_f	2.50	5.00	10.00	15.00	17.50
0.02	e_f	30.16	15.08	7.54	5.03	4.31
	l_f	2.50	5.00	10.00	15.00	17.50
0.03	e_f	45.24	22.62	11.31	7.54	6.46
	l_f	2.50	5.00	10.00	15.00	17.50

O PCM utilizado neste trabalho é ácido láurico, um ácido graxo saturado empregado em escala industrial. Este tem como características a biodegradabilidade, estabilidade química, não toxicidade, grande disponibilidade e baixo custo. Além disto, apresenta uma pequena mudança volumétrica durante a mudança de fase. (POLAT; SAYAN, 2018; SARI; KAYGUSUZ, 2002). Os valores de temperatura de fusão (T_m), calor específico (c_p), condutividade térmica (k), coeficiente de expansão térmica (ζ), calor latente (L), massa específica (ρ), e viscosidade dinâmica (μ) do ácido láurico são apresentadas na Tab. 4.2.

Tabela 4.2 - Propriedades termofísicas do ácido láurico.

T_m	c_p	k	ζ	L	ρ	μ		
						60 °C	70 °C	80 °C
44.22	2300	0.147	0.000615	173800	862.9	0.005336	0.004269	0.003469

Fonte: Yuan et al. (2016)

Os valores de Rayleigh, dados por $(Ra = [g \zeta L_c^3 (T_w - T_m)] / (v \alpha))$, onde v é a viscosidade cinemática e $L_c = A_r^{1/2}$ o comprimento característico, são $Ra = 16,98$; 43,94; 124,29; 351,6 e 645,8 para $\phi = 0,003$; 0,005; 0,01; 0,02 e 0,03 respectivamente.

4.3 Abordagem Numérica

A abordagem numérica foi realizada por meio de CFD (Computational Fluid Dynamics) empregando o método dos volumes finitos com o software Workbench 18.2 e seus módulos DesignModeler, Meshing, Fluent e CFD-Post, da empresa ANSYS. Na sequência é apresentado o modelo matemático utilizado nas simulações, bem como a avaliação de malha e validação de modelo numérico.

4.3.1 Modelo Matemático

O modelo matemático é composto pelas equações da conservação da massa (4.5), quantidade de movimento (4.6) e energia (4.7), acrescidas do modelo de mudança de fase, que é apresentado na sequência.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + S \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial(\rho \lambda)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \lambda) = \nabla(k \nabla T), \quad (4.7)$$

onde ρ é a massa específica, t o tempo, \vec{V} o vetor velocidade, p é a pressão, \vec{g} aceleração da gravidade, S o termo fonte (Eq. (4.8)), λ é a entalpia total, obtida pela soma da entalpia sensível (λ_{sen}) e a variação da entalpia na mudança de fase (λ_L).

$$S = \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3+\varepsilon)} C \vec{V} \quad (4.8)$$

onde γ é a fração líquida durante a mudança de fase, ε é uma constante de valor 0.001, para evitar divisão por zero, e C é a constante da zona porosa, que depende da morfologia da zona porosa (VOLLER; PRAKASH, 1987). A fração líquida durante a mudança de fase é obtida através da Eq. (4.9)

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (4.9)$$

onde T_s é a temperatura do sólido e T_l a temperatura do líquido. A entalpia sensível é obtida através da Eq. (4.10).

$$\lambda_{sen} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (4.10)$$

onde λ_{ref} é a entalpia na temperatura de referência (T_{ref}) e C_p é o calor específico a pressão constante. A variação da entalpia na mudança de fase é em função da temperatura, que está associada à fração líquida na zona porosa, obtida através da Eq. (4.11) ou então pela Eq. (4.12)

$$\lambda_L = \gamma L \quad (4.11)$$

$$\lambda_L = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ L & \text{se } T > T_l \\ \gamma L & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (4.12)$$

As seguintes condições iniciais são: $V(x, y, 0) = 0$ e $T = 20^\circ C$. Já as condições de contorno nas paredes são:

$$\text{Se: } R = R_{in} : T = T_w = 80^\circ\text{C} , V = 0 \quad (4.13)$$

$$\text{Se: } R = R_{ex} : q''_w = 0 , V = 0 \quad (4.14)$$

onde T_w e q''_w são respectivamente a temperatura e o fluxo de calor na parede. Sendo o contorno das aletas definido como:

$$T = T_w = 80^\circ\text{C} , V = 0 \quad (4.15)$$

As simulações foram realizadas com o software ANSYS Fluent, 18.2. Para o acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o método *SIMPLE*, o gradiente da discretização espacial foi definido como *Last Squares Cell Based* e a pressão como *PRESTO*. A quantidade de movimento e a energia foram estabelecidos como *Second Order Upwind*. Os fatores de relaxamento utilizados para a pressão, massa específica, forças de campo, quantidade de movimento, fração de líquido e energia foram, respectivamente: 0.3; 1.0; 0.5; 0.5; 0.6 e 1.0. O passo de tempo foi de 0.01 s, com limitação de mil interações por passo de tempo. O critério de convergência para a massa e velocidade foi de 10^{-6} e 10^{-8} para equação da energia.

4.3.2 Avaliação de Malha

Tendo em vista o contínuo crescimento de publicações relacionadas a CFD e os significativos avanços das técnicas e tecnologias computacionais, também foram aprimorados os métodos para a validação de resultados, assegurando a credibilidade dos trabalhos envolvendo fluidodinâmica computacional. Dentre os métodos de validação de malha o GCI é crível e recomendado, tendo sido qualificado através de centenas de casos (CELIK et al., 2008).

Foram criadas três malhas computacionais (*M1*, *M2*, *M3*), com 28457, 14520 e 10118 elementos, respectivamente. A análise da convergência da malha foi realizada pelo método GCI, o qual resultou em um valor máximo e médio de: 1.2241% e 0.0026%, respectivamente, garantindo assim a qualidade da malha computacional.

A malha empregada para a simulação (*M1*) é apresentada na Fig. 4.3. Nota-se que a malha é composta por elementos quadriláteros. Nesta figura pode-se

observar o grande refinamento das superfícies ativas. O Detalhe (A) permite a visualização do gradiente do refino nas paredes da extremidade da aleta. O Detalhe (B) evidencia o refino dos elementos próximo da parede do cilindro interno. Todas malhas utilizadas nas demais geometrias estudadas seguiu os mesmos critérios de distribuição e refino dos elementos.

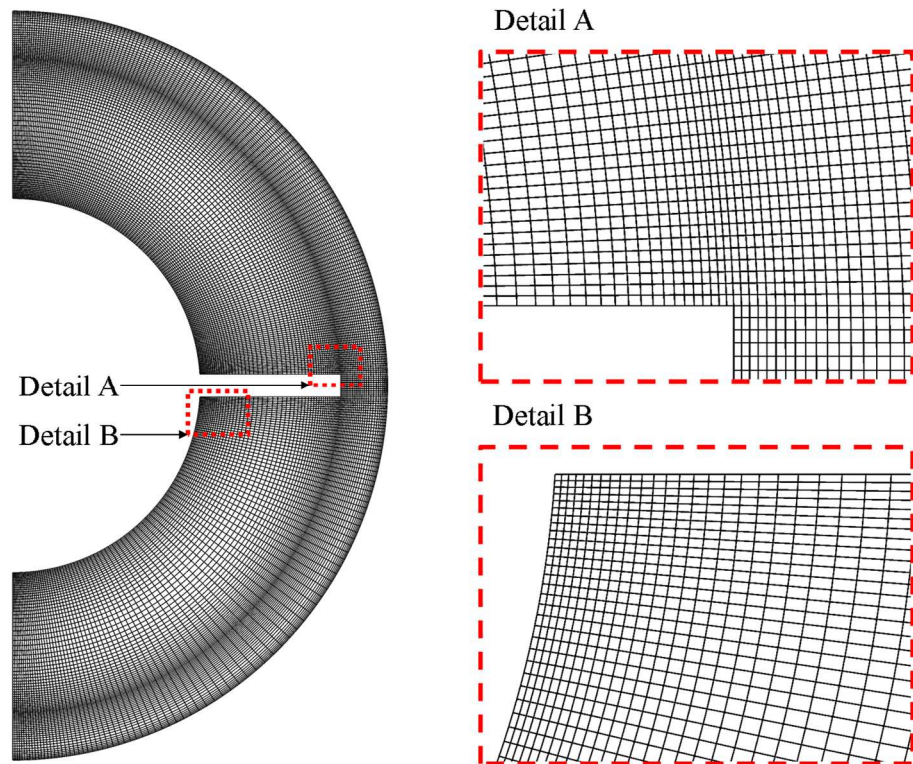


Figura 4.3 – Malha computacional empregada para as simulações numéricas com detalhes na extremidade da aleta (A) e na base da aleta e parede do cilindro interno(B).

4.3.3 Validação Numérica

Para validação numérica foram empregados os resultados experimentais de Yuan et al. (2016). Estes autores também estudaram um trocador de calor anular com aletas internas e preenchido com o PCM ácido láurico. Para fins de validação, na sequência são apresentados resultados quantitativos e qualitativos.

A análise quantitativa foi realizada através dos valores de fração líquida (β) em função do número de Fourier ($Fo = \alpha t/L_c^2$), sendo $\alpha = 7,53 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ a difusividade térmica e $L_c = 0.04 \text{ m}$ o comprimento característico estabelecido pelos autores

citados. Os resultados obtidos pelo presente trabalho e aqueles apresentados pelos autores são mostrados na Fig. 4.4. Observa-se uma boa concordância entre resultados. A diferença percentual média foi de, aproximadamente, 1,5%.

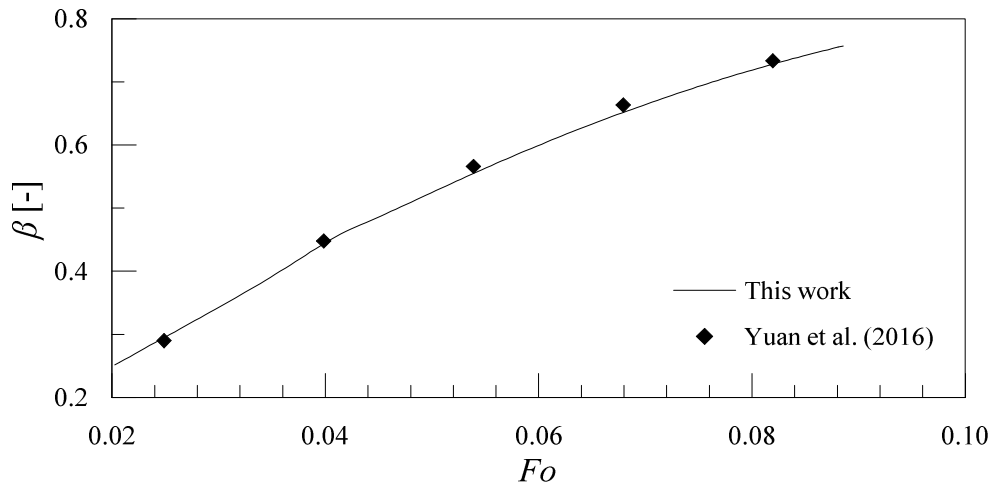


Figura 4.4 – β vs. Fo : experimental de Yuan et al. (2016) e o presente trabalho.

Em termos qualitativos, as Figs. 4.5(a, b) apresentam campos de fração β em $t = 1, 10, 20$ e 60 min, obtidos pelo presente trabalho e por Yuan et al. (2016), respectivamente.

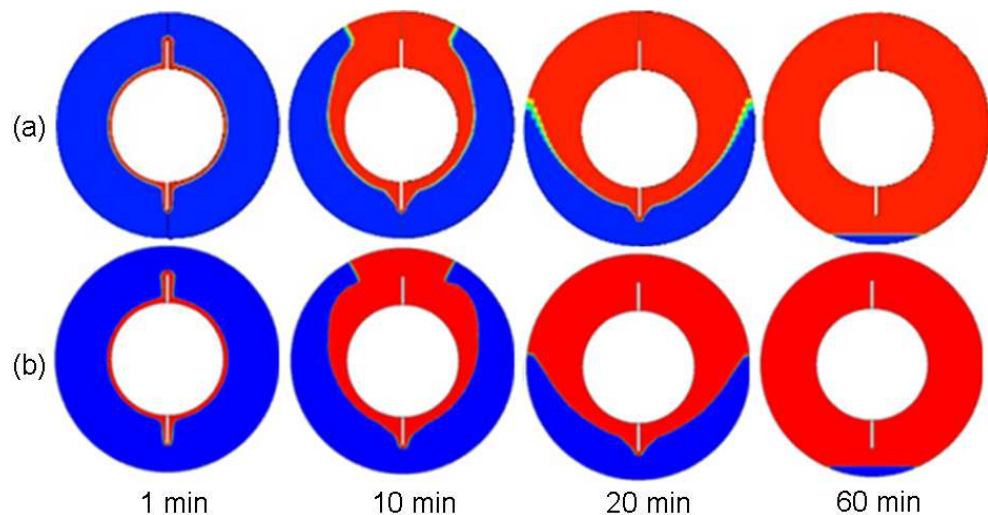


Figura 4.5 – Campos de β em $t = 1, 10, 20$ e 60 min: (a) presente trabalho e (b) Yuan et al. (2016).

Nestas figuras, a região azul representa a fase sólida, enquanto a vermelha representa a fase líquida do PCM. Verifica-se grande semelhança entre resultados,

tanto nos instantes iniciais, quanto nos instantes que seguem. Sendo assim satisfatória a análise qualitativa do modelo numérico.

Diante dos bons resultados apresentados nas Fig. 4.4 e 4.5, bem como da análise obtida através de um ótimo GCI, considera-se o modelo validado e apto para Estudo de Caso.

4.4 Resultados e Discussões

Nos instantes iniciais do processo de fusão há predomínio do mecanismo de transferência de calor por condução de calor, devido ao contato direto da camada sólida com a fonte de calor. À medida que a camada líquida aumenta, entre o material sólido e a fonte de calor, aumenta também a participação do processo de transferência de calor por convecção natural. Este processo pode ser observado nas Figs. 4.6(a, b), para $RA = 7/8$ e $\phi = 0.003$, para sistemas com aletas verticais e horizontais, respectivamente. Nas seções da esquerda e direita do trocador, são mostrados campos de temperatura com linhas de corrente, respectivamente. As linhas de corrente estão sobrepostas ao contorno de fração líquida, onde a cor preta representa a fase sólida e branca a fase líquida. Os Detalhes apresentados nas Figs. 4.6(c, d, e, f, j, h) apresentam os vetores de velocidade.

Do lado esquerdo da Fig. 4.6(a) pode-se verificar gradiente de temperatura na fase sólida. Isto ocorre porque a condição inicial do PCM é de sub-resfriamento. Na região líquida percebe-se estratificação térmica. Além disso, é possível perceber gradientes de temperatura próximos à interface sólido-líquido e parede interna do trocador, além de uma tendência de arrasto ascendente junto à parede interna e descendente próximo à interface sólido-líquido. Este comportamento está em conformidade com os vetores apresentados nas Figs. 4.6(c, d), onde são observadas duas correntes convectivas: uma ascendente e outra descendente. Como a superfície interna do trocador está aquecida em relação ao PCM, isto provoca redução da massa específica do PCM naquela região e consequente empuxo, o que ocasiona a corrente convectiva ascendente. Pela conservação da massa, uma corrente convectiva descendente deve estar presente, como de fato é verificado nestas figuras.

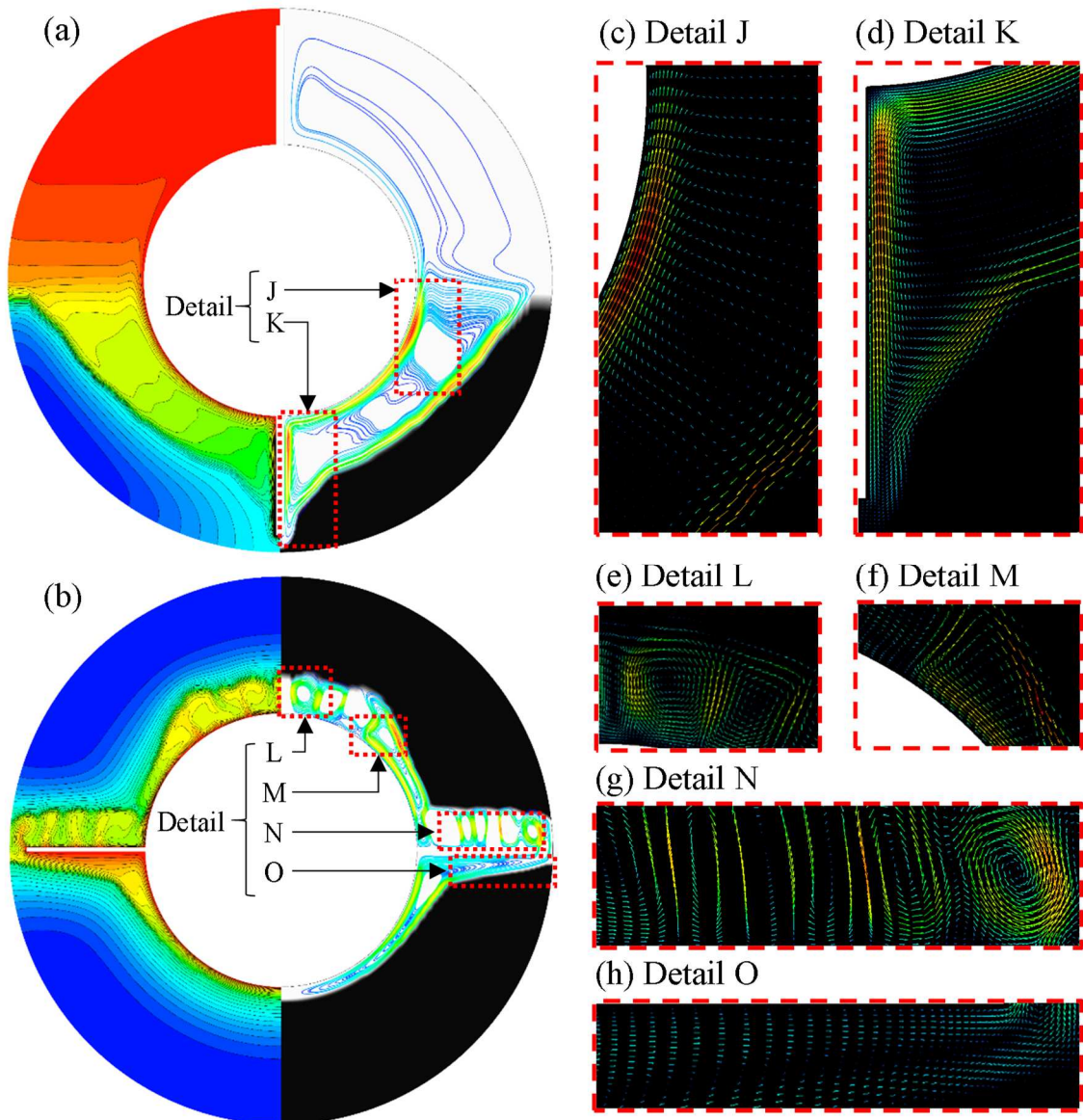


Figura 4.6 – Campos de T e linhas de corrente, com detalhes dos vetores de velocidade para $RA = 7/8$ e $\phi = 0.003$: (a) aletas verticais, (b) aletas horizontais e (c, d, e, f, g, h) relacionadas respectivamente aos Detalhes J, K, L, M, N e O.

A Fig. 4.6(b) também apresenta um gradiente térmico na fase sólida, de acordo com o estado inicial sub-resfriado. Contudo, a fase líquida apresenta um gradiente de temperatura difuso. Tal comportamento está de acordo com o padrão convectivo de Rayleigh-Bénard, esperado sobre uma superfície aquecida. Através das linhas de corrente sobre as superfícies aquecidas horizontais, bem como através dos vetores mostrados nas Figs. 4.6(e, g), ficam evidentes as recirculações características do padrão Rayleigh-Bénard. Neste processo convectivo o líquido aquecido ascende em

múltiplas regiões perpendicularmente à fonte de calor, entrando em contato e fundindo a interface sólida à medida que troca calor. Por conservação da massa ocorre o movimento descendente de líquido resfriado em direção ao plano aquecido, estabelecendo assim um ciclo eficiente de troca térmica.

A Fig. 4.6(f) apresenta o escoamento ascendente próximo a superfície aquecida do tubo e conseqüente escoamento descendente, devido a presença de células de Rayleigh-Bénard no topo da cavidade. A região de cisalhamento entre escoamentos ascendente e descendente também pode ser observado na Fig. 4.6(h). Este conjunto de fenômenos garante uma troca térmica intensa no sistema, enquanto houver material sólido na região acima das superfícies aquecidas.

A evolução do processo de fusão para uma amostra dos casos estudados é apresentada nas Figs. 4.7(a, b, c, d, e), onde podem ser observadas as interfaces líquido-sólido em diferentes instantes de tempo: 1, 10, 20, 30, 40 e 60 min. Pode se observar o progresso dos casos com $RA = 1/4$, $1/2$ e $7/8$ de todos os ϕ , tanto em termos de fusão quanto a evolução do aspecto geométrico com a variação de RA e ϕ . As três primeiras colunas englobam os casos com aletas verticais, ao passo que as três últimas são referentes aos casos com aletas horizontais. Observando as linhas relativas $t = 1, 10$ e 20 min, dos casos com aletas horizontais, é notável o maior avanço da região líquida em comparação aos respectivos casos com aletas verticais. Esta tendência está de acordo como o processo de convecção natural visualizado na Fig. 6.

Ainda em relação as Figs. 4.7(a, b, c, d, e), comparando as linhas de fração líquida em $t = 30, 40$ e 60 min, dos casos com aletas verticais e horizontais, percebe-se uma desaceleração na velocidade fusão dos casos com aletas horizontais, à medida que a fase sólida se distancia das superfícies aquecidas. Analisando em específico os casos com $RA = 7/8$ da Fig. 4.7(e), nota-se que a fusão total concluiu antes dos 40 min para a aleta vertical, enquanto para a aleta horizontal o processo de fusão se estende para além dos 60 min.

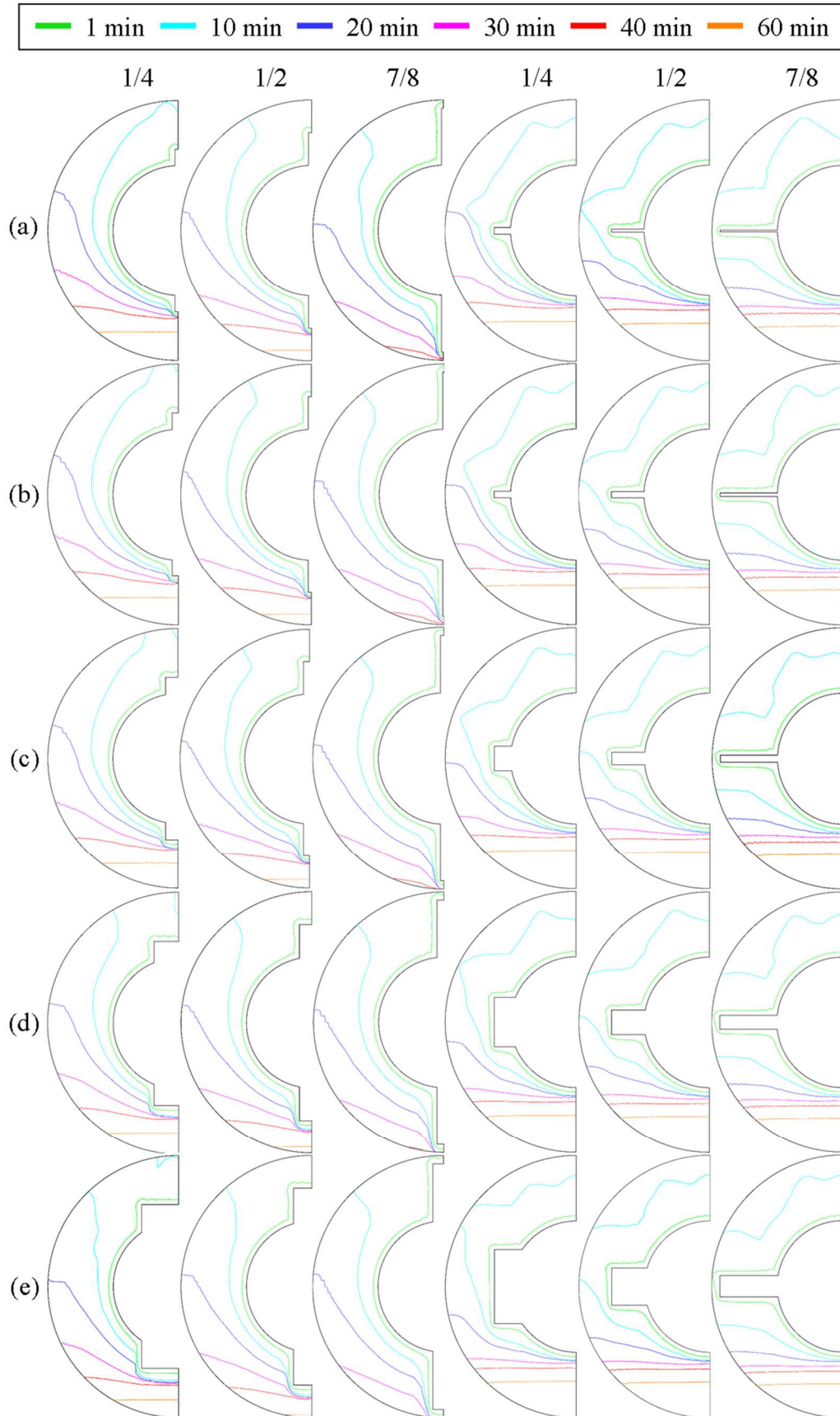


Figura 4.7 – Interface sólido-líquido para diferentes instantes do processo de fusão para $RA = 1/4, 1/2$ e $7/8$ e $\phi =$ (a) 0.003, (b) 0.005, (c) 0.01, (d) 0.02 e (e) 0.03

A Fig. 4.8 apresenta a variação de β em função do número de Fourier ($Fo = \alpha t/L_c^2$), para aletas verticais e horizontais, com $\phi = 0.01$, $RA = 7/8, 3/4, 1/2, 1/4$ e $1/8$. Neste trabalho o comprimento característico foi definido como: $L_c = A_r^{1/2}$, sendo A_r a área transversal da aleta. Nesta figura pode-se observar que, para todos os casos, até, aproximadamente, $Fo = 0.1$, os valores de β são praticamente iguais. Em seguida as linhas se afastam entre si, notando-se a prevalência de fusão para as aletas horizontais, sendo o processo de fusão mais célere na aleta com razão de aspecto 7/8. A partir de $Fo = 2$ ocorre uma transição na declividade do comportamento dos casos relativos às aletas horizontais, sendo o processo de fusão mais lento a partir deste instante. Nos instantes que seguem, verifica-se a fusão completa dos casos com aletas verticais. Inicialmente para o maior RA (7/8) e seguindo de forma ordenada até a fusão do menor RA (1/8). Após todos os casos com aletas verticais terem atingido $\beta = 1$, que os casos com aletas horizontais completam o processo fusão, também de forma ordenada, iniciando pelo caso com maior RA , até o caso com menor RA , em concordância com as tendências visualizadas na Fig. 4.7.

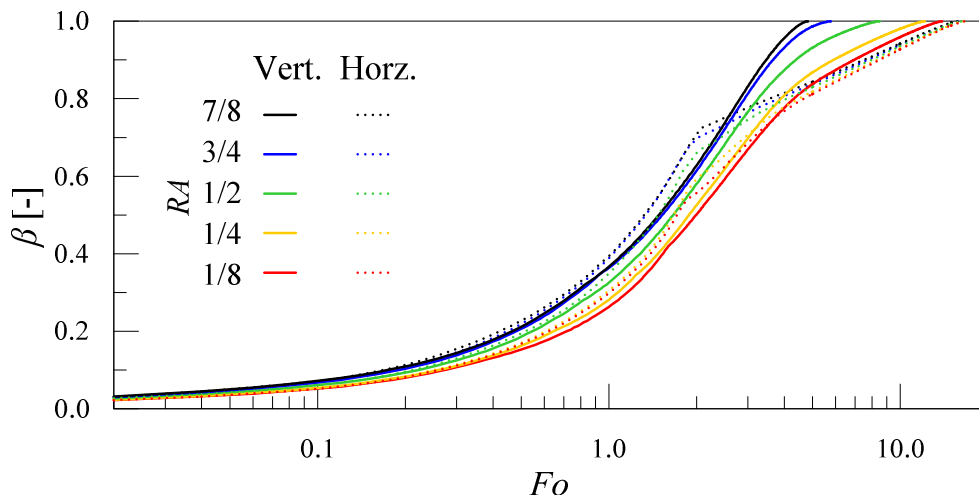


Figura 4.8 – Comportamento de β vs. Fo para aletas verticais e horizontais, $\phi = 0.01$ e $RA = 1/8, 1/4, 1/2, 3/4$ e $7/8$.

As Figs. 4.9(a-c) a apresentam os campos de fração líquida (lado direito) e de temperatura (lado esquerdo), em $t = 600$ e 2270 s, para $\phi = 0.03$ e RA iguais a $7/8, 1/2$ e $1/4$, respectivamente. O instante inicial (600 s) evidencia os processos de troca de calor envolvidos no princípio do processo de fusão, já o instante final (2270 s) é referente ao tempo total de fusão do caso mais rápido (aletas verticais com $RA = 7/8$).

De tal forma é possível contrapor o estado de fusão dos demais casos no instante em que a fusão mais rápida já havia concluído. No centro das cavidades é indicado o valor de β . Observando os campos de temperatura em $t = 600$ s, fica evidente o grande dinamismo dos casos com aletas horizontais. As recirculações delineadas são coesas com o padrão convectivo de Rayleigh-Bénard. Estas recirculações proporcionam maior dinamismo em relação aos casos com aleta horizontal. Enquanto os casos com aletas verticais apresentam campos de temperatura relativamente estratificados, o que indica escoamento ascendente apenas na região próxima a parede aquecida e aleta. Consequentemente, o valor de β é superior para casos com aletas horizontais.

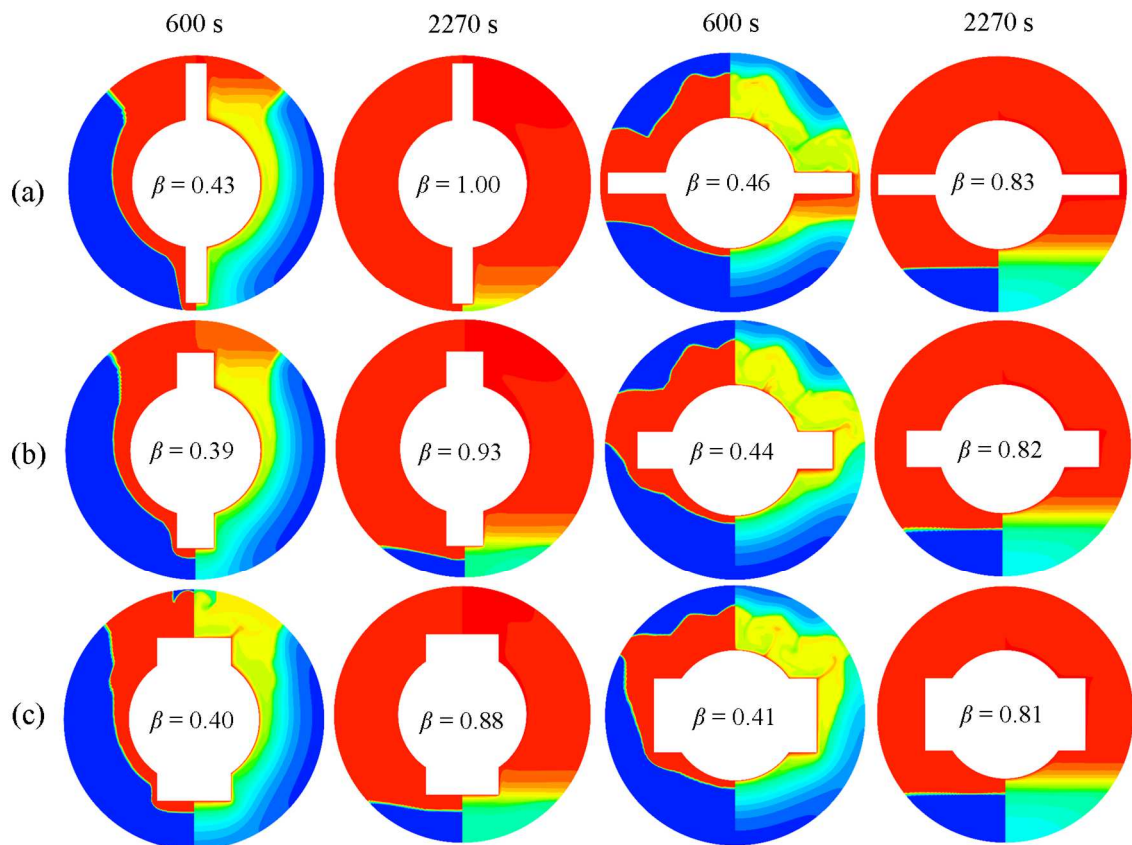


Figura 4.9 – Campos de β (esquerda) e T (direita), em $t = 600$ e 2270 s, para aletas verticais e horizontais, com $\phi = 0.03$ e RA igual: (a) $7/8$, (b) $1/2$ e (c) $1/4$.

Ainda em relação as Figs. 4.9(a-c), em $t = 2270$ s, pode-se observar que, para todos os casos, os campos de temperatura mostram degrau térmico bem definido entre fase sólida e líquida, apesar de apresentar uma pequena estratificação térmica

próximo a interface sólido-líquido. No entanto, comparando-se os valores de β entre aletas verticais e horizontais, observa-se as aletas verticais apresentam mais taxa de fusão em relação as aletas horizontais. Isto decorre porque as verticais estão mais próximas da massa sólida, em comparação com as aletas horizontais.

Na Fig. 4.10 são apresentados os comportamentos de Nusselt ($\overline{Nu} = \bar{h} \cdot L_c / k_l$) por Fo para as 5 RA analisadas, com $\phi = 0.01$. Com o coeficiente de transferência de calor médio \bar{h} sendo $[\bar{h} = q'' / (T_w - T_m)]$, onde q'' é o fluxo de calor total, $T_w = 80^\circ\text{C}$ a temperatura da parede ativa e $T_m = 44,22^\circ\text{C}$ a temperatura de fusão do PCM. Estes resultados apresentam três padrões de comportamento, os quais são indicados por I, II e III. Como observado Ji et al. (2018), estes padrões estão relacionadas com os mecanismos de troca de calor durante a fusão do PCM. A região I inicia com Nu superior à 2 para todos os casos. Tal fato se deve ao início do processo proporcionar contato direto entre o material sólido e a fonte de calor. À medida que o PCM funde, a interface líquida formada entre o sólido e a fonte de calor aumenta. O acréscimo da camada líquida acarreta o aumento da resistência térmica por condução, entre a parede aquecida e o material fundindo, com decréscimo gradativo até $Fo = 0.1$. A região II é caracterizada pelo início de flutuações no comportamento de \overline{Nu} . Estas flutuações são decorrentes do aumento da camada líquida e início de um processo convectivo intenso. Neste trecho os maiores valores de \overline{Nu} são relativos as aletas horizontais, representadas pelas linhas tracejadas. Este comportamento está de acordo com o maior dinamismo do processo convectivo sobre as aletas horizontais, decorrente do padrão convectivo de Rayleigh-Bénard. Na região III, a partir de $Fo = 2$, nota-se uma queda acentuada no valor de \overline{Nu} para os casos com aleta horizontal. Essa mudança abrupta de comportamento se deve ao fim dos processos difusivos ativos até então, ficando a transferência de calor restrita a um processo praticamente condutivo no líquido fundido e estacionário. Os casos com aletas verticais apresentam uma queda gradual no valor de \overline{Nu} , até atingir valor nulo, à medida que a fusão se aproxima do fim.

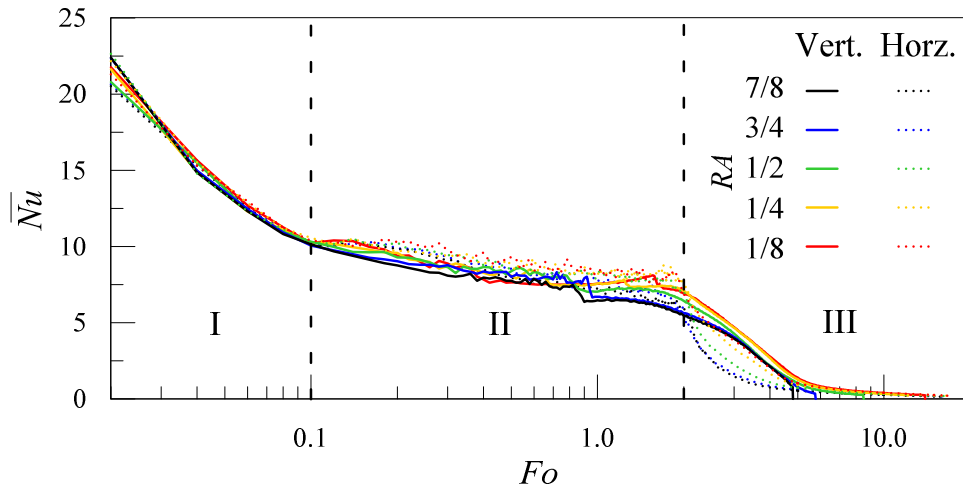


Figura 4.10 – Comportamento de \overline{Nu} por Fo dos casos com aletas verticais e horizontais, para $\phi = 0.01$ e $RA = 1/8, 1/4, 1/2, 3/4$ e $7/8$.

Uma forma de qualificar os diferentes sistemas analisados é através da efetividade destes (η_f) em relação ao sistema sem aletas. Neste trabalho esta efetividade foi definida como: $\eta_f = (\beta/\beta_0) - 1$, onde β_0 é a fração líquida de um caso sem aletas, em um mesmo instante de tempo.

A Figura 4.11 mostra a variação de η_f em função de Fo para aletas verticais e horizontais, com $\phi = 0.01$ e $RA = 1/8, 1/4, 1/2, 3/4$ e $7/8$. Observa-se inicialmente que todos os casos apresentam sua maior η_f no princípio do processo de fusão. O ideal seria que η_f se mantivesse elevado durante todo o processo de fusão, contudo os casos apresentam dois padrões de decréscimo, primeiramente mais acentuado e em seguida de forma gradativa.

A efetividade de aletas horizontais e verticais, representados por linhas pontilhadas e contínuas, respectivamente, são quantitativamente similares para cada valor de RA . O valor de η_f é, inicialmente, superior para aletas horizontais, mas a partir de $Fo > 2$, este valor é superado pelas aletas verticais. Esta inversão ocorre para todos RA apresentados. Aletas horizontais apresentam η_f tendendo a 0 com o acréscimo de Fo . Isto indica a ineficácia das aletas no processo de fusão, dado que o valor nulo de η_f equivale a um sistema sem aletas. No entanto, aletas verticais mantêm o valor de η_f praticamente estável entre $Fo = 2$ e a conclusão do processo de fusão. Nestes casos, os maiores valores de RA revelam maior efetividade e menor valor de Fo na conclusão do processo de fusão.

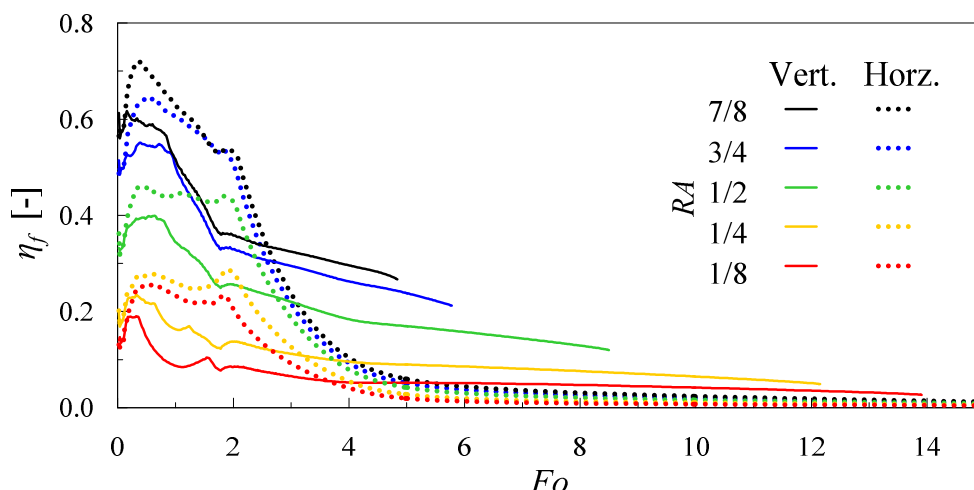


Figura 4.11 – Comportamento da efetividade da taxa de fusão em relação a um sistema sem aletas, por Fo , para os casos com aletas verticais e horizontais, com $\phi = 0.01$ e $RA = 1/8, 1/4, 1/2, 3/4$ e $7/8$.

As Figs. 4.12(a, b) mostram o tempo para atingir fusão completa (t_m) em função de RA , para aletas horizontais e verticais, respectivamente, com $\phi = 0.003, 0.005, 0.01, 0.02$ e 0.03 . Para melhor visualização dos resultados a escala de t_m é diferente entre os casos com aletas horizontais, Fig. 4.12(a), e aletas verticais Fig. 4.12(b). Nestas figuras observa-se inicialmente que, tanto para aletas horizontais quanto verticais, a declividade dos resultados é similar entre os ϕ apresentados. Na Fig. 4.12(a) observa-se o decréscimo de t_m com o aumento de RA , o qual fica abaixo de 1000 s para todos os valores de ϕ . Esta pequena amplitude de tempo indica a baixa representatividade da razão de aspecto no tempo total de fusão, quando as aletas estão dispostas horizontalmente. Tal fato se relaciona com o que foi observado na Fig. 4.11, onde pode-se observar que η_f é praticamente nulo, para todos os valores de RA , ao final do processo de fusão dos casos com aletas horizontais. Embora casos com aletas horizontais promovam uma maior taxa de fusão no princípio do processo, a conclusão do processo de fusão se estende em decorrência do afastamento entre o PCM sólido e a fonte de calor. O acréscimo de RA de aletas horizontais não reduz este afastamento.

O tempo de fusão total dos casos com aletas verticais (Fig. 4.12(b)) varia entre 2000 e 8000 s. A maior amplitude neste eixo de ordenadas é decorrente da maior influência da variação de RA sobre o tempo total de fusão. Como visto na Fig. 4.11, o acréscimo de RA resulta em maior efetividade no final do processo de fusão para esta disposição de aletas. Casos com aletas verticais apresentam proximidade entre

a fonte de calor e o PCM sólido até a conclusão do processo de fusão. O acréscimo no valor de RA destas aletas também aumenta a proximidade da fonte de calor com o PCM no estado sólido.

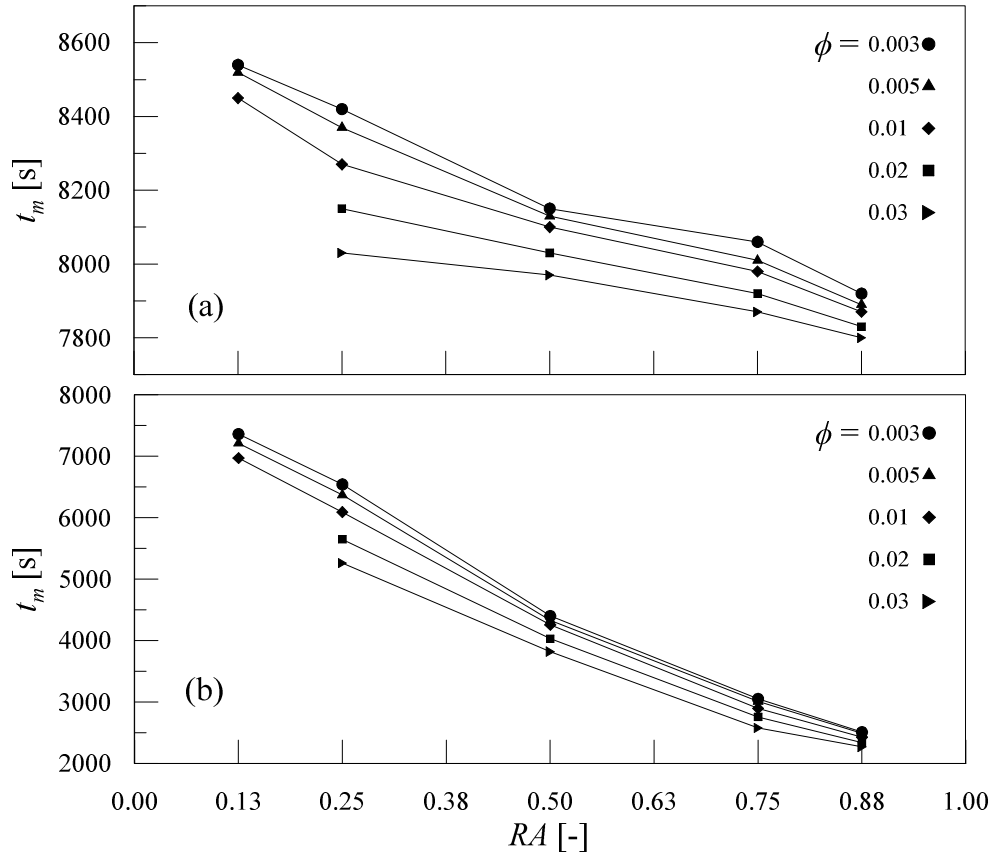


Figura 4.12 – Comportamento de t_m em função de RA para 5 valores de ϕ : (a) aletas horizontais e (b) aletas verticais.

Conforme visto nas Figs.4.12(a, b), o menor tempo de fusão total ($t_{m,min}$) ocorre para $RA = 0.88$ (7/8). Nestas figuras, embora pode-se observar a dependência de $t_{m,min}$ com ϕ , uma avaliação mais precisa é mostrada nas Figs. 4.13(a, b), as quais mostram a variação de $t_{m,min}$ em função de ϕ , para aletas horizontais e verticais, respectivamente. Nestas figuras observa-se que $t_{m,min}$ é inversamente proporcional ϕ , independentemente da disposição da aleta. Isto pode ser atribuído à redução do volume de PCM nas cavidades, pois o acréscimo de ϕ implica em acréscimo de ocupação da aleta no volume da cavidade. Observa-se também que a faixa de variação de $t_{m,min}$ é maior para aletas verticais (Fig. 4.13(b)) do que para aletas horizontais. A diferença entre as faixas de tempo é resultado dos ciclos de carga prolongados em sistemas com aletas horizontais e ciclos mais curtos em sistemas com aletas verticais, tal como visto na Figura 14.2.

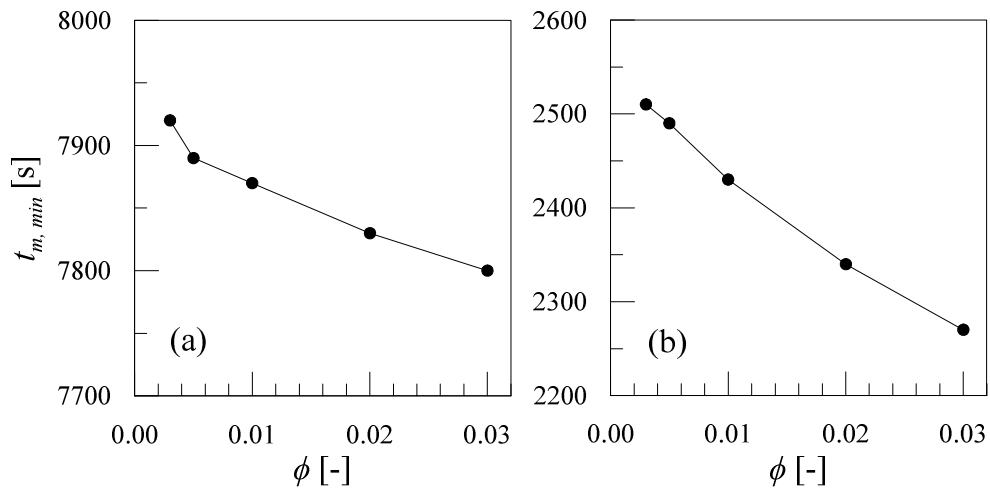


Figura 4.13 - Valores de $t_{m, min}$ vs. ϕ para: (a) aletas horizontais e (b) aletas verticais.

4.5 Conclusões

O presente trabalho visava analisar o comportamento do processo de fusão do PCM ácido láurico em uma cavidade cilíndrica, de acordo com as variações dimensionais das aletas, empregando o Design Construtal e abordagem numérica por fluidodinâmica computacional. A validação do modelo numérico foi realizada com resultados numéricos e experimentais fornecidos pela literatura. A análise de malha foi realizada através do método GCI, o qual resultou em um valor médio de 0.0026%. Foi empregado o método Design Construtal para definição das dimensões das aletas verticais e horizontais no interior de duto anular, preenchido com o PCM ácido láurico. Os principais resultados foram:

- aletas horizontais promovem maior troca térmica enquanto há PCM sólido na região acima da fonte de calor, devido ao padrão convectivo de Rayleigh-Bénard;
- aletas verticais possuem um processo de fusão total mais rápido, decorrente da maior proximidade da fonte de calor com o PCM sólido no final do processo de fusão;
- o acréscimo da razão de aspecto da aleta reduz o tempo de fusão em aletas, tanto verticais quanto horizontais;
- o acréscimo de ϕ resultou em um decréscimo aproximadamente linear no tempo de fusão total do PCM no trocador de calor.

O estudo realizado oportuniza assim a proposta de uma nova solução geométrica para as aletas, conciliando as melhores características geométricas observadas no presente trabalho, sendo esta a sugestões de continuidade deste trabalho.

5 ESTUDO NUMÉRICO DO EFEITO DA GEOMETRIA DE ALETAS COM RAMIFICAÇÕES RADIAIS EM UM TROCADOR DE CALOR ANULAR NO PROCESSO DE FUSÃO

Resumo. *Materiais de Mudança de Fase (PCM – phase change material) orgânicos tem como principais características a biodegradabilidade, estabilidade química, não toxicidade, grande disponibilidade e baixo custo. Além disto, apresentam uma pequena mudança volumétrica durante a mudança de fase e baixa condutividade térmica. A baixa condutividade térmica produz tempo de carga e descarga elevados. Existem diversas técnicas para minimizar o tempo de fusão em sistemas de armazenamento térmico que utilizam PCM. O emprego de aletas ainda é a técnica mais utilizada para aumentar as taxas de transferência de calor, minimizando assim os tempos de carga e de descarga. O objetivo do presente estudo é analisar o efeito da geometria de aletas com ramificação radial em um trocador anular contendo o ácido láurico. As dimensões das aletas foram definidas seguindo as etapas do Design Construtal, totalizando 15 diferentes configurações geométricas. As simulações numéricas foram realizadas através de CFD, cujo modelo numérico composto pelas equações da quantidade de movimento, conservação de massa e energia, acrescidas do modelo de mudança de fase foi validado com resultados da literatura. Os resultados são apresentados na forma de adimensionais da variação temporal da fração líquida e fluxo de calor, bem como campos de fração líquida e temperatura, linhas de fluxo e vetores de velocidade. Também são apresentados os comportamentos da fusão e troca térmica ao longo do processo e valores de efetividade da taxa de fusão. Tais resultados permitiram observar o efeito da geometria da aleta sobre o processo de fusão e concluir que para cada percentual de ocupação de aleta na seção ocorre um ponto de tempo mínimo de acordo com a variação do ângulo de avanço das ramificações da aleta. A efetividade da taxa de fusão atingiu valores de até 95% em relação a um sistema sem aletas. Notou-se também que a proximidade das aletas com a parede interna ou externa da seção anular aumenta o tempo de fusão total do PCM na cavidade.*

Palavras-chave: *Fusão. Ácido Láurico. CFD. Design Construtal.*

5.1 Introdução

Sistemas de armazenamento térmico, TES, representam uma nova forma de armazenamento de energia, diminuindo o uso de energia elétrica e capazes de complementar energias renováveis. Aplicações nas áreas de armazenamento de calor industrial, sistemas de condicionamento de ar em prédios, resfriamento de eletrônicos, aproveitamento da energia em excesso de coletores solares são alguns exemplos de TES e evidenciam a sua relevância (MADESSA, 2014; SEDDEGH et al., 2015; YOO; JOSHI, 2004; ZONDAG et al., 2018). Esses sistemas conseguem armazenar calor na forma de calor sensível, latente e termoquímico. Armazenamento envolvendo calor latente, através de matérias de mudança de fase (PCM) se sobressaem aos outros por armazenarem calor à temperatura constante e apresentarem uma maior densidade energética (LIAO et al., 2018).

Apesar das vantagens desses sistemas, PCMs apresentam uma baixa condutividade térmica, impossibilitando carregamento e descarregamento de calor em tempos reduzidos. Para contornar isso há diversas abordagens diferentes. Através de cavidades contendo materiais porosos, sistema com diversos PCMs, dispersão de nano partículas e cavidades estendidas (aletas) (ALOMAIR et al., 2018; PEIRÓ et al., 2015; FLEMING et al., 2015; KALBASI; SALIMPOUR, 2015)

O uso de aletas é um tema bastante estudado na literatura, englobando desde cavidades retangulares e cilíndricas até formatos de aletas variados. Diversos autores buscaram entender o efeito da geometria e da posição das aletas com o processo de fusão e solidificação de PCM (ABDULATEEF et al., 2018). Ren e Chan (2016) analisaram numericamente o efeito da configuração e do número de aletas em uma cavidade retangular, aquecida pelas duas paredes laterais. Constatou-se que a maior área de transferência de calor alcançadas pelas aletas diminui o tempo total da fusão do PCM, com a contrapartida de diminuir a quantidade total de energia armazenada.

Além da maior transferência de calor proporcionada pelas aletas, a convecção natural efetua um papel fundamental no processo, influenciando no tempo total de fusão (PARSAZADEH; DUAN, 2018). Para tal, se faz necessário avaliar a convecção natural do fluido durante todas as etapas do processo. Yuan et al. (2016) simularam numericamente uma cavidade aletada longitudinalmente em diferentes ângulos. Constatou-se que aletas com ângulo de 0°, ou vertical, possuem o menor tempo total

para o processo de fusão. Isso acontece, pois, no final do processo, quando a convecção natural já não apresenta tanta força, a maior taxa de condução de calor causada pela aleta na parte inferior da cavidade diminui o tempo total de fusão em comparação com aletas em ângulos maiores. Da mesma forma, Wang et al. (2016) estudaram uma cavidade cilíndrica com aletas longitudinais, constatando um menor tempo total no processo de fusão em comparação com a cavidade sem aletas. Ainda assim, no final do processo pode-se observar um claro ponto de inflexão na predominância da troca de calor por convecção para condução.

Nesse sentido, se torna desejado procurar geometrias inovadoras para aprimorar o processo de fusão, principalmente nas fases finais do processo. Para uma análise do efeito das diversas configurações da aleta na cavidade utiliza-se o Design Construtal, um método na qual a geometria tem liberdade de se modificar conforme o valor dos graus de liberdade, como o objetivo de melhorar a performance de um indicador de desempenho escolhido (ZIAEI; LORENTE; BEJAN, 2016).

Neste estudo, para uma cavidade anular aletada longitudinalmente, a aleta, posicionada na parte inferior da cavidade, possui ramificações radiais na extremidade. Procura-se avaliar o comportamento do processo de fusão do PCM Ácido Láurico através do Design Construtal a fim de minimizar o tempo total de fusão, por meio da abordagem da fluidodinâmica computacional bidimensional.

5.2 Apresentação do Problema

O estudo realizado aborda um trocador de calor de seção anular, cujos raios interno (R_{in}) e externo (R_{ex}) são, respectivamente, 20 e 40 mm. Tal como apresentado na Fig. 5.1, a aleta posicionada na região inferior do sistema possui comprimento (l) e espessura $e_1 = 4$ mm. A extremidade inferior da aleta se ramifica em dois segmentos com espessura $e_2 = 2$ mm, os quais se estendem de acordo com θ . O trocador é preenchido com PCM ácido láurico, inicialmente no estado sólido.

O emprego do Design Construtal no dimensionamento destas aletas permite que o fluxo de calor do sistema se distribua da melhor forma possível, dentro das restrições estabelecidas. O tempo de fusão do PCM (t_m) é comumente apresentado na literatura como indicador de desempenho do sistema.

A Fig. 5.2 esquematiza o emprego do Design Construtal relativo as definições dimensionais das aletas abordadas neste presente trabalho.

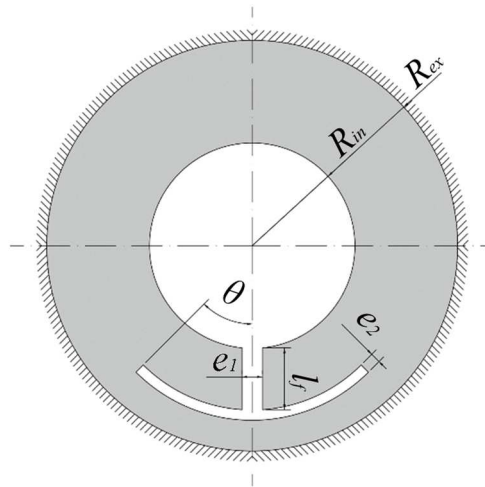


Figura 5.1 - Tubo anular com aleta ramificada

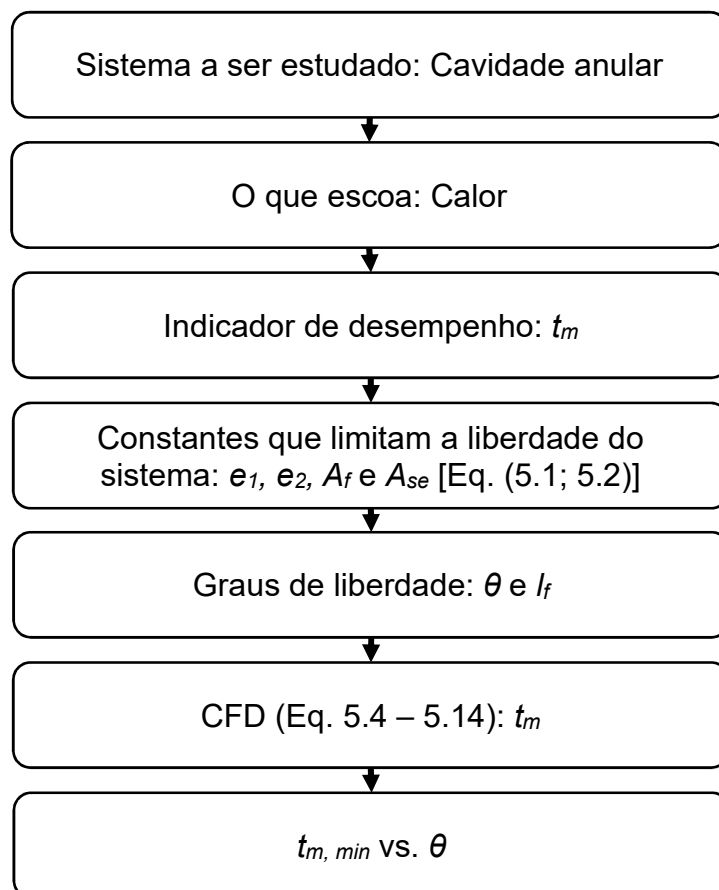


Figura 5.2 – Fluxograma com aplicação do Design Construtal para o estudo de caso. Adaptado de Razera et al. (2018).

Dado o trocador de calor, com seção cilíndrica anular (Fig. 5.1), as áreas transversais das aletas (A_f) e da cavidade (A_{se}), são obtidas pelas Eqs. (5.1, 5.2) respectivamente, as quais são mantidas constantes em todos os casos estudados.

$$A_f = l_f e_1 + \pi[(R_{in} + l_f + e_2)^2 - (R_{in} + l_f)^2] (\theta/180) \quad (5.1)$$

$$A_{se} = \pi(R_{ex}^2 - R_{in}^2) \quad (5.2)$$

As diferentes proporções da área ocupada pelas aletas (ϕ) são obtidas pela Eq. (5.3).

$$\phi = \frac{A_f}{A_{se}} \quad (5.3)$$

Foram definidos 2 valores de ϕ : 0,02 e 0,03. Dado que A_{se} é constante, foram então obtidos 2 diferentes de A_f , pela definição de ϕ ($\phi = A_f / A_{se}$). Para cada ϕ foram determinados 5 valores de θ : 30, 45, 60, 75 e 90. Os valores de l_f foram obtidos colocando este em evidência na Eq. 5.1. Foram então descartados os casos com valores de l_f fisicamente inviáveis por excederem a região anular.

De acordo com os resultados obtidos foram estabelecidos novos casos, refinando a variação de θ de acordo com o indicador de desempenho. As 15 configurações analisadas estão apresentadas na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 - Dimensões das aletas.

$\phi = 0.02$	θ	30	32.5	35	37.5	45	60	75	
	l_f	17.53	16.45	15.44	14.48	11.88	7.673	4.422	
$\phi = 0.03$	θ	60	67.5	70	72.5	75	77.5	80	90
	l_f	16.88	14.6	13.91	13.23	12.59	11.96	11.36	9.166

A cavidade anular é preenchida com ácido láurico. Este ácido graxo saturado é largamente empregado como PCM dado seu baixo custo, grande disponibilidade e suas características de biodegradabilidade, estabilidade química, não toxicidade e uma pequena mudança volumétrica durante a mudança de fase. (POLAT; SAYAN,

2018; SARI; KAYGUSUZ, 2002). Os valores de temperatura de fusão (T_m), calor específico (c_p), condutividade térmica (k), coeficiente de expansão térmica (ζ), calor latente (L), massa específica (ρ), e viscosidade dinâmica (μ) do ácido láurico são apresentadas na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 - Propriedades termofísicas do ácido láurico.

T_m	c_p	k	ζ	L	ρ	μ		
						60 °C	70 °C	80 °C
44.22	2300	0.147	0.000615	173800	862.9	0.005336	0.004269	0.003469

Fonte: (YUAN et al., 2016)

Os valores de Rayleigh, dados por ($Ra = [g \zeta L_c^3 (T_w - T_m)] / (v \alpha)$), onde v é a viscosidade cinemática e $L_c = A_f^{1/2}$ o comprimento característico, são $Ra = 351,6$ e $645,8$ para $\phi = 0.02$ e 0.03 respectivamente.

5.3 Abordagem Numérica

A abordagem numérica foi realizada por meio de CFD (Computational Fluid Dynamics) empregando o método dos volumes finitos com o software Workbench 18.2 e seus módulos DesignModeler, Meshing, Fluent e CFD-Post, da empresa ANSYS. Na sequência é apresentado o modelo matemático utilizado nas simulações, bem como a avaliação de malha e validação de modelo numérico.

5.3.1 Modelo Matemático

O modelo matemático é composto pelas equações da conservação da massa (5.4), quantidade de movimento (5.5) e energia (5.6), acrescidas do modelo de mudança de fase, que é apresentado na sequência.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + S \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial(\rho\lambda)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{V}\lambda) = \nabla(k\nabla T), \quad (5.6)$$

onde ρ é a massa específica, t o tempo, \vec{V} o vetor velocidade, p é a pressão, \vec{g} aceleração da gravidade, S o termo fonte (Eq. (5.7)), λ é a entalpia total, obtida pela soma da entalpia sensível (λ_{sen}) e a variação da entalpia na mudança de fase (λ_L).

$$S = \frac{(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} C\vec{V} \quad (5.7)$$

onde γ é a fração líquida durante a mudança de fase, ε é uma constante de valor 0.001, para evitar divisão por zero, e C é a constante da zona porosa, que depende da morfologia da zona porosa (VOLLER; PRAKASH, 1987). A fração líquida durante a mudança de fase é obtida através da Eq. (5.8)

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (5.8)$$

onde T_s é a temperatura do sólido e T_l a temperatura do líquido. A entalpia sensível é obtida através da Eq. (5.9).

$$\lambda_{sen} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (5.9)$$

onde λ_{ref} é a entalpia na temperatura de referência (T_{ref}) e C_p é o calor específico a pressão constante. A variação da entalpia na mudança de fase é em função da temperatura, que está associada à fração líquida na zona porosa, obtida através da Eq. (5.10) ou então pela Eq. (5.11)

$$\lambda_L = \gamma L \quad (5.10)$$

$$\lambda_L = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ L & \text{se } T > T_l \\ \gamma L & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (5.11)$$

As seguintes condições iniciais são: $V(x, y, 0) = 0$ e $T = 20^\circ C$. Já as condições de contorno nas paredes são:

$$\text{Se: } R = R_{in} : T = T_w = 80^\circ C, V = 0 \quad (5.12)$$

$$\text{Se: } R = R_{ex} : q''_w = 0, V = 0 \quad (5.13)$$

onde T_w e q''_w são respectivamente a temperatura e o fluxo de calor na parede. O contorno das aletas é definido como:

$$T = T_w = 80^\circ C, V = 0 \quad (5.14)$$

As simulações foram realizadas com o software ANSYS Fluent, 18.2. Para o acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o método *SIMPLE*, o gradiente da discretização espacial foi definido como *Last Squares Cell Based* e a pressão como *PRESTO*. A quantidade de movimento e a energia foram estabelecidos como *Second Order Upwind*. Os fatores de relaxamento utilizados para a pressão, massa específica, forças de campo, quantidade de movimento, fração de líquido e energia foram, respectivamente: 0.3; 1.0; 0.5; 0.5; 0.6 e 1.0. O passo de tempo foi de 0.01 s, com limitação de mil interações por passo de tempo. O critério de convergência para a massa e velocidade foi de 10^{-6} e 10^{-8} para equação da energia.

5.3.2 Avaliação de Malha

Foram criadas três malhas computacionais (*M1*, *M2*, *M3*), com 73960, 51379 e 36583 elementos, respectivamente. A análise da convergência da malha foi realizada pelo método GCI, o qual resultou em valor um médio de: 2.71%, garantindo assim a qualidade da malha computacional. O índice de convergência de malha (GCI) é uma forma confiável de avaliar a qualidade da malha computacional, tendo sido qualificado através de centenas de casos (CELIK et al., 2008).

A malha empregada para a simulação (*M1*) é apresentada na Fig. 5.3. A malha é composta por elementos quadriláteros. Nota-se na figura o grande refinamento das superfícies ativas. Os Detalhes (A) e (B) evidenciam o gradiente do refino nas paredes da extremidade da aleta e na parede do cilindro interno. Todas malhas

utilizadas nas demais geometrias estudadas seguiu os mesmos critérios de distribuição e refino dos elementos.

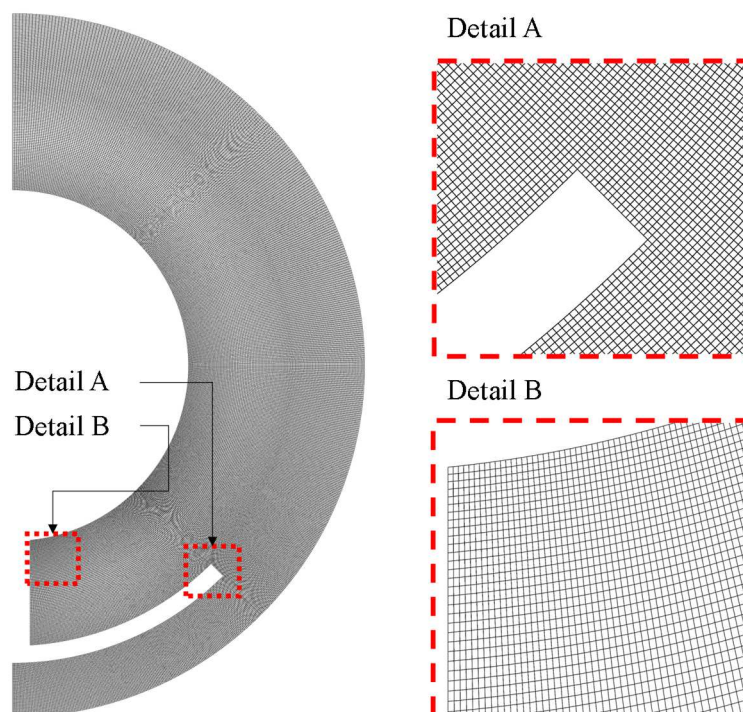


Figura 5.3 – Malha computacional empregada para as simulações numéricas com detalhes na extremidade da aleta (A) e na base da aleta e parede do cilindro interno(B).

5.3.3 Validação Numérica

Para validação numérica foram empregados os resultados experimentais de Yuan et al. (2016). Estes autores também estudaram um trocador de calor anular com aletas internas e preenchido com o PCM ácido láurico. Para fins de validação, na sequência são apresentados resultados quantitativos e qualitativos.

A análise quantitativa foi realizada através dos valores de fração líquida (β) em função do número de Fourier ($Fo = \alpha t / L_c^2$), sendo $\alpha = 7,53 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ a difusividade térmica e $L_c = 0,04 \text{ m}$ o comprimento característico estabelecido pelos autores citados. Os resultados obtidos pelo presente trabalho e aqueles apresentados pelos autores são mostrados na Fig. 5.4. Observa-se uma boa concordância entre resultados. A diferença percentual média foi de, aproximadamente, 1,5%.

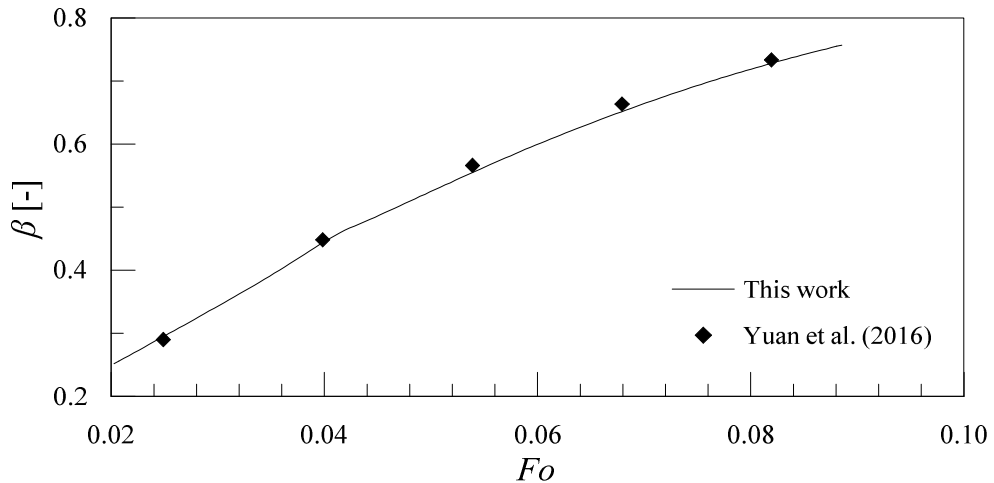


Figura 5.4 – β vs. Fo : experimental de Yuan et al. (2016) e o presente trabalho.

Em termos qualitativos, as Figs. 5.5(a, b) apresentam campos de fração β em $t = 1, 10, 20$ e 60 min, obtidos pelo presente trabalho e por Yuan et al. (2016), respectivamente.

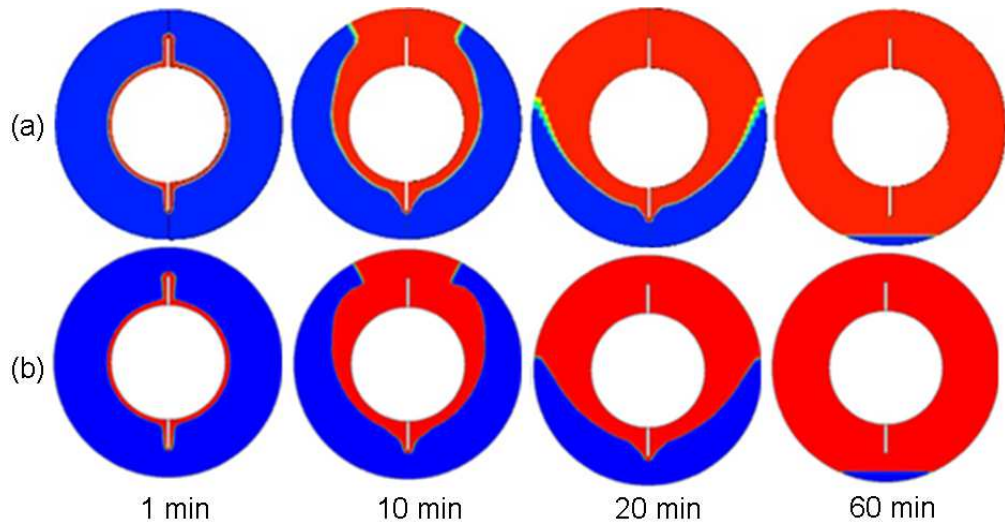


Figura 5.5 – Campos de β em $t = 1, 10, 20$ e 60 min: (a) presente trabalho e (b) Yuan et al. (2016).

Nestas figuras, a região azul representa a fase sólida, enquanto a vermelha representa a fase líquida do PCM. Verifica-se grande semelhança entre resultados, tanto nos instantes iniciais, quanto nos instantes que seguem. Sendo assim satisfatória a análise qualitativa do modelo numérico.

Diante dos bons resultados apresentados nas Fig. 5.4 e 5.5, bem como da análise obtida através de um ótimo GCI, considera-se o modelo validado e apto para Estudo de Caso.

5.4 Resultados e Discussões

Os mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo de fusão do PCM em uma cavidade anular variam em função da fração líquida e de acordo com a presença e disposição de aletas. Já foi estudado o fato de que superfícies horizontais ativas promovem a convecção natural de forma intensa, gerando recirculações características do padrão Rayleigh-Bénard. Todavia, o distanciamento da região aquecida com o PCM sólido aumenta o tempo do processo de fusão, sendo de interesse manter a proximidade entre ambos até a conclusão do processo de fusão.

As Figuras 5.6(a, b) apresentam os trocadores de calor para ϕ 0.03 com $\theta = 60^\circ$ e 90° respectivamente, ambas no instante $t = 600$ s. As imagens são divididas em duas seções, as quais apresentam os campos de temperatura e linhas de corrente, dispostos nas seções da esquerda e direita respectivamente. As linhas de corrente estão sobrepostas ao contorno de fração líquida, onde a região preta representa a fase sólida e branca a fase líquida. As Figs. 5.6(c, d) apresentam os Detalhes das regiões indicadas, com os vetores de velocidade.

Devido à condição inicial de sub-resfriamento do PCM observa-se gradiente de temperatura na região sólida na seção esquerda das Figs. 5.6(a, b). Também pode-se observar gradientes de temperatura próximos a interface sólido-líquido e parede interna do trocador. Na região líquida nota-se um gradiente de temperatura difuso. Tal comportamento está de acordo com as linhas de corrente observadas na seção direita, onde notam-se as recirculações promovidas pelo aquecimento do líquido sobre as regiões aquecidas. O líquido em contato com as regiões aquecidas ascende em função da redução da massa específica do PCM naquela região e conseqüente empuxo. Pela conservação da massa ocorre o movimento descendente de líquido resfriado em direção ao plano aquecido, estabelecendo um ciclo de troca térmica.

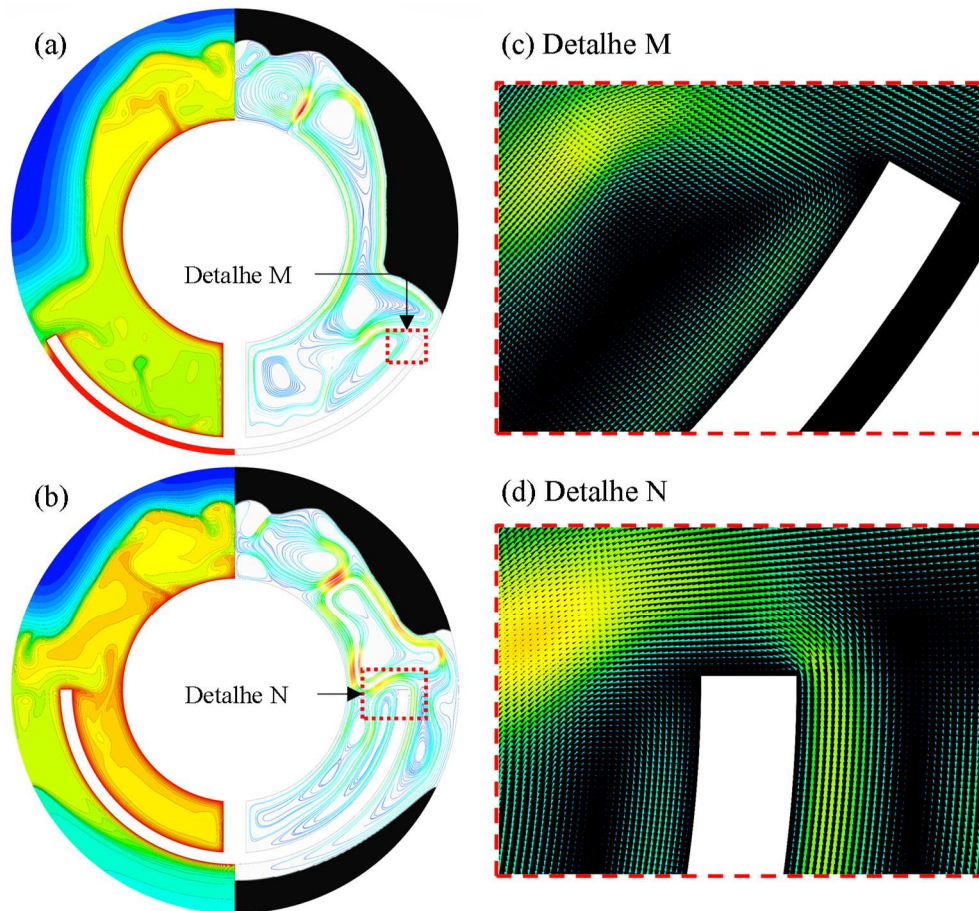


Figura 5.6 – Campos de T e linhas de corrente, com detalhes dos vetores de velocidade para ϕ 0.03 com: (a) $\theta = 60^\circ$, (b) $\theta = 90^\circ$, (c) Detalhe M e (d) Detalhe N.

A maior proximidade da aleta com a base do sistema da Fig. 5.6(a) promove a fusão do PCM abaixo dela, nos primeiros instantes do processo. O calor dissipado nos instantes que seguem sobreaquece o PCM líquido desta região e estagna a convecção natural, tal como pode ser observado no Detalhe M da Fig. 5.6(c).

O sistema da Fig. 5.6(b) promove a recirculação do líquido tanto na região superior quanto inferior da aleta. A região de cisalhamento entre escoamentos ascendente e descendente pode ser observada no Detalhe N da Fig. 5.6(d). Este sistema promove troca térmica intensa, enquanto houver material sólido na região acima das superfícies aquecidas, pois à medida que a interface sólido-líquido da região inferior se distancia da fonte de calor, aumenta a resistência térmica. Ambos os casos são disposições extremas dentro do conjunto de casos estudados. Uma disposição de aleta que concilie as melhores características é o que se busca para minimizar o tempo de fusão do PCM.

Algumas das configurações geométricas estudadas, apresentadas na Tab. 5.1 são mostradas nas Figs. 5.7(a, b). Nestas figuras, inicialmente pode-se observar as diferentes dimensões das aletas em função da variação de θ e ϕ . Estas figuras apresentam a interface sólido-líquido em $t = 1, 10, 20, 30, 40$ e 60 min, para $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ e 90° e $\phi = 0.02$ e 0.03 , respectivamente. Esta disposição permite avaliar as diferentes características do avanço da interface sólido-líquido para cada caso. Dado que a área da aleta (A_f) é constante, o acréscimo de θ diminui o comprimento da aleta (l_f). Com isso, ocorre o afastamento das ramificações radiais da aleta em relação à parede externa da seção anular.

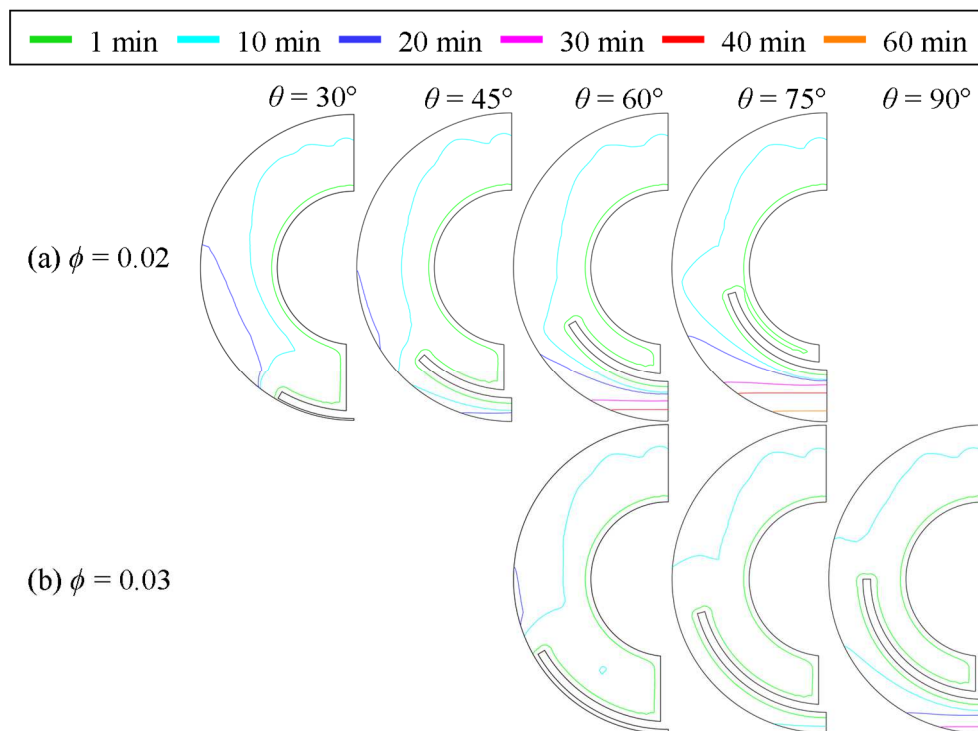


Figura 5.7 – Interface sólido-líquido para $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ e 90° : (a) $\phi = 0.02$ e (b) $\phi = 0.03$.

Ainda em relação as Figs. 5.7, para $t = 20$ min, pode-se observar que, os casos com valores intermediários de θ estão praticamente ou completamente fundidos neste momento. Para ambos os ϕ , casos com menores valores de θ apresentam regiões sólidas nas laterais da seção anelar em $t = 20$ min. Ao passo que os maiores valores de θ apresentam PCM sólido na região inferior da seção em instantes superiores a $t = 30$ min. A interface sólido-líquido após este instante é praticamente

horizontal, evidenciando a estratificação da temperatura e ausência de troca térmica por convecção na região abaixo das aletas.

As Figs. 5.8(a, b) apresentam a variação de β em função do número de Fourier ($Fo = \alpha t/L_c^2$), para valores de θ entre 30° e 90° , com $\phi = 0.02$ e 0.03 . Neste trabalho o comprimento característico foi definido como: $L_c = A_f^{1/2}$, sendo A_f , a área transversal da aleta. Na Fig. 5.8(a) nota-se que, para θ entre 30° e 37.5° , a variação de β segue a mesma declividade durante todo o processo de fusão, atingindo $\beta = 1$ de forma ordenada e decrescente. Para $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ e 75° a taxa de fusão se dá de forma similar até $Fo = 1$. A partir deste instante a declividade da variação de β muda, reduzindo a taxa de fusão até atingir $\beta = 1$ que ocorre de forma crescente em relação ao valor de θ .

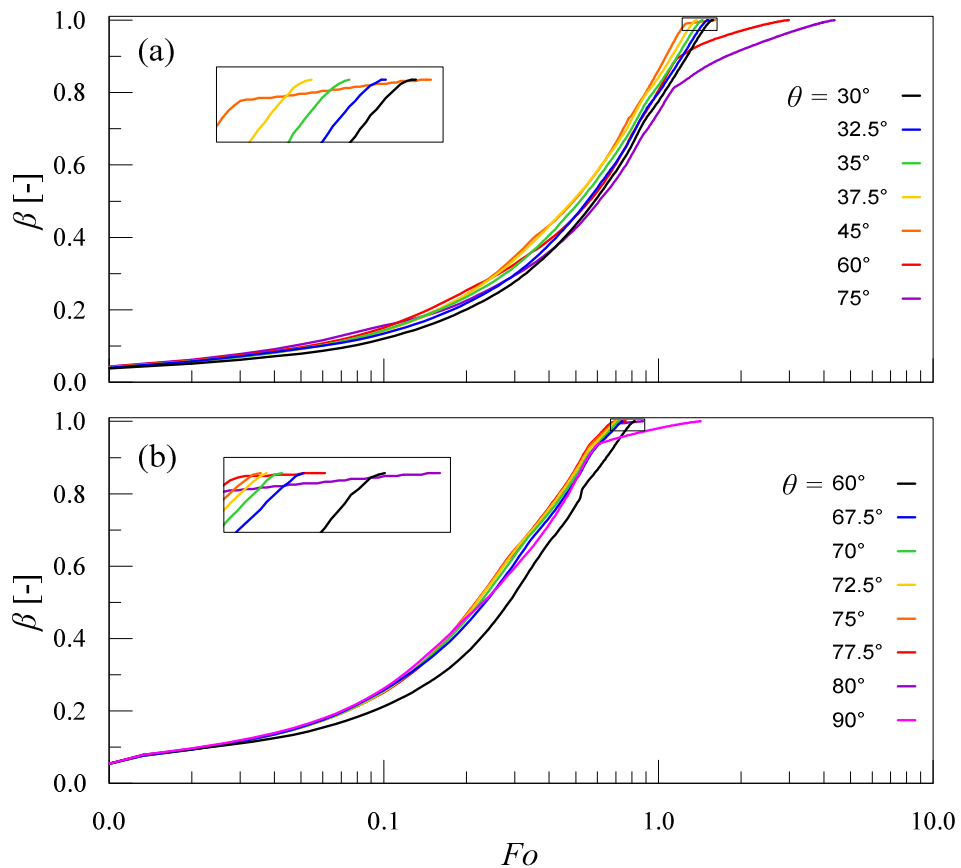


Figura 5.8 – Comportamento de β vs. Fo para ϕ : (a) 0.02 e (b) 0.03 com θ variando entre 30° e 90° .

Na Fig. 5.8(b) o comportamento de $\theta = 60^\circ$ destoa dos demais no início do processo, indicando uma taxa de fusão inferior aos demais casos. Para os casos com θ entre 67.5° e 75° a taxa de fusão progride de forma similar e decrescente até a conclusão do processo de fusão. Os casos com $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ e 75° apresentam taxa

de fusão semelhante aos demais até atingir $Fo = 0.6$, ocorre então uma diminuição da taxa de fusão que se estende até atingir $\beta = 1$. Para estes casos a fusão total é alcançada de forma crescente em relação ao valor de θ .

As mudanças repentinas na taxa de fusão observadas nas Figs. 5.8(a, b) são decorrentes da mudança dos mecanismos de troca de calor envolvidos no processo de fusão. Tal como observado na Fig. 5.7, casos com maior valor de θ tendem a ter dificuldade na fusão do PCM sólido localizado na região inferior da seção.

Nas Figuras. 5.9(a, b) são apresentados os comportamentos de Nusselt ($\overline{Nu} = \bar{h} \cdot L_c / k_l$) por Fo para $\phi = 0,02$ e $0,03$ e θ entre 30° e 90° . Com o coeficiente de transferência de calor médio \bar{h} sendo $[\bar{h} = q'' / (T_w - T_m)]$, onde q'' é o fluxo de calor total, $T_w = 80^\circ\text{C}$ a temperatura da parede ativa e $T_m = 44,22^\circ\text{C}$ a temperatura de fusão do PCM. Os resultados foram segmentados de acordo com os padrões de comportamento apresentados, os quais são indicados por I, II e III. Como observado Ji et al. (2018), estes padrões estão relacionadas com os mecanismos de troca de calor durante a fusão do PCM.

Nas Figs. 5.9(a, b) os padrões de comportamento dentro dos mesmos segmento são relacionáveis. Inicialmente os casos apresentam um pico de \overline{Nu} , decorrente contato direto entre o material sólido e a fonte de calor no princípio do processo de fusão. À medida que o PCM funde, a interface líquida formada entre o sólido e a fonte de calor aumenta. O acréscimo da camada líquida acarreta o aumento da resistência térmica por condução, entre a parede aquecida e o material fundindo, com decréscimo gradativo até o surgimento de um novo padrão de comportamento. A região II apresenta flutuações nos valores de \overline{Nu} que se intensificam ao longo de Fo . Estas flutuações são decorrentes do aumento da camada líquida e início de um processo convectivo intenso. Nesta região os menores valores de \overline{Nu} são relativos aos valores extremos de θ . Tal se deve ao fato destas aletas inibirem a circulação do PCM líquido entre as regiões aquecidas e resfriadas do sistema. Na região III, nota-se uma queda acentuada no valor de \overline{Nu} . Essa mudança no comportamento se deve ao fim dos processos difusivos ativos até então, ficando a transferência de calor restrita a um processo praticamente condutivo no líquido fundido e estacionário, até a conclusão do processo de fusão.

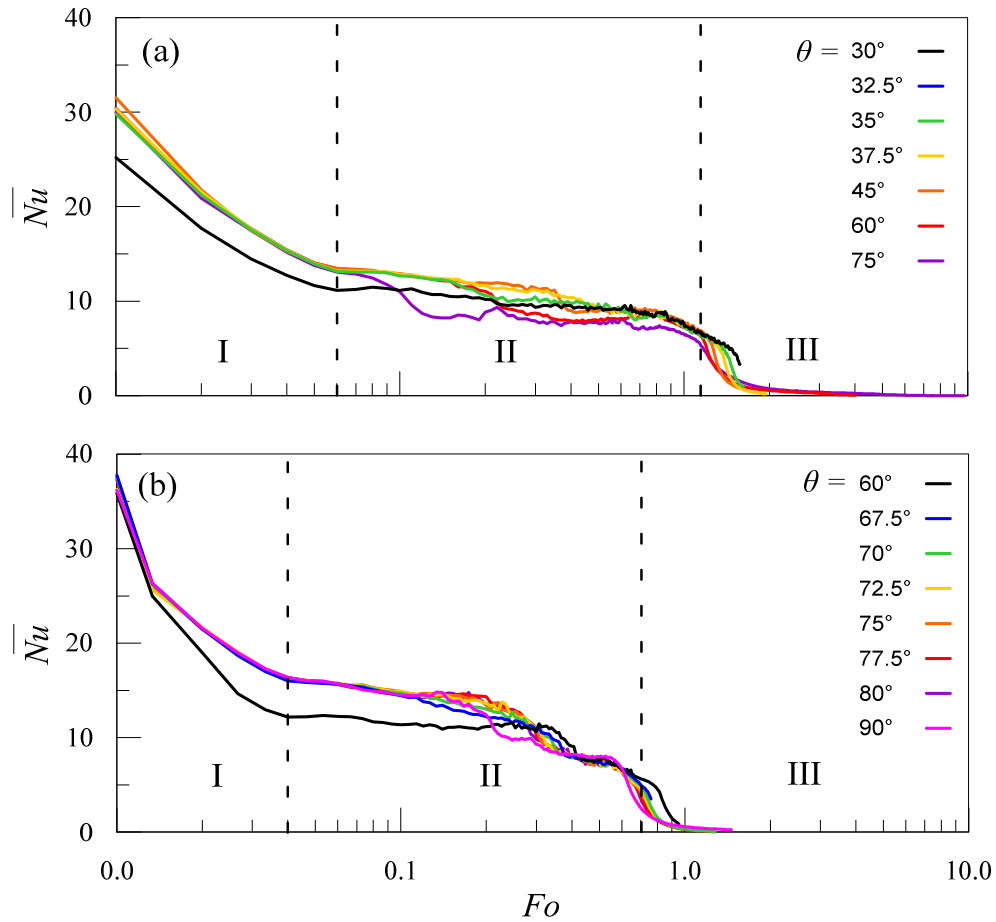


Figura 5.9 – Comportamento de \overline{Nu} por Fo para ϕ : (a) 0.02 e (b) 0.03 com θ variando entre 30° e 90° .

A figura 5.9(a) apresenta valor inicial aproximado de $\overline{Nu} = 30$, com exceção de $\theta = 30^\circ$, que apresenta $\overline{Nu} = 25$. Por sua vez os segmentos II e III iniciam em $Fo = 0,06$ e $1,1$ respectivamente. Os casos da figura 5.9(b) apresentam valor inicial de \overline{Nu} superior a 35. Os segmentos II e III iniciam em $Fo = 0,04$ e $0,7$ respectivamente.

As Figs. 5.10(a-c) a apresentam os campos de fração líquida (lado direito) e de temperatura (lado esquerdo), em $t = 600$ e 1050 s, para $\phi = 0.03$ e θ iguais a 60° , 75° e 90° , respectivamente. Com a finalidade de comparar o estado de fusão dos casos entre si, foram determinados um instante inicial (600 s) que permita observar os processos de troca de calor envolvidos no princípio do processo de fusão, bem como o instante final (1050 s), referente ao tempo total de fusão do caso mais rápido ($\theta = 75^\circ$). No centro das cavidades é indicado o valor de β . Observando os campos de temperatura em $t = 600$ s, fica evidente a sua maior homogeneidade na Fig. 5.10(b).

Para $\theta = 60^\circ$ (Fig. 5.10(a)), ocorre um sobreaquecimento desnecessário na região inferior da aleta nos primeiros instantes do processo de fusão. Já em $\theta = 90^\circ$ (Fig. 5.10(c)) observa-se a maior concentração do calor entre a aleta e a parede interna da seção anular. Em consequência destas distribuições de calor o valor de β é superior para o caso com $\theta = 75^\circ$.

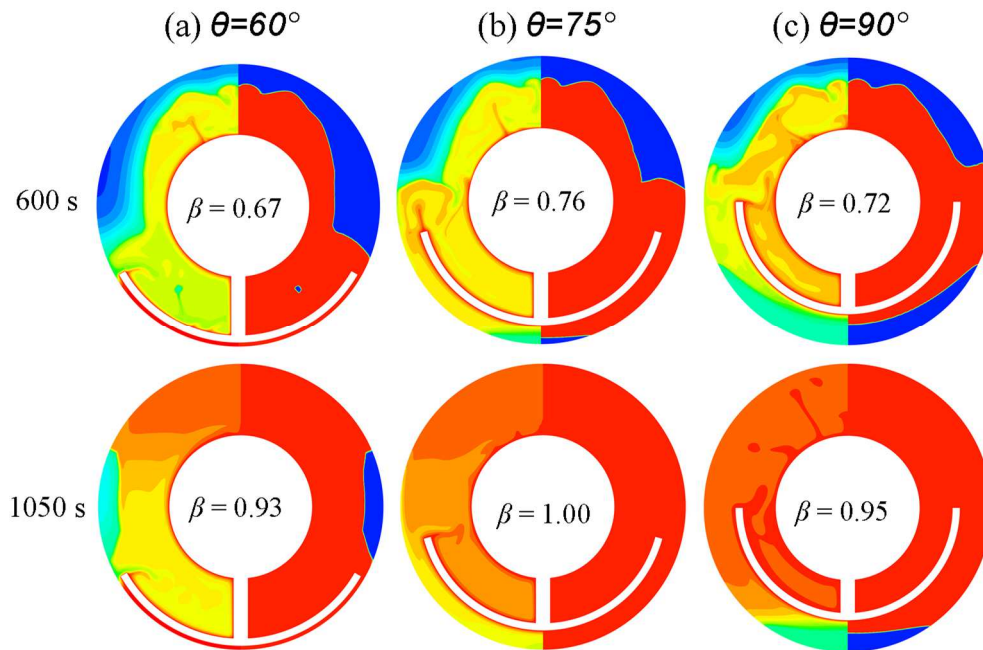


Figura 5.10 – Campos de β (esquerda) e T (direita), em $t = 600$ e 1050 s, para aletas com $\phi = 0.03$ e θ igual: (a) 60° , (b) 75° e (c) 90° .

Observando os casos no instante $t = 1050$ s, nota-se que a Fig. 5.10(b) apresenta $\beta = 1$, ao passo que as demais ainda não completaram a fusão. Para $\theta = 60^\circ$ o PCM sólido está localizado nas laterais da seção anular, enquanto para $\theta = 90^\circ$ fica concentrado na região abaixo da aleta.

Com o intuito de qualificar os diferentes sistemas analisados foram calculadas as efetividades destes (η_f) em relação ao sistema sem aletas. Neste trabalho esta efetividade foi definida como: $\eta_f = (\beta/\beta_0) - 1$, onde β_0 é a fração líquida de um caso sem aletas, em um mesmo instante de tempo. A Figura 5.11 mostra a variação de η_f em função de Fo para casos com $\phi = 0.02$ e θ entre 30° e 75° . Observa-se um pico inicial no valor de η_f seguido por um decréscimo gradativo até a conclusão do processo de fusão. Este pico é decorrente da maior área de contato entre superfície aquecida e o PCM nos instantes iniciais, quando a condução térmica é o principal

processo de troca térmica. Nesta figura pode-se observar também que, os casos concluem a fusão do PCM com η_f superior a 0,5, com exceção dos dois maiores valores de θ (60° e 75°). Isso demonstra a menor eficácia da disposição das aletas ramificadas quando estão em regiões próximas à parede interna da seção anular. Também pode-se observar que o maior valor de η_f registrado na conclusão do processo de fusão é relativo a $\theta = 37,5^\circ$. Embora $\theta = 45^\circ$ possua um valor elevado de η_f na maior parte do período, este valor decresce à medida que o processo de fusão se estende para concluir. O decréscimo de η_f é decorrente da maior resistência térmica ao final do processo de fusão do PCM na cavidade.

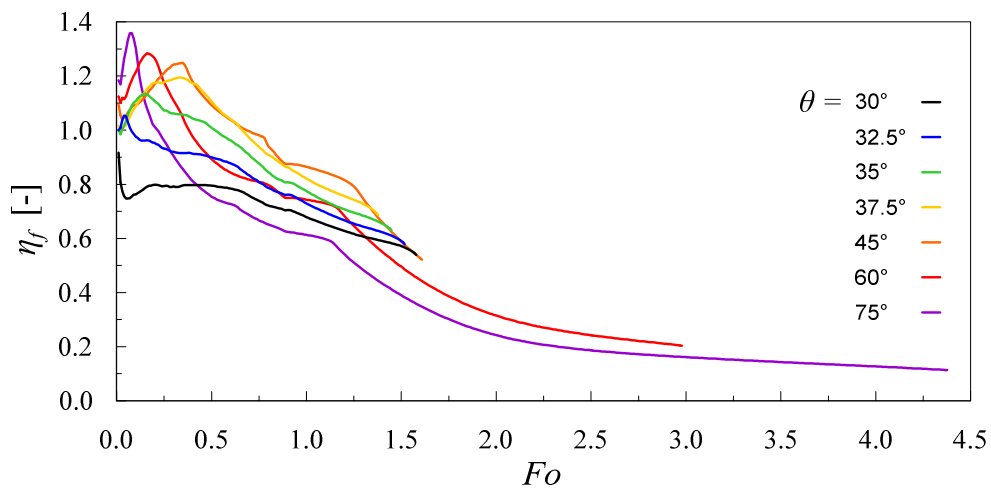


Figura 5.11 – Comportamento da efetividade da taxa de fusão em relação a um sistema sem aletas, por Fo , para $\phi = 0,02$ e θ entre 30° e 75° .

As Figs. 5.12(a-c) apresentam os campos de fração líquida (lado direito) e de temperatura (lado esquerdo), de três casos com mesmo valor de $\phi = 0,03$ e diferentes arranjos de aletas: disposição de aletas retas verticalmente (Fig. 5.12(a)), disposição de aletas retas horizontalmente (Fig. 5.12(b)) e aleta ramificada com $\theta = 75^\circ$ (Fig. 5.12(c)). No centro de cada caso está registrado o valor de β para o dado instante.

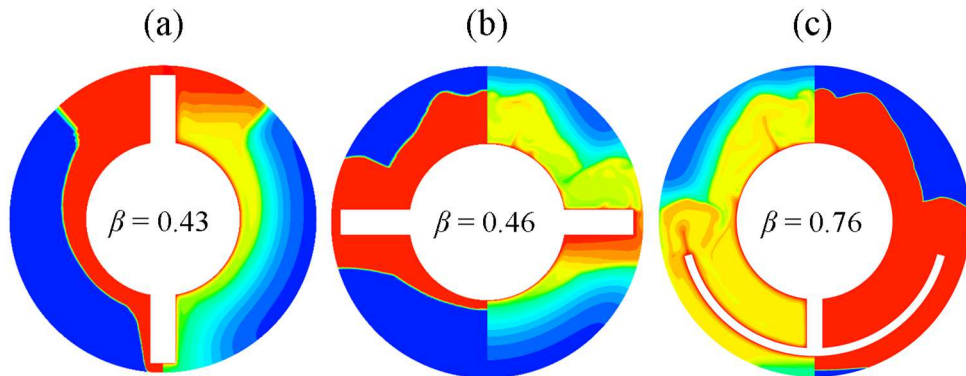


Figura 5.12 – Campos de β (esquerda) e T (direita), em $t = 600$, para casos com $\phi = 0.03$ e: (a) aletas retas verticais, (b) aletas retas horizontais e (c) aleta ramificada com $\theta = 75^\circ$.

Observando as Figs. 5.12(a-c) nota-se que a disposição vertical de aletas retas funde o material na base do sistema, mas a falta de superfícies horizontais ativas torna o conjunto pouco dinâmico no início do processo. Por sua vez, a disposição horizontal das aletas promove grande difusividade térmica na região superior do conjunto, contudo, apresenta maior dificuldade em fundir o PCM sólido localizado abaixo do das superfícies ativas. A aleta ramificada concilia a proximidade com a região inferior da seção com a presença de superfícies horizontais abaixo do PCM sólido. Com isto, observa-se a maior fração líquida desta dentre os demais casos.

A fim de qualificar a proposta de aletas ramificadas em relação a sistemas com aletas retas, também foram calculadas as efetividades destes ($\eta_f = (\beta/\beta_r) - 1$), onde β_r é a fração líquida de um caso com aletas retas de mesmo valor de ϕ , em um mesmo instante de tempo. A Figura 5.13 apresenta a variação de η_f em função de Fo para casos com $\phi = 0.02$ e θ entre 30° e 75° . São apresentadas as efetividades em relação a sistemas com aletas verticais (linha contínua) e aletas horizontais (linha pontilhada). Nesta figura pode-se observar que os valores de η_f em relação a aletas horizontais são inicialmente menores do que em relação a aletas verticais. Isso se deve a grande difusividade promovida por superfícies horizontais aquecidas, enquanto há PCM sólido acima destas. A medida que o PCM sólido fica restrito a região inferior das aletas horizontais ($Fo = 1,0$) ocorre um acréscimo no valor de η_f até a conclusão da fusão. Por sua vez os valores de η_f relativos a aletas verticais se mantém elevados durante a maior parte do processo de fusão, apresentando um pequeno decréscimo no final. Embora ocorram as flutuações de η_f relatadas até

então, os casos apresentam efetividade positiva em relação aos sistemas com aletas retas, com exceção de $\theta = 60^\circ$ e 75° . Nestes dois casos fica evidente a o decréscimo de η_f abaixo de 0, o que indica uma taxa de fusão inferior a um sistema com aletas retas verticais.

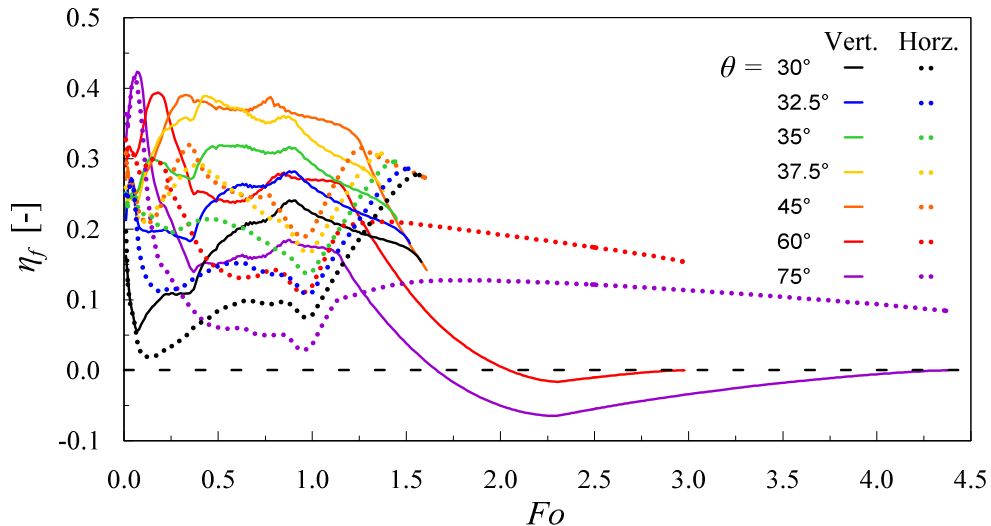


Figura 5.13 – Comportamento da efetividade da taxa de fusão em relação a um sistema com aletas retas verticais e horizontais, por Fo , para $\phi = 0.02$ e θ entre 30° e 75° .

A Figura 5.14 sumariza os tempos de fusão total (t_m) de todos os casos estudados em função de θ , para $\phi = 0.02$ e 0.03 . Pode-se observar que ambos os casos apresentam comportamento similar, registrado um decréscimo de t_m com o aumento de θ , até atingir um valor mínimo. A partir deste ponto ocorre o acréscimo de t_m com o aumento de θ . Para $\phi = 0.02$ o valor mínimo registrado é de $t_{m,min} = 1380$ s para $\theta = 37,5^\circ$. Para $\phi = 0.03$, $t_{m,min} = 1050$ s para $\theta = 75^\circ$. Em decorrência do tempo computacional envolvido para a simulação de cada caso, o passo mínimo de busca de $t_{m,min}$ foi de $2,5^\circ$.

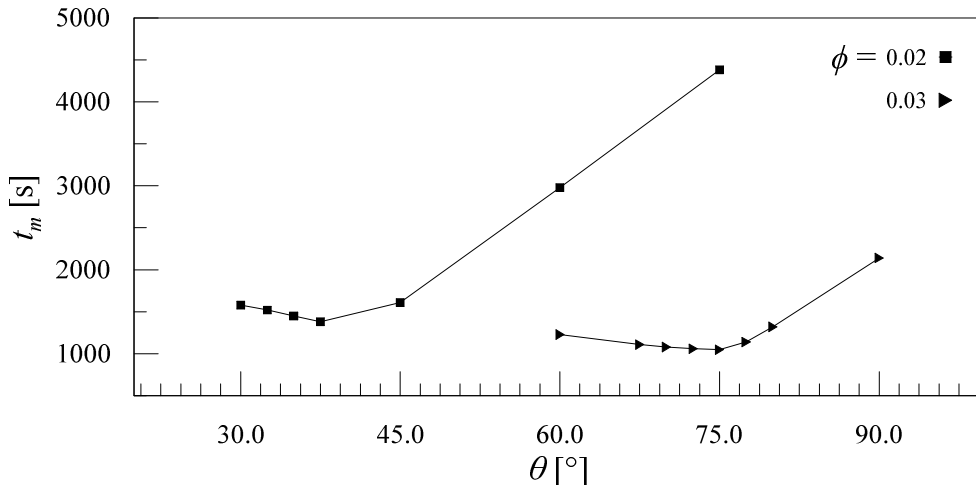


Figura 5.14 – Variação de t_m em função de θ para $\phi = 0,02$ e $0,03$.

5.5 Conclusões

O objetivo deste trabalho era avaliar o comportamento do processo de fusão do PCM Ácido Láurico através do Design Construtal a fim de minimizar o tempo total de fusão, em cavidades anulares aletadas longitudinalmente, sendo que a aleta, posicionada na parte inferior da cavidade, possui ramificações radiais. O estudo foi direcionado empregando a fluidodinâmica computacional. A validação do modelo numérico foi realizada com resultados numéricos e experimentais fornecidos pela literatura. A análise de malha foi realizada através do método GCI, o qual resultou em um valor médio de 2.71%. A definição das diferentes dimensões de aletas foi com base no Design Construtal. Os principais resultados foram:

- os valores mínimos de t_m foram registrados para $\phi = 0,02$ com $\theta = 37,5^\circ$ e $\phi = 0,02$ com $\theta = 37,5^\circ$, considerando a precisão do passo de busca de $2,5^\circ$;
- a média da efetividade sobre a taxa de fusão atingiu valores de até 95% em relação a um sistema sem aletas e de até 33% em relação a sistemas com aletas verticais;
- o posicionamento das ramificações radiais próximo à parede interna ou externa da seção anular inibe a circulação de líquido promovida pela convecção natural e aumenta o valor de t_m .

O estudo do comportamento de aleta não ideal e o emprego de diferentes metais nesta solução geométrica de aleta são as sugestões de continuidade deste trabalho.

6 RESUMO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Esta dissertação foi apresentada na forma de 4 artigos compreendidos do Capítulo 2 ao 5. Os principais resultados e considerações acerca de cada artigo compõe este último Capítulo.

O Capítulo 2 introduziu a abordagem do caso e validação do modelo numérico, possibilitando uma análise inicial de que que aletas com superfícies horizontais promovem maior taxa de fusão enquanto há PCM sólido acima delas. Também se concluiu que casos com aletas mais próximas da região inferior do armazenador térmico concluíam o processo de fusão antes das demais.

O Capítulo 3 introduziu a abordagem do método do Design Construtal associado ao estudo realizado até então. Os resultados indicaram o decréscimo de t_m com o aumento da razão de aspecto, para diferentes disposições de aleta e valores de ϕ .

O Capítulo 4 englobou os 5 valores de ϕ estudados detalhando os mecanismos envolvidos no processo de fusão do PCM em diferentes casos e instantes. Com isso foram analisados os valores de fração líquida e associados os padrões de comportamento com as alterações geométricas. Também foi realizada uma análise de efetividade da taxa de fusão (η_f) das diferentes geometrias estudadas. O aumento das razões de aspecto (RA), de todos os casos, causou o decréscimo de t_m . Por sua vez o aumento de ϕ resultou no decréscimo praticamente linear de t_m .

O Capítulo 5 abordou uma nova solução geométrica com base nos padrões de comportamento observados nos estudos anteriores. Foram analisados os padrões de comportamento em função das alterações geométricas e dos mecanismos de troca térmica envolvidos ao longo do processo. Também foi realizada uma análise de efetividade da taxa de fusão (η_f), as quais indicaram valores de até 95% em relação a um sistema sem aletas e de até 33% em relação a sistemas com aletas verticais. Os valores mínimos de t_m foram registrados para $\phi = 0.02$ com $\theta = 37,5^\circ$ e $\phi = 0.02$ com $\theta = 37,5^\circ$, considerando a precisão do passo de busca de $2,5^\circ$.

A análise das soluções geométricas abordadas empregando, aletas não ideais, outros materiais de mudança de fase, com temperatura de fusão superior e o desenvolvimento de um modelo experimental são algumas sugestões de continuidade deste estudo.

REFERÊNCIAS

ABDULATEEF, A. M. et al. Experimental and computational study of melting phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins. **Solar Energy**, v. 155, p. 142–153, 2017.

ABDULATEEF, A. M. et al. Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. June 2017, p. 1620–1635, 2018.

AGYENIM, F. et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 2, p. 615–628, fev. 2010.

AGYENIM, F.; EAMES, P.; SMYTH, M. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. **Solar Energy**, v. 83, n. 9, p. 1509–1520, 2009.

AL-ABIDI, A. A. et al. Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 61, p. 684–695, jun. 2013.

ALMSATER, S. et al. Development and experimental validation of a CFD model for PCM in a vertical triplex tube heat exchanger. **Applied Thermal Engineering journal**, v. 116, p. 344–354, 2017.

ALOMAIR, M. et al. Analyses of Bio-Based Nano-PCM filled Concentric Cylindrical Energy Storage System in Vertical Orientation. **Journal of Energy Storage**, v. 20, n. February, p. 380–394, 2018.

ALVA, G.; LIN, Y.; FANG, G. An overview of thermal energy storage systems. **Energy**, v. 144, p. 341–378, 2018.

BEEREPOOT, M. et al. Technology roadmap solar heating and cooling. **International Energy Agency (IEA): Paris, France**, 2012.

BEJAN, A.; LORENTE, S. Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. **Journal of Applied Physics**, v. 113, n. 15, 2013.

CELIK, I. B. et al. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.

DARZI, A. R.; FARHADI, M.; SEDIGHI, K. Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36,

n. 9, p. 4080–4086, 2012.

DENG, S. et al. Improving the melting performance of a horizontal shell-tube latent-heat thermal energy storage unit using local enhanced finned tube. **Energy and Buildings**, v. 183, p. 161–173, 2019.

EGOLF, P.; MANZ, H. Theory and modeling of phase change materials with and without mushy regions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 37, n. 18, p. 2917–2924, 1994.

FENG, H.; CHEN, L.; XIA, S. Constructal design for disc-shaped heat exchanger with maximum thermal efficiency. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 130, p. 740–746, 2019.

FLEMING, E. et al. International Journal of Heat and Mass Transfer Experimental and theoretical analysis of an aluminum foam enhanced phase change thermal storage unit. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 82, p. 273–281, 2015.

FORNARELLI, F. et al. Heat enhancement induced by the geometry of a LHTEs device. **Energy Procedia**, v. 148, n. Ati, p. 471–478, 2018.

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

JASIM M. MAHDI et al. Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 124, p. 663–676, 2018.

Jl, C. et al. Simulation on PCM melting enhancement with double-fin length arrangements in a rectangular enclosure induced by natural convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 127, p. 255–265, 2018.

KALAPALA, L.; DEVANURI, J. K. Influence of operational and design parameters on the performance of a PCM based heat exchanger for thermal energy storage – A review. **Journal of Energy Storage**, v. 20, n. September, p. 497–519, 2018.

KALBASI, R.; SALIMPOUR, M. R. Constructal design of horizontal fins to improve the performance of phase change material rectangular enclosures. **Applied Thermal Engineering**, v. 91, p. 234–244, 2015.

KAMKARI, B.; SHOKOUHMAND, H. 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.

LIAO, Z. et al. A novel effective thermal conductivity correlation of the PCM melting in spherical PCM encapsulation for the packed bed TES system. **Applied Thermal Engineering**, v. 135, n. February, p. 116–122, 2018.

LORENTE, S.; BEJAN, A.; NIU, J. L. International Journal of Heat and Mass Transfer Constructal design of latent thermal energy storage with vertical spiral heaters. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 81, p. 283–288, 2015.

MADESSA, H. B. A review of the performance of buildings integrated with Phase change material: Opportunities for application in cold climate. **Energy Procedia**, v. 62, n. 1876, p. 318–328, 2014.

MAHDI, J. M. et al. Simultaneous energy storage and recovery in the triplex-tube heat exchanger with PCM, copper fins and Al₂O₃ nanoparticles. **Energy Conversion and Management**, v. 180, n. May 2018, p. 949–961, 2019.

MAHDI, J. M.; NSOFOR, E. C. Melting enhancement in triplex-tube latent thermal energy storage system using nanoparticles-fins combination. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 109, v. 109, p. 417–427, 2017.

MAHDI, J. M.; NSOFOR, E. C. Solidification enhancement of PCM in a triplex-tube thermal energy storage system with nanoparticles and fins. **Applied Energy**, v. 211, n. May 2017, p. 975–986, 2018.

MAT, S. et al. Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal – external fins. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 223–236, 2013.

NAZIR, H. et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications : A review. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 129, p. 491–523, 2019.

PAHAMLI, Y. et al. Analysis of the effect of eccentricity and operational parameters in PCM-filled single-pass shell and tube heat exchangers. **Renewable Energy**, v. 97, p. 344–357, 2016.

PAHAMLI, Y. et al. Inner pipe downward movement effect on melting of PCM in a double pipe heat exchanger. **Applied Mathematics and Computation**, v. 316, p. 30–42, 2018.

PARSAZADEH, M.; DUAN, X. Numerical study on the effects of fins and nanoparticles in a shell and tube phase change thermal energy storage unit. **Applied Energy**, v. 216, n. August 2017, p. 142–156, 2018.

PEIRÓ, G. et al. Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple PCMs (cascaded) vs . single PCM configuration for thermal energy storage. **Renewable**

Energy, v. 83, p. 729–736, 2015.

PINA, E. A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M. Thermoeconomic cost allocation in simple trigeneration systems including thermal energy storage. **Energy**, v. 153, p. 170–184, 2018.

POLAT, S.; SAYAN, P. Kinetic analysis and polymorphic phase transformation of glycine in the presence of lauric acid. **Journal of Crystal Growth**, v. 481, p. 71–79, 2018.

RABIENATAJ DARZI, A. A.; JOURABIAN, M.; FARHADI, M. Melting and solidification of PCM enhanced by radial conductive fins and nanoparticles in cylindrical annulus. **Energy Conversion and Management**, v. 118, p. 253–263, 2016.

RATHOD, M. K.; BANERJEE, J. Thermal performance enhancement of shell and tube Latent Heat Storage Unit using longitudinal fins. **Applied Thermal Engineering**, v. 75, p. 1084–1092, jan. 2015.

RAZERA, A. L. et al. International Journal of Heat and Mass Transfer Constructal design of a semi-elliptical fin inserted in a lid-driven square cavity with mixed convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 126, p. 81–94, 2018.

REN, Q.; CHAN, C. L. GPU accelerated numerical study of PCM melting process in an enclosure with internal fins using lattice Boltzmann method. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 100, p. 522–535, 2016.

SARI, A.; KAYGUSUZ, K. Thermal and heat transfer characteristics in a latent heat storage system using lauric acid. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 18, p. 2493–2507, 2002.

SCHREIBER, H.; LANZERATH, F.; BARDOW, A. Predicting performance of adsorption thermal energy storage : From experiments to validated dynamic models. **Applied Thermal Engineering**, v. 141, n. April, p. 548–557, 2018.

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.

SEDDEGH, S. et al. Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 517–533, 2015.

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.

VOLLER, V. 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, P. et al. Numerical investigation of PCM melting process in sleeve tube with internal fins. **Energy Conversion and Management**, v. 110, p. 428–435, 2016.

YOO, D.; JOSHI, Y. K. Energy Efficient Thermal Management of Electronic Components Using Solid – Liquid. **IEEE Transactions On Device And Materials Reliability**, v. 4, n. 4, p. 641–649, 2004.

YUAN, Y. et al. 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.

ZIAEI, S.; LORENTE, S.; BEJAN, A. Constructal design for convection melting of a phase change body. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 99, p. 762–769, 2016.

ZONDAG, H. A. et al. Performance analysis of industrial PCM heat storage lab prototype. v. 18, n. May, p. 402–413, 2018.