

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

**FÁBIO BECKER**

***DESIGN CONSTRUTAL DE UMA ALETA EM CAVIDADE RETANGULAR***  
**CONTENDO PCM**

**São Leopoldo**

**2019**

FÁBIO BECKER

***DESIGN CONSTRUTAL DE UMA ALETA EM CAVIDADE RETANGULAR***  
**CONTENDO PCM**

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

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rejane De Césaró Oliveski

Coorientador: Prof<sup>º</sup>. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Banca Examinadora:

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup> Flávia Schwarz Franceschini Zinani - UNISINOS

Prof<sup>ª</sup>.Dr<sup>ª</sup> Letícia Jenisch Rodrigues - UFRGS

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander - UNISINOS

São Leopoldo

2019

B395d      Becker, Fábio.  
Design construtal de uma atleta em cada cavidade retangular  
contendo PCM / Fábio Becker. – 2019.  
104 f. : il. ; 30 cm.

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

“Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rejane De Césaró Oliveski  
Coorientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha.”

1. Materiais de mudança de fase (PCM). 2. Simulação  
numérica. 3. Design construtal. 4. Razão de aspecto. I. Título.

CDU 621

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

## **AGRADECIMENTOS**

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

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rejane De Césaró Oliveski, pelas constantes orientações prestadas durante a realização do mestrado, bem como para realização deste trabalho.

À banca avaliadora, pelos conselhos prestados na avaliação.

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

Aos colegas de iniciação científica, pelo apoio prestado na realização deste trabalho.

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

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

## RESUMO

A utilização de energia térmica é uma forma eficiente de armazenamento de energia e pode ser aplicada em várias áreas, tais como indústria automotiva, de construção civil, plantas de energia solar e em componentes eletrônicos. Das possíveis formas de armazenamento térmico, o calor latente é o mais atrativo, por apresentar alta capacidade de armazenamento de energia em temperatura constante. Muitos estudos concentram-se na utilização de materiais de mudança de fase (PCM - *Phase Change Material*) como forma de armazenamento de energia. Porém, devido a sua baixa condutividade térmica, faz-se necessária a implementação de técnicas de aprimoramento da transferência de calor. Dentre as possíveis técnicas existentes, a utilização de aletas é a mais difundida. Assim, torna-se importante a análise da melhor dimensão das mesmas, para que o processo na qual estão inseridas, possa ser otimizado. Este trabalho tem como objetivo a verificação da influência da razão de aspecto de uma aleta em uma cavidade retangular, contendo PCM ácido láurico, em processo de fusão. Os resultados foram obtidos através de simulação numérica por CFD, utilizando-se o método dos volumes finitos. O modelo matemático é baseado nas equações da conservação da massa, quantidade de movimento e conservação da energia, sendo o processo de mudança de fase baseado no modelo entalpia-porosidade. O modelo matemático foi validado com resultados experimentais da literatura e as malhas computacionais foram verificadas pelo método *GCI*. Foram simuladas 09 razões de aspecto da aleta e 09 frações entre área da cavidade e área da aleta, totalizando 78 configurações. Com estes resultados foi aplicado o método *Design Construtal* para determinar a razão de aspecto ótima para cada fração de área, a qual minimiza o tempo total do processo de fusão do PCM. Em todas as frações de área analisadas, constatou-se que, quanto maior a razão de aspecto da aleta, maior foi o tempo total do processo de fusão. Já para um mesmo valor de razão de aspecto constatou-se que quanto maior a fração de área, menor foi o tempo total do processo.

Palavras-chave: Materiais de mudança de fase (PCM). Simulação numérica. *Design Construtal*. Razão de aspecto.

## ABSTRACT

The use of thermal energy is an efficient form of energy storage and can be applied in various areas such as automotive industry, building industry, solar power plants and electronic components. Of the possible forms of thermal storage, latent heat is the most attractive, because it presents high energy storage capacity at constant temperature. Many studies focus on the use of Phase Change Material (PCM) as a form of energy storage. However, due to its low thermal conductivity, it is necessary to implement techniques of heat transfer enhancement. Among the possible existing techniques, the use of fins is the most widespread. Thus, it is important to analyze the best dimension of them, so that the process in which they are inserted, can be optimized. This work aims to verify the influence of the aspect ratio of a fin in a rectangular cavity, containing PCM lauric acid, in the process of melting. The results were obtained through numerical CFD simulation, using the finite volume method. The mathematical model is based on the equations of mass conservation, amount of movement and conservation of energy, being the phase change process based on the enthalpy-porosity model. The mathematical model was validated with experimental results from the literature and the computational meshes were verified by the GCI method. We simulated 09 fin aspect ratios and 09 fractions between cavity area and fin area, totalizing 78 configurations. With these results the Construtal Design method was applied to determine the optimum aspect ratio for each area fraction, which minimizes the total time of the PCM fusion process. In all the fractions of area analyzed, it was found that the larger the aspect ratio of the fin, the longer the total time of the fusion process. For the same value of aspect ratio, it was found that the larger the fraction of area, the smaller the total time of the process.

Key-words: Phase Change Materials (PCM). Numerical simulation. Design Construtal. Aspect Ratio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Métodos de armazenamento de energia térmica.....	19
Figura 2.2 - Classificação de PCM.....	20
Figura 2.3 - Exemplo de processo de fusão em cavidade retangular .....	25
Figura 2.4 - Exemplo de processo de fusão em cavidade cilíndrica.....	26
Figura 2.5 - Exemplo de fusão em cavidade esférica.....	26
Figura 2.6 - Cavidades com aletas verticais .....	27
Figura 2.7 – Vista frontal da cavidade com aletas internas horizontais .....	28
Figura 2.8 - Aletas longitudinais .....	29
Figura 3.1 - Árvore de fluxo.....	31
Figura 3.2 - Inserção de material de alta condutividade.....	32
Figura 3.3 - Árvore de fluxo.....	32
Figura 3.4 – Sistema de armazenamento com ramificações internas .....	33
Figura 3.5 - Fluxograma com aplicação do <i>Design Construtal</i> .....	34
Figura 4.1 - Desenho esquemático do problema .....	35
Figura 4.2 - Fluxograma com aplicação do Design Construtal para o presente estudo .....	37
Figura 5.1 - Malhas computacionais: (a) 10118, (b) 14520 e (c) 28457 .....	43
Figura 5.2 - Campos de $\beta$ para $t = 10$ e $30$ min: (a) experimental de KAMKARI e SHOKOUHMAND (2014), (b) este estudo, (c) experimental de KAMKARI e SHOKOUHMAND (2014) e (d) este estudo.....	43
Figura 5.3 - $\beta$ pelo tempo: experimental de KAMKARI <i>et al.</i> (2014) e este estudo.....	44
Figura 5.4 - $\beta$ pelo tempo: experimental de KAMKARI <i>et al.</i> (2014),.....	45
Figura 5.5 - Campos de $\beta$ para $t = 10, 30, 50, 70, 90$ e $110$ min para: .....	46
Figura 5.6 - $\beta$ x tempo para diferentes $RA_f$ : .....	47
Figura 5.7 - Tempo de fusão total para as diferentes $RA_f$ .....	47
Figura 5.8 - $\beta$ x tempo para diferentes $RA_f$ para: .....	49
Figura 5.9 - Tempo de fusão total para as diferentes $RA_f$ .....	49
Figura 5.10 - Campos de $\beta$ , para $\phi = 0,005$ , em $t = 1, 10, 30, 50, 70$ e $90$ min para: .....	51
Figura 5.11 - Campos de $\beta$ em $t = 10, 50$ e $90$ min, para $W_f = 20$ e $48$ mm, para: .....	52
Figura 5.12 - Campos de temperatura em $t = 1, 10$ e $50$ min, de $\phi = 0,03$ , para: .....	53
Figura 5.13 - Campos de velocidade em $t = 30$ min, para $\phi = 0,01$ : .....	55
Figura 5.14 - Fração de líquido ( $\beta$ ) x tempo, para diferentes $RA_f$ : .....	56
Figura 5.15 - Tempo máximo de fusão de cada aleta, para diferentes $RA_f$ , de diferentes $\phi$ .....	57

Figura 5.16 - Energia absorvida, para as $RA_{opt}$ , de diferentes $\phi$ .....	58
Figura 5.17 - Energia absorvida, para mesma $RA_f$ , de diferentes $\phi$ .....	58
Figura 5.18 - Número de $Nu$ em função do número de $Fo$ , de diferentes $RA_f$ , para: .....	60



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Propriedades termofísicas do ácido láurico.....	36
Tabela 4.2 - Condutividade térmica do ácido láurico.....	36
Tabela 4.3 - Viscosidade dinâmica do ácido láurico.....	36
Tabela 4.4 - Dimensões da aleta.....	38
Tabela 5.1 - $RA_{opt}$ de diferentes $\phi$ .....	57

## LISTA DE SIGLAS

<i>DTC</i>	Design com Teoria Construtiva
<i>EES</i> <sup>®</sup>	Engineering Equation Solver
<i>GCI</i>	Grid Convergence Method
<i>MDF</i>	Método das diferenças finitas
<i>MEF</i>	Método de elementos finitos
<i>MVF</i>	Método de volumes finitos
<i>PCM</i>	Material de mudança de fase (Phase Change Material)
<i>PISO</i>	Pressure Implicit with Splitting of Operators
<i>PRESTO</i>	Pressure Staggering Option
<i>SIMPLE</i>	Semi Implicit Linked Equations
<i>SIMPLEC</i>	Simple-consistent

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área da cavidade	[m <sup>2</sup> ]
$C$	constante da zona porosa	[kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$c_p$	calor específico	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$E$	comprimento do fluxo externo	[mm]
$Fo$	número de Fourier	[-]
$\bar{g}$	aceleração da gravidade	[9,81 m s <sup>-1</sup> ]
$H$	altura da cavidade	[mm]
$h$	coeficiente de transferência de calor	[W m <sup>-2</sup> K]
$k$	condutividade térmica	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$I$	comprimento do fluxo interno	[mm]
$L$	calor latente de fusão	[J kg <sup>-1</sup> ]
$L_c$	comprimento característico	[mm]
$Nu$	número de Nusselt	[-]
$p$	pressão	[Pa]
$Q$	fluxo de calor	[W m <sup>-2</sup> ]
$q''$	geração de calor	[W]
$RA$	razão de aspecto	[-]
$S$	termo fonte da equação da quantidade de movimento	[Pa m <sup>-1</sup> ]
$Sv$	Svelteness	[-]
$T$	temperatura	[K]
$t$	tempo	[s]
$\vec{V}$	vetor velocidade	[m s <sup>-1</sup> ]
$W$	largura da cavidade	[mm]

### *Símbolos gregos*

$\beta$	fração de líquido	[-]
$\varepsilon$	constante computacional	[0,001]
$\lambda$	entalpia específica	[J kg <sup>-1</sup> ]
$\mu$	viscosidade dinâmica	[kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	massa específica	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\phi$	fração de área	[-]

*Sub-índices*

<i>a</i>	aquecimento
<i>f</i>	aleta
<i>i</i>	inicial
<i>L</i>	mudança de fase
<i>l</i>	líquido
<i>m</i>	fusão
<i>opt</i>	ótima
<i>o</i>	material
<i>p</i>	caminho
<i>ref</i>	referência
<i>s</i>	sólido
<i>se</i>	sensível
<i>w</i>	parede

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>15</b>
1.1.1 Objetivo Geral .....	15
1.1.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Estrutura da pesquisa .....</b>	<b>16</b>
<b>2 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Armazenamento de energia térmica .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Classificação dos PCM.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Aplicações de PCM.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Características dos PCM .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5 Processo de fusão .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6 Aprimoramento da transferência de calor .....</b>	<b>26</b>
<b>3 LEI CONSTRUTAL .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Aplicação da Lei Construtal .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Design Construtal .....</b>	<b>34</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Modelo matemático .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Condições de contorno .....</b>	<b>39</b>
<b>4.3 Condições iniciais.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4 Abordagem Numérica .....</b>	<b>40</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>5.1 Validação numérica .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Análise da constante <math>C</math> .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3 Artigo I – Estudo numérico para obtenção da razão de aspecto ótima de uma aleta no processo de fusão de material de mudança de fase (PCM).....</b>	<b>45</b>
5.3.1 Estudo de Caso .....	45
5.3.2 Conclusões.....	48
<b>5.4 Artigo II – Estudo numérico para otimização do processo de fusão de material de mudança de fase (PCM) através da variação da razão de aspecto ótima de uma aleta...48</b>	<b>48</b>
5.4.1 Resultados e discussões .....	48
5.4.2 Conclusões.....	49

<b>5.5 Artigo III – Design Construtal para aletas no processo de fusão de material de mudança de fase (PCM) em cavidades retangulares.....</b>	<b>50</b>
5.5.1 Resultados e discussões .....	50
5.5.2 Conclusões.....	61
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>63</b>
<b>APÊNDICE A – ARTIGO I – SUBMETIDO AO 8ºMCSUL .....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE B – ARTIGO II – SUBMETIDO AO <i>CONSTRUCTAL LAW &amp; SECOND LAW CONFERENCE 2019</i> .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE C – ARTIGO III – A SER SUBMETIDO PARA PERIÓDICO INTERNACIONAL.....</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O tema energia é um assunto de grande relevância devido ao seu crescente consumo, aliado aos possíveis impactos ambientais, ou então devido à necessidade de utilização de fontes de energias renováveis (REDDY *et al.*, 2018). Assim, é importante que se realize o armazenamento de tais energias, para que possam ser utilizadas quando necessário (ZHANG *et al.*, 2016 e FARID *et al.*, 2004). Um dos meios mais eficientes de armazenamento de energia dá-se através da energia térmica (HASNAIN *et al.*, 1998, DABIRI *et al.*, 2018 e ZHU *et al.*, 2009), seja através de calor sensível, latente ou termoquímico (ZHANG *et al.*, 2016).

Das possíveis formas de armazenamento térmico, o calor latente torna-se mais atrativo, pela sua alta capacidade de armazenamento de energia (KAMKARI e SHOKOUHMAND, 2014), e por possuir a capacidade de fornecer elevada densidade de armazenamento de energia em temperatura constante, ou seja, na temperatura de transição dos materiais (HASNAIN *et al.*, 1998). Os materiais que são utilizados nesta forma de armazenamento de energia, baseados no calor latente, são denominados de *Phase Change Material* (PCM – Materiais de Mudança de Fase) (IBRAHIM *et al.*, 2017), classificados de acordo com sua composição química em orgânicos, inorgânicos e eutéticos (AGYENIM *et al.*, 2010). Como vantagens, os PCM apresentam pouca variação volumétrica durante a mudança de fase, elevado calor específico e calor latente de fusão (BABY e BALAJI, 2012), além de estabilidade térmica (JAGUEMONT *et al.*, 2018). Entretanto, apresentam baixa condutividade térmica, o que resulta em baixas taxas de carga e descarga (AKEIBER *et al.*, 2016 e AGYENIM *et al.*, 2010).

PCM podem ser utilizados em várias áreas, tais como: biomedicina, indústrias têxtil, automotiva e de construção civil (PIELICHOWSKA e PIELICHOWSKI, 2014), bem como em plantas de energia solar (ZHANG *et al.*, 2016) e em componentes eletrônicos (KALBASI e SALIMPOUR, 2015). Para as aplicações citadas, a seleção do PCM a ser utilizado requer análise da faixa de temperatura de fusão na qual será utilizado, e posterior análise da cavidade na qual será inserido (AGYENIM *et al.*, 2010), as quais podem apresentar formato esférico, tubular (ZHANG *et al.*, 2016), retangular ou tubular concêntrico (KHAN *et al.*, 2016), por exemplo. Como os PCM apresentam baixa condutividade térmica, torna-se necessária a utilização de técnicas de aprimoramento da transferência de calor entre a cavidade e o PCM. Das diversas técnicas existentes, cita-se a inserção de aletas, utilização de múltiplos PCM (IBRAHIM *et al.*, 2017), dispersão de partículas de elevada condutividade térmica no PCM e microencapsulação (SOARES *et al.*, 2013). Entre estas diferentes técnicas, a inserção de aletas

é mais atrativa, devido a facilidade de construção e menor custo de fabricação (AGYENIM *et al.*, 2010).

Muitos estudos para entendimento do processo de fusão de PCM, contidos em diferentes tipos de cavidades, com e sem a integração de técnicas de aprimoramento da transferência de calor, já foram realizados (SHMUELI *et al.*, 2010; KATSMAN *et al.*, 2007; ASSIS *et al.*, 2007; DHAIDAN *et al.*, 2013; TAN, 2008; entre outros). Alguns estudos foram destinados à análise do processo de fusão de PCM através da utilização de aletas, como técnica de aprimoramento da transferência de calor (HOSSEINI *et al.*, 2015; KAMKARI e SHOKOUHMAND, 2014; KALBASI e SALIMPOUR, 2015; ABDI *et al.*, 2019). No entanto, muitos destes analisam somente o comportamento da quantidade das mesmas, sua orientação, ou então, seu comprimento. Desta forma, nota-se a falta de uma análise geométrica da aleta, que alie, simultaneamente, a alteração de seu comprimento e de sua altura, mantendo-se a área da mesma constante. Uma possível forma de se realizar esta análise geométrica, dá-se através do método *Design Construtal*. Este método é caracterizado por uma análise sequencial, entre a menor e a maior configuração (BEJAN *et al.*, 2000). Com ele pode-se obter os fluxos mais eficientes (LORENTE *et al.*, 2015) e definir a configuração das aletas para se obter as melhores configurações, de acordo com a aplicação desejada. Portanto, se faz necessária a realização de estudos que utilizem o método *Design Construtal* para análise geométrica de aletas, em processos de fusão de PCM.

Este trabalho tem por objetivo verificar a influência da razão de aspecto de aletas ( $RA_f$ ), inseridas em uma cavidade retangular, no processo de fusão do PCM ácido láurico, bem como, através do método *Design Construtal*, determinar a razão de aspecto ótima ( $RA_{opt}$ ), a qual minimizará o tempo máximo do processo de fusão do PCM, para diferentes valores de frações de área ( $\phi$ ).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Verificar a influência da razão de aspecto de uma aleta, através de simulação numérica, no processo de fusão de PCM ácido láurico, contido em uma cavidade de geometria retangular.



### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- investigar o efeito da variação da razão de aspecto da aleta, no processo de fusão, para diferentes valores de frações de área;
- definir as razões de aspecto ótimas das aletas, que serão caracterizadas por minimizar o tempo total do processo de fusão do PCM, para cada fração de área, através do *Design Construtal*.

## 1.2 Justificativa

Os PCM são apresentados como uma alternativa à crescente necessidade de utilização de fontes de energias renováveis, com a possibilidade de suprir as altas demandas de consumo, com pouco impacto ambiental. Os mesmos apresentam alta densidade de armazenamento térmico, sob temperatura constante, possibilitando a utilização em inúmeras aplicações. Com isto, estudos sobre a utilização de PCM, contidos em cavidades, são constantemente realizados. No entanto, essa aplicação necessita da implementação de técnicas de aprimoramento da transferência de calor, devido à sua baixa condutividade térmica, pois muitos estudos já realizados concentram-se unicamente na análise da inclusão de aletas, não considerando qual a melhor geometria da mesma para facilitar o fluxo térmico.

Para melhorar a implementação de aletas, como técnica de aprimoramento da transferência de calor, faz-se necessária a análise da sua geometria, buscando-se relações dimensionais à facilitar o fluxo térmico. Consequentemente, há possibilidade da utilização de cavidades e/ou aletas menores.

## 1.3 Estrutura da pesquisa

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos. No Capítulo 2, realiza-se uma breve revisão bibliográfica, com ênfase nos materiais de mudança de fase (PCM). No capítulo 3 comenta-se sobre a *Lei Construtal* e suas aplicações, além do método *Design Construtal*. O Capítulo 4 reserva-se à metodologia do estudo, com apresentação das condições geométricas da cavidade aletada, condições iniciais, de contorno e modelo matemático. No Capítulo 5, são apresentados resultados da validação numérica, através da comparação com resultados da literatura, além dos resultados que foram submetidos para congressos e a serem submetidos a

um periódico internacional. No apêndice A consta o artigo que foi apresentado no 8º MCSul, no B o artigo que foi aceito no *Constructal Law & Second Law Conference 2019*, e no C o artigo que será submetido para um periódico internacional.

## 2 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

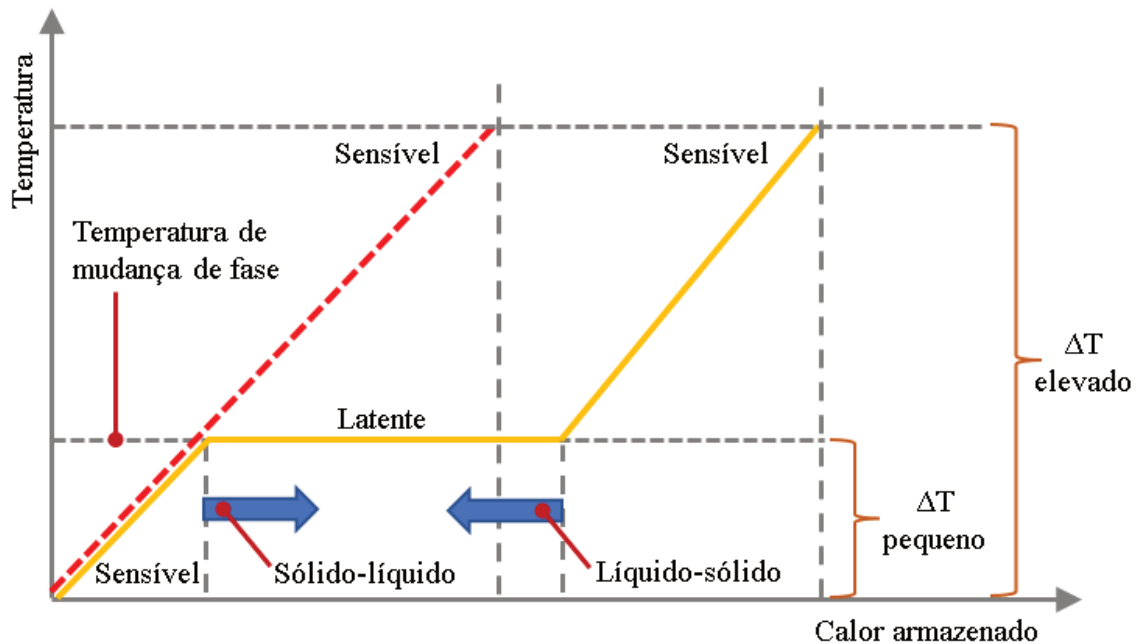
Materiais de mudança de fase (PCM - *Phase Change Materials*) apresentam a característica de absorver ou liberar calor em uma temperatura praticamente constante (SHARMA *et al.*, 2009), além de apresentar pouca variação volumétrica (AKEIBER *et al.* 2016). Dessa forma, PCM podem ser utilizados em sistemas que necessitem reduzir o consumo de energia, ou suas flutuações (AKEIBER *et al.* 2016), bem como em aplicações que necessitem de temperaturas estabilizadas (MEHLING e CABEZA, 2008). Existem inúmeros PCM utilizados em processos de fusão e em processos de solidificação, nos quais podem ser utilizados em ampla faixa de temperaturas, tornando-os atrativos para emprego em diversas aplicações (FARID *et al.* 2004). Dentre as possíveis aplicações, destacam-se quanto à utilização em armazenamento de energia térmica, cujo emprego pode ser desde construções à biomedicina (PIELICHOWSKA e PIELICHOWSKI, 2014), em plantas de energia solar (ZHANG *et al.*, 2016) e em componentes eletrônicos (KALBASI e SALIMPOUR, 2015).

### 2.1 Armazenamento de energia térmica

O armazenamento de energia é realizado de diferentes formas, que pode ser mecânica, química, elétrica ou térmica. PCM enquadra-se no armazenamento de energia térmica, em que a mudança de energia interna pode ocorrer através do calor sensível, calor latente ou mudança termoquímica (ZHANG *et al.*, 2016). No armazenamento de calor sensível, a energia térmica é armazenada através do aumento de temperatura de um sólido ou de um líquido (SHARMA *et al.*, 2009 e ABHAT, 1980), conforme representado na linha de cor vermelha da Figura 2.1. Já no armazenamento de calor latente, há absorção ou liberação de calor enquanto o material sofre mudança de fase, conforme representado na linha de cor laranja da Figura 2.1.

O armazenamento de energia através do calor latente torna-se atrativo devido a alta densidade de armazenamento energético, possuindo como principal característica o elevado armazenamento térmico em temperatura constante, correspondendo a temperatura de transição de fase do PCM (SHARMA *et al.*, 2009). Desta forma, ao se comparar o armazenamento de energia através de calor sensível e calor latente, observa-se que o armazenamento de energia de calor latente necessita de menor massa e volume para a mesma quantidade de energia (AGYENIM *et al.*, 2010). Ainda, segundo Sharma *et al.* (2009), para a grande maioria dos PCM, suas principais características são: alto calor latente de fusão, alta densidade, pequena variação de volume, estabilidade química, não toxicidade e a não inflamabilidade.

Figura 2.1 - Métodos de armazenamento de energia térmica



Fonte: adaptado de GRACIA *et al.* (2015), MEHLING e CABEZA (2008) e REDDY *et al.* (2018).

Os materiais de armazenamento de calor por mudança de fase podem ser selecionados de acordo com critérios termodinâmicos, cinéticos e químicos. Como exemplo para os critérios termodinâmicos, tem-se o ponto de fusão na faixa de temperatura de utilização, a densidade, o calor específico e a condutividade térmica. Para o critério cinético, tem-se pouco ou nenhum sub-resfriamento durante a solidificação. Como critério químico, verifica-se a estabilidade química, se o material é corrosivo, venenoso, inflamável ou até explosivo (ABHAT, 1983).

## 2.2 Classificação dos PCM

Os PCM são classificados em três grupos principais, denominados de orgânicos, inorgânicos e eutéticos, com subseqüentes subdivisões conforme características específicas. Os orgânicos são subdivididos em parafinas e não parafinas; os inorgânicos são subdivididos em hidratos de sal e metálicos e finalmente os eutéticos são subdivididos em orgânicos-orgânicos, inorgânicos-inorgânicos e orgânicos-inorgânicos (DINÇER *et al.*, 2017; SHARMA *et al.*, 2009). Na Figura 2.2 é apresentada a classificação dos PCM de forma esquemática.

Figura 2.2 - Classificação de PCM



Fonte: Adaptado de SHARMA *et al.*, (2009).

PCM orgânicos são materiais que possuem como característica a capacidade de fundir e solidificar sem que ocorra segregação de fase, ou seja, sem que ocorra a separação das diferentes fases (SHARMA *et al.*, 2009). Apresentam elevada capacidade de armazenamento, com pouca variação de temperatura (REDDY *et al.*, 2018), possuindo estabilidade em altas temperaturas (DINÇER *et al.*, 2017), além de estabilidade da temperatura de mudança de fase (KHAN *et al.*, 2017).

Dentro da subdivisão dos PCM orgânicos, as parafinas são uma mistura de hidrogênio e moléculas de carbono, com massa molar variando entre 20 e 40 (REDDY *et al.*, 2018). São normalmente encontradas no estado sólido em temperatura ambiente (DINÇER *et al.*, 2017), possuem capacidade de armazenar calor de fusão (SHARMA *et al.*, 2009) e são encontradas em uma ampla faixa de temperaturas de fusão. São quimicamente inertes (FARID *et al.*, 2004) e estáveis abaixo de 500°C, apresentando pouca variação de volume (REDDY *et al.*, 2018) e baixa variação de pressão no estado líquido (SHARMA *et al.*, 2009). Possuem baixa condutividade térmica (FARID *et al.*, 2004), não são compatíveis com plástico, além de serem moderadamente inflamáveis (REDDY *et al.*, 2018; SHARMA *et al.*, 2009).

Completando a subdivisão dos PCM orgânicos, as não parafinas apresentam propriedades semelhantes as parafinas (AKEIBER *et al.*, 2016), porém com maior variabilidade de características (DINÇER *et al.*, 2017). As não parafinas também são conhecidas como ácidos graxos (REDDY *et al.*, 2018), os quais são altamente inflamáveis, sendo assim, não podem ser

expostas a altas temperaturas (AKEIBER *et al.*, 2016). Apresentam estabilidade cíclica (carga e descarga) (SOUAYFANE *et al.* 2016), alto calor de fusão, moderada inflamabilidade, baixa condutividade térmica, instabilidade a altas temperaturas e baixa toxicidade (DINÇER *et al.*, 2017).

Os PCM inorgânicos, se comparados com os PCM orgânicos, possuem altas densidades, maior condutividade térmica, com entalpia de fusão similar (DINÇER *et al.*, 2017) e apresentam baixa inflamabilidade (AKEIBER *et al.*, 2016). Possuem a característica de não degradarem durante o ciclo de carga e descarga, além de não congelarem (SHARMA *et al.*, 2009). Apresentam elevado calor latente de fusão (SOUAYFANE *et al.* 2016), com elevada capacidade de armazenamento do calor latente por unidade de massa (REDDY *et al.*, 2018) e são encontrados em um vasto campo de temperaturas (DINÇER *et al.*, 2017).

Dentro da subdivisão dos PCM inorgânicos, os hidratos de sal são ligas de sais inorgânicos e água, formando um sólido (SHARMA *et al.*, 2009). Possuem como principais características, elevado calor latente de fusão por unidade de massa, elevada condutividade térmica e baixa mudança de volume durante a fusão (REDDY *et al.*, 2018). Possuem também, como característica, a baixa corrosão e baixa toxicidade (DINÇER *et al.*, 2017), apresentando três tipos de comportamentos durante a fusão, denominados de congruência, incongruência e semi-congruência (SHARMA *et al.*, 2009). Tem-se congruência quando o anidro de sal está completamente solúvel na água no ponto de fusão. Observa-se a incongruência quando o sal não está completamente solúvel na água no ponto de fusão. A semi-congruência ocorre quando as fases sólida e líquida estão em equilíbrio durante a transição de fase (SHARMA *et al.*, 2009).

Completando a subdivisão dos PCM inorgânicos, os PCM metálicos são caracterizados por metais de baixa temperatura de fusão, sendo utilizados quando são necessários grandes volumes, devido ao elevado calor de fusão por unidade de volume (REDDY *et al.*, 2018; SHARMA *et al.*, 2009). Possuem elevada condutividade térmica, baixo calor específico e baixa pressão de vaporização (DINÇER *et al.*, 2017).

Os PCM eutéticos são compostos por dois ou mais tipos de materiais, que formam uma mistura, contendo componentes orgânicos e inorgânicos (JAGUEMONT *et al.*, 2018). Estes componentes fundem e solidificam separadamente, formando uma mistura de cristais (SHARMA *et al.*, 2009). Possuem ponto de fusão e solidificação fixos e alta densidade de armazenamento volumétrico, se comparado com PCM orgânico (REDDY *et al.*, 2018). Conforme Jaguemont *et al.* (2018), os PCM eutéticos possuem alto calor latente, com ponto de fusão específico. Dinçer *et al.* (2017) escreveram que, por serem obtidos para aplicações

específicas, acabam possuindo valor de mercado maior do que os demais PCM, que possuem baixo calor de fusão.

Outra possível forma de classificação dos PCM ocorre através da comparação da temperatura de mudança de fase (PIELICHOWSKA *et al.*, 2014). Nesta forma de classificação, os PCM são classificados como de baixa, média e alta temperatura. O PCM é considerado de baixa temperatura, quando a mudança de fase ocorre até 15 °C. Para ser considerado de média temperatura, a mudança de fase deverá ocorrer entre 15 °C e 90 °C. Já para os PCM serem considerados de alta temperatura, a mudança de fase deverá ocorrer acima dos 90 °C.

### 2.3 Aplicações de PCM

PCM apresentam diversas aplicações, como em indústrias voltadas às edificações, indústrias têxteis, indústrias automotivas, instalações de energia solar e equipamentos eletrônicos, bem como na medicina. Nestes casos, os PCM são utilizados para armazenamento de energia, ou para controle de oscilações de temperatura (SOUAYFANE *et al.*, 2016, PIELICHOWSKA *et al.*, 2014 e KALNAES *et al.*, 2015).

Conforme Souayfane *et al.* (2016), nas edificações os PCM podem ser utilizados para resfriamento, podendo ser aplicados em sistemas passivos ou sistemas ativos de resfriamento. Nos sistemas passivos, não há utilização de sistemas mecânicos ou a necessidade de energia adicional. Neste caso, a carga e a descarga do PCM ocorre através da variação da temperatura ambiente. Para sistemas ativos, há a necessidade de utilização de sistemas mecânicos para auxílio da carga ou descarga, sendo melhores por substituir a convecção natural por convecção forçada.

Segundo Kalnaes *et al.* (2015), uma forma promissora de utilização de PCM, em edificações, ocorre através do emprego dos mesmos de forma micro encapsulada, para que seja feita a integração dos PCM aos materiais utilizados nas edificações. Ainda segundo estes autores, o PCM utilizado em edificações deverá fundir durante o dia e solidificar durante à noite. Através desta característica, há aumento do conforto térmico e redução das flutuações de temperatura, sendo mais efetivo em regiões com maiores variações térmicas.

Segundo Jaguemont *et al.* (2018), no início dos anos 2000 surgiu a possibilidade de utilização de PCM em baterias, devido ao advento dos carros elétricos e carros híbridos, no intuito de aprimorar a performance de energia e a durabilidade das baterias. Uma das possíveis formas de utilização seria através de modelos de baterias térmicas, com o objetivo de se encontrar a forma ótima de administração da energia térmica. Dessa forma, utilizando PCM, o

acréscimo de temperatura das baterias seria menor do que em baterias sem PCM, porém com a necessidade da utilização de PCM com temperatura de operação superior a 45 °C e inferior a 50 °C, para obtenção de maior eficiência.

Khan *et al.* (2017) citam sobre a aplicação de PCM em sistemas de refrigeração, através da absorção solar. Nesta aplicação, faz-se necessária a avaliação da temperatura de trabalho para determinação do PCM adequado, além da taxa de fluxo de massa para determinação do tempo de carga e descarga do mesmo, podendo o armazenamento de calor ser realizado internamente ou externamente ao circuito do sistema. Chidambaram *et al.* (2011) escreveram que nos sistemas de armazenamento de calor interno, o calor é transferido para o fluido, que por sua vez transfere calor para o sistema de armazenamento, realizando assim o armazenamento de energia. Nos sistemas de armazenamento de calor externo, o armazenamento de calor é realizado através de um sistema de armazenamento de energia que se encontra instalado externamente ao circuito principal.

Baby e Balaji (2012) estudaram experimentalmente a aplicação de PCM, para resfriamento de componentes eletrônicos. Os autores montaram um dissipador de calor aletado, que funcionou, sob uma fonte de calor constante, como um módulo de distribuição de calor e armazenamento de energia. Foram verificados diferentes tipos de aletas em diferentes níveis de potência, para análise do aumento do tempo de operação. Com os resultados obtidos, verificou-se que através da inclusão de PCM na cavidade aletada, o dispositivo eletrônico apresentou melhora significativa no tempo de funcionamento, mostrando ser uma boa forma de aplicação de PCM.

Uma aplicação interessante refere-se à utilização de PCM como proteção térmica de produtos alimentícios, sensíveis a variações térmicas. Leducq *et al.*, (2015) estudaram, de forma experimental, a utilização de PCM como embalagem térmica no armazenamento de sorvetes, através da análise do armazenamento a longo prazo e do excesso de temperatura. No experimento foi utilizado como PCM uma solução eutética, contendo água e cloreto de sódio, com temperatura de fusão de -21 °C. Através dos resultados obtidos, os autores verificaram que a embalagem de PCM apresentou impacto significativo na qualidade final do sorvete, pois manteve a temperatura estável e próxima da temperatura do PCM.

## **2.4 Características dos PCM**

Os PCM apresentam como características, elevado calor específico, elevado calor latente de fusão, pequena variação de volume durante a mudança de fase (BABY e BALAJI,



2012) e estabilidade térmica (JAGUEMONT *et al.*, 2018). Possuem também elevada densidade de armazenamento térmico (NOMURA *et al.*, 2010), acarretando, portanto, na sua indicação para armazenamento e controle da temperatura em sistemas que trabalham em uma faixa específica de temperatura (JAGUEMONT *et al.*, 2018). Desta forma, apresentam a capacidade de converter energia térmica em uma fonte de calor, a uma temperatura constante (NOMURA *et al.*, 2010).

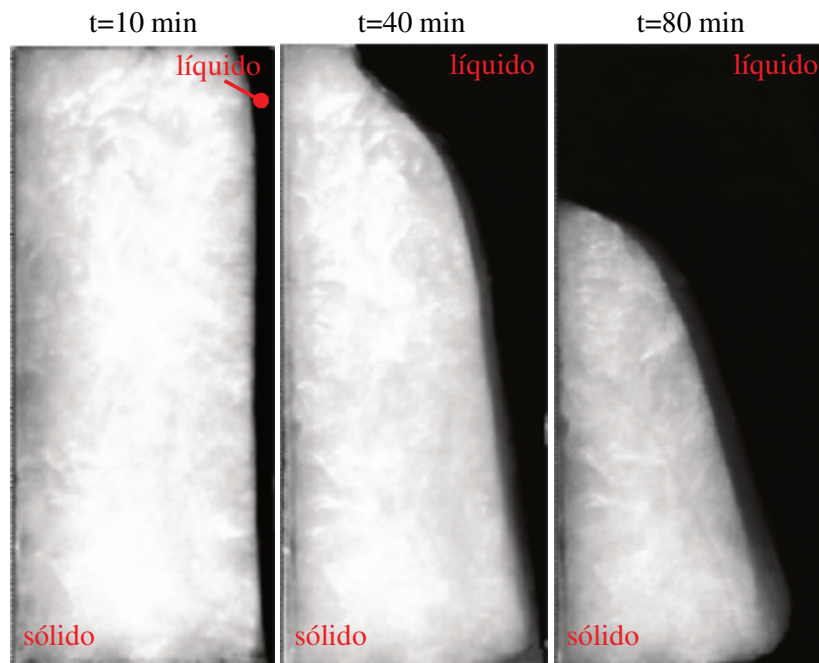
Apresentam também baixa condutividade térmica, o que resulta em baixas taxas de carga e descarga (AKEIBER *et al.*, 2016 e AGYENIM *et al.*, 2010), aliadas a possível instabilidade térmica, ocasionada quando utilizado em altas e baixas temperaturas (IBRAHIM *et al.*, 2017). Podem apresentar elevado resfriamento, corrosividade e inflamabilidade (LIZANA *et al.*, 2017). Conforme a aplicação, as condições climáticas, além de algumas condições geográficas, como a altitude, a latitude e o tipo de terreno, podem afetar a eficiência dos PCM (SOUAYFANE *et al.*, 2016). Outra desvantagem considerável para utilização de PCM, refere-se aos elevados valores comerciais, provenientes das baixas demandas de consumo, aliado aos estágios iniciais de desenvolvimento de diversas aplicações (DINÇER *et al.*, 2017).

## 2.5 Processo de fusão

O estudo do processo de fusão de PCM, em reservatórios, tem por objetivo proporcionar um melhor entendimento sobre o assunto, possibilitando a realização de projetos de sistemas de armazenamento de energia térmica (TAN e FOK, 2010). O processo de fusão ocorre nos instantes iniciais através da condução de calor (TAN, 2008), porém decorridos esses instantes iniciais, o processo de fusão passa a ser dominado pela convecção natural (PAL e JOSHI, 2001). Essa mudança no mecanismo de transferência de calor pode ser percebida durante a fusão ao longo do tempo, em uma cavidade retangular, conforme estudo experimental desenvolvido por Kamkari *et al.* (2014), que está apresentada na Figura 2.3. Percebe-se que nos instantes iniciais há uma fina camada de PCM fundido junto a parede, que está sendo aquecida, mostrando que a transferência de calor ocorre predominantemente por condução. Essa forma de transferência de calor prevalece enquanto as forças viscosas se opõem ao movimento do fluido, ou seja, enquanto a interface sólido-líquido permanece próxima a parede. Com o passar do tempo, a espessura da camada fundida aumenta e a força de empuxo torna-se suficientemente maior para superar a força viscosa, iniciando-se assim a convecção natural na região fundida, erodindo a parte superior da interface sólido-líquido. Através do desenvolvimento da força de flutuação,

ocorre a formação de crescentes correntes circulantes na parte superior, o que gera uma curvatura da frente de fusão, enquanto que na parte inferior, a interface permanece linear, com a inclinação aumentando com o passar do tempo. Com o crescente aumento da espessura da camada fundida, e com a constante mudança na forma da interface sólido-líquido, ocorre a formação de correntes circulantes dominantes no PCM líquido. Nota-se que o PCM permanece imóvel nas paredes adiabáticas até sua completa fusão, característica que pode ser observada em cavidades retangulares e em cavidades cilíndricas, cavidade esta, que está representada na Figura 2.4, referente ao estudo experimental desenvolvido por Katsman *et al.* (2007).

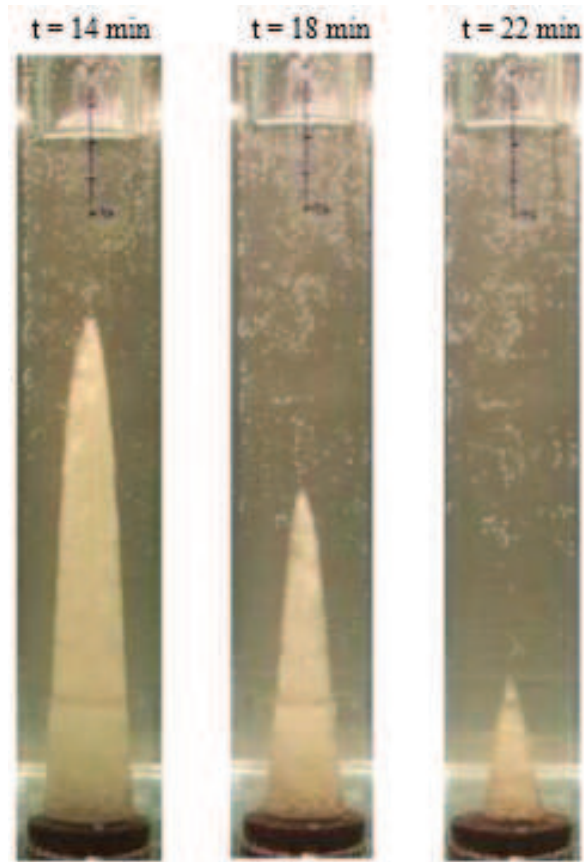
Figura 2.3 - Exemplo de processo de fusão em cavidade retangular



Fonte: adaptado de KAMKARI e SHOKOUHMAND (2014).

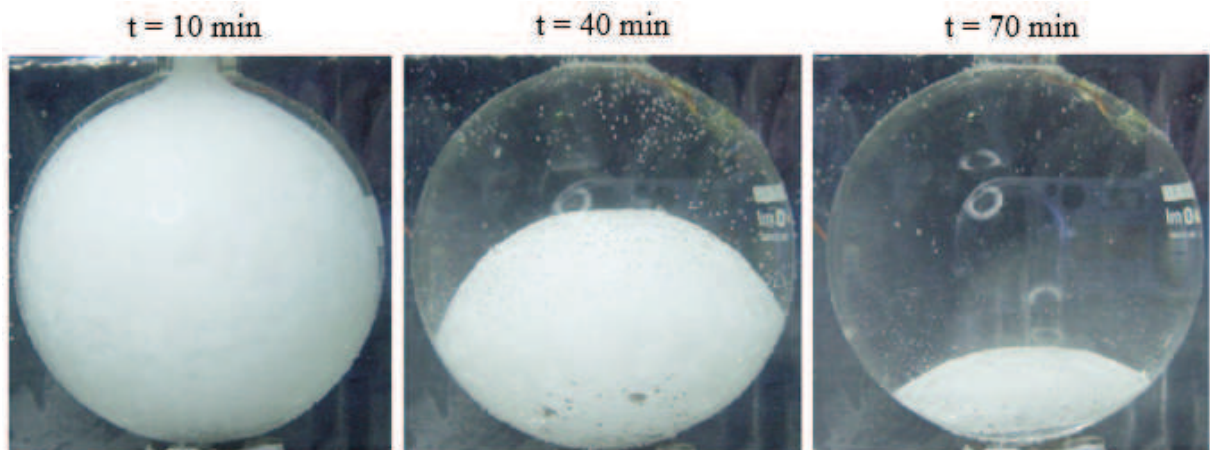
Outro exemplo que pode ser apresentado, referente ao mecanismo do processo de fusão, refere-se ao estudo experimental desenvolvido por Tan (2008), representado na Figura 2.5. Nesse exemplo, o comportamento do mecanismo durante o processo de fusão do PCM apresenta semelhança às cavidades retangulares e cilíndricas, ou seja, com condução de calor nos instantes iniciais e subsequente convecção natural. A diferença ocorre na parte inferior da esfera, onde gera-se uma película de PCM líquido, entre o PCM sólido e a superfície da cavidade, devido ao mecanismo de condução de calor, conhecida como película de líquido, originada de uma fusão de contato (*close contact melting*) (MOALLEMI *et al.* 1986).

Figura 2.4 - Exemplo de processo de fusão em cavidade cilíndrica



Fonte: KATSMAN *et al.* (2007).

Figura 2.5 - Exemplo de fusão em cavidade esférica



Fonte: TAN (2008).

## 2.6 Aprimoramento da transferência de calor

Devido à baixa condutividade térmica dos PCM, diversos estudos foram realizados com o intuito de se obter técnicas de aprimoramento da transferência de calor. Como exemplos de

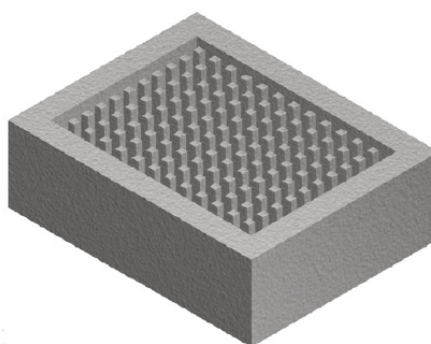
técnicas desenvolvidas, cita-se a encapsulação de PCM, inserção de metal no PCM, agitação do mesmo e a dispersão de partículas de alta condutividade nele (AGYENIM *et al.*, 2010).

Na dispersão de partículas, pode-se citar o estudo experimental e numérico desenvolvido por Dhaidan *et al.* (2013), onde nanopartículas de CuO foram inseridas em uma cavidade quadrada contendo PCM. O objetivo do estudo era analisar o desempenho do PCM, para diferentes quantidades de nanopartículas, bem como a influência na transferência de calor. Os resultados obtidos, mostraram um aumento na condutividade térmica do compósito com o aumento da quantidade de nanopartículas, aumentando, dessa forma a temperatura e consequentemente a taxa de transferência de calor, acarretando na diminuição do tempo de carga.

Na técnica de aprimoramento através da inserção de metal, Fukai *et al.* (2000) estudaram a inserção de fibras de carbono no PCM. Foi estudado o posicionamento aleatório e em forma de feixes das fibras de carbono, e foi verificado que essa técnica também apresenta bons resultados como aprimoramento da transferência de calor.

Outra técnica desenvolvida, e que possui um considerável destaque, é a utilização de aletas, visto a possibilidade da utilização de materiais de alta condutividade térmica (AGYENIM *et al.*, 2010). Como exemplo da utilização de aletas, pode-se citar o estudo experimental desenvolvido por Baby e Balaji (2013), cujo objetivo era a caracterização do desempenho térmico de dissipadores de calor, que continham PCM e aletas posicionadas verticalmente, conforme representado na Figura 2.6. Neste, os autores focaram na otimização do dissipador de calor através da análise da transferência de calor, utilizando diferentes quantidades de aletas, diferentes percentuais de volume de PCM e diferentes potências. Como resultado, obtiveram um aprimoramento na transferência de calor dos dissipadores de calor através do emprego das aletas.

Figura 2.6 - Cavidades com aletas verticais



Fonte: BABY e BALAJI (2013).

Outra metodologia empregada para utilização de aletas refere-se ao seu posicionamento horizontal, tendo como exemplo o estudo experimental desenvolvido por Kamkari e Shokouhmand (2014), representado na Figura 2.7. O objetivo desse estudo era analisar o processo de fusão de PCM, para diferentes temperaturas, e obter os campos de temperatura com a inclusão de aletas em uma cavidade retangular. Como resultado, os autores também obtiveram um aprimoramento na transferência de calor com a inclusão de aletas, o que resultou em menores tempos do processo de fusão do PCM.

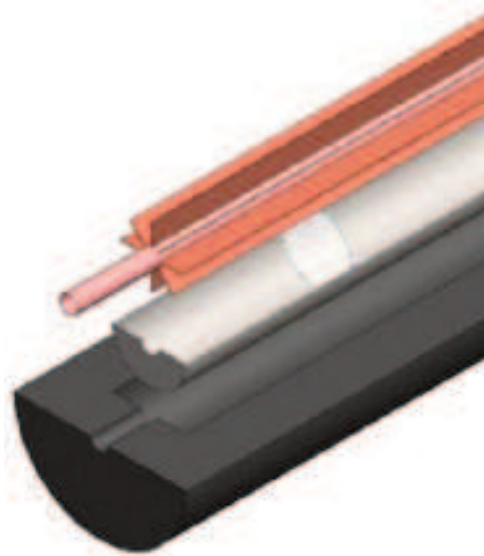
Figura 2.7 – Vista frontal da cavidade com aletas internas horizontais



Fonte: adaptado de KAMKARI e SHOKOUHMAND (2014).

Hosseini *et al.* (2015) apresentaram um estudo experimental sobre a utilização de aletas, dispostas longitudinalmente, em um trocador de calor duplo tubo, conforme apresentado na Figura 2.8. Nessa análise, os autores utilizaram aletas com duas alturas diferentes, encontrando resultados que mostraram que a extensão das aletas possui ligação no tempo do processo de fusão do PCM. Obtiveram também como resultado, que a absorção de calor se dá em função da altura das aletas nos instantes iniciais do processo de fusão, sendo que a configuração com maior aleta apresentou melhor distribuição de temperatura.

Figura 2.8 - Aletas longitudinais



Fonte: HOSSEINI *et al.* (2015).

### 3 LEI CONSTRUTAL

Lei Construtal é uma lei da Física (LORENTE *et al.*, 2015, BEJAN e LORENTE, 2013). Por essa Lei, os sistemas possuem duas características muito relevantes, ditas universais: condição de não equilíbrio termodinâmico e condição de livre transformação, ampliando, assim, o alcance termodinâmico. Essa Lei trata da evolução em relação ao tempo como dinâmica, ou seja, está em constante mudança e nunca acaba. Essa Lei preocupa-se com a análise do movimento, do acesso e da velocidade (BEJAN e ZANE, 2012), onde o fluxo existente nas configurações, representa o movimento que ocorre entre diferentes entidades. Dessa forma, através da aplicação da Lei Construtal, busca-se obter, além das melhores configurações dos sistemas, as configurações mais rápidas, mais econômicas, diretas e confiáveis (BEJAN e LORENTE, 2008).

Com a Lei Construtal, empregou-se uma nova propriedade para análise de sistemas de fluxo, complementar às propriedades até então empregadas na termodinâmica. Essa propriedade, denominada de “Esbelteza ( $S_v$  - *Sveltiness*)”, caracterizada pela relação entre as dimensões externa e interna de um sistema. Possui ligação ao espaço disponível do mesmo (LORENTE e BEJAN, 2005), cujo valor será maior do que 1 (um) (BEJAN e LORENTE, 2008) e é dada pela Eq. (3.1):

$$S_v = \frac{E}{I}, \quad (3.1)$$

onde  $E$  representa a escala de comprimento de fluxo externo e  $I$  representa a escala de comprimento de fluxo interno (BEJAN e LORENTE, 2013). Dessa forma,  $S_v$  representa a espessura relativa das linhas que representam a arquitetura do fluxo (BEJAN e LORENTE, 2011). Além da utilização da  $S_v$ , para caracterização da geometria, também é utilizada a razão de aspecto (BEJAN, 1997), cujo valor oscila através da variação da geometria, com o objetivo de se determinar a melhor forma de um sistema, para facilitar seu fluxo, cujo valor usualmente é menor do que 1 (um) e é dada pela Eq. (3.2) (BEJAN e ZANE, 2012):

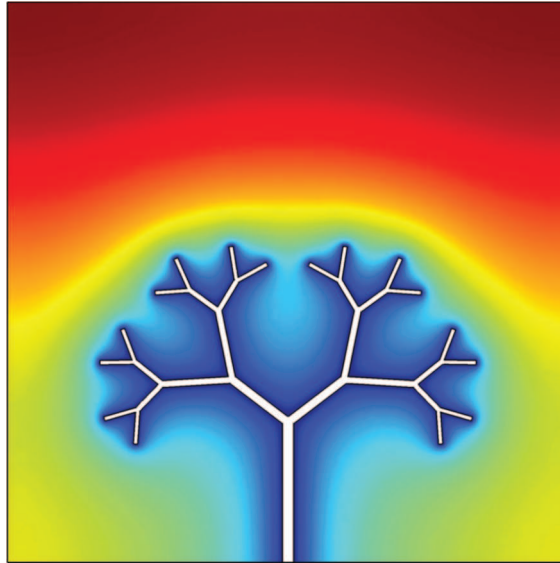
$$RA = \frac{H}{W}, \quad (3.2)$$

onde  $H$  representa a altura da geometria e  $W$  representa o comprimento da geometria.

A Lei Construtal também apresenta uma característica dos sistemas, na qual há união de todo fluxo existente ou gerado em um sistema, caracterizado pela conexão entre área e ponto,

sendo denominado de árvore de fluxo (BEJAN e ZANE, 2012). Nessas conexões, a área refere-se a diversos pontos, ou seja, caracteriza uma conexão entre um ponto (fonte ou coletor) e uma infinidade de pontos (área) (BEJAN e LORENTE, 2013). Na Figura 3.1 tem-se um exemplo de árvore de fluxo, onde se tem uma árvore condutora de fluxo em um corpo condutor (BEJAN e LORENTE, 2013).

Figura 3.1 - Árvore de fluxo



Fonte: BEJAN e LORENTE (2013).

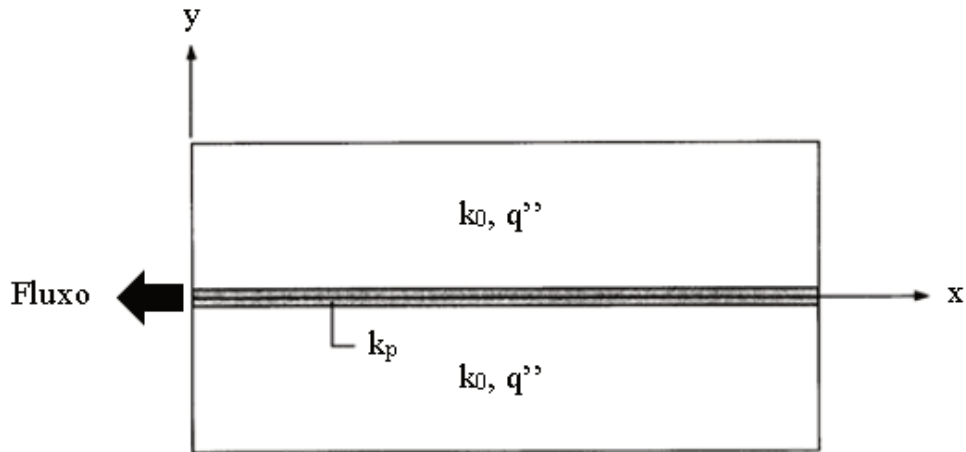
### 3.1 Aplicação da Lei Construtal

A Lei Construtal pode ser aplicada em seres animados e inanimados, desde que exista movimento (BEJAN, 2016). Assim, ao longo dos últimos anos diversas análises de sua aplicabilidade foram realizadas. Uma das primeiras aplicações da Lei Construtal surgiu por acidente, através da necessidade da refrigeração de circuitos eletrônicos, onde havia a necessidade de se instalar o maior número possível de circuitos eletrônicos em um determinado volume, sem que a temperatura máxima ultrapassasse determinado valor. Uma das dificuldades estava na necessidade da miniaturização dos componentes eletrônicos, fazendo com que a convecção não fosse eficaz e obrigando a condução a ser extremamente efetiva, para extrair a carga térmica existente. Dessa forma, foi inserido um material com condutividade térmica maior, denominado de condutividade do caminho ( $k_p$ ) nos componentes eletrônicos, denominados de condutividade térmica do material ( $k_0$ ) e que possuíam geração de calor ( $q''$ ), conforme Figura 3.2. Esse material passou, então, a desempenhar um papel como dissipador de calor, cuja configuração geométrica foi estudada tendo em vista uma melhor extração térmica,



buscando uma configuração dita ótima para que o calor gerado fosse extraído para o exterior com a menor diferença de temperatura (BEJAN, 1997).

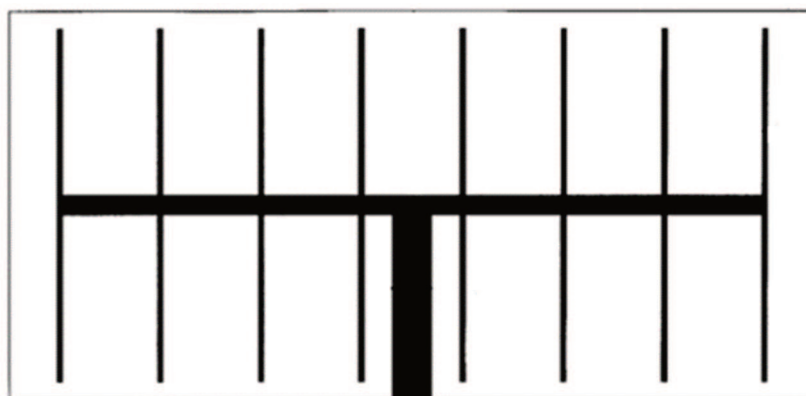
Figura 3.2 - Inserção de material de alta condutividade



Fonte: adaptado de BEJAN (1997).

Almogbel e Bejan (1999) aprimoraram o estudo da aplicabilidade da Lei Construtal, com o aumento e otimização dos espaçamentos do material condutivo. Dessa forma, nessa otimização foi realizada a inserção de material com alta condutividade térmica, formando um tipo de árvore, sendo que os elos se tornavam mais espessos quanto mais próximos estavam do ponto inicial, conforme apresentado na Figura 3.3. Ao final do estudo, chegaram à conclusão de que o desempenho global do sistema melhora com o aumento da complexidade do sistema, ou seja, com o aumento do número de elos, através da otimização das proporções geométricas.

Figura 3.3 - Árvore de fluxo



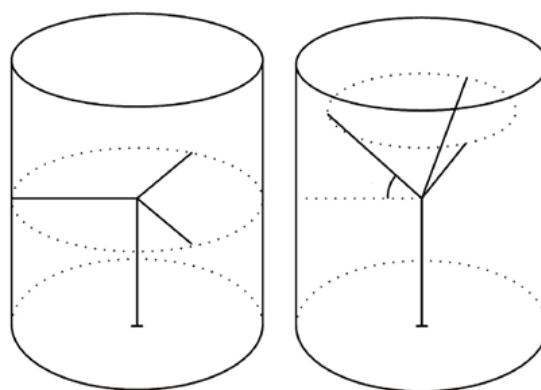
Fonte: ALMOGBEL e BEJAN (1999).

Alguns estudos buscaram aliar os conceitos da Lei Construtal à utilização de PCM. Como exemplo, cita-se o estudo desenvolvido por Kalbasi e Salimpour (2015), que buscaram avaliar as características térmicas de um dissipador de calor contendo PCM. Nesse estudo, os

autores buscaram maximizar o tempo de operação do sistema, sem que fosse obtida a temperatura crítica de operação, através da inclusão de aletas, para melhorar a condutividade térmica ao PCM. Com modificações geométricas realizadas, através da variação da razão de aspecto, obtiveram o tempo no qual a temperatura máxima alcançou seu valor crítico. A espessura da aleta não apresentou efeito significativo, porém as maiores razões de aspecto apresentaram os piores desempenhos. Uma importante observação realizada, refere-se, como esperado, ao aumento da transferência de calor com a inclusão de aletas, porém com essa inclusão, houve uma redução do armazenamento de energia, visto que há uma redução do volume de PCM ao manter-se o volume do sistema constante.

Outra aplicação da Lei Construtal refere-se à sua utilização em sistemas de armazenamento de calor latente, com o objetivo de se obter maior efetividade dos sistemas durante os períodos de maior disponibilidade de energia, para posterior utilização. Para essa aplicação, conforme Ziaei *et al.* (2016), foi estudada a relação entre o efeito do aquecimento e a taxa de máxima fusão, com o objetivo de se obter a melhor configuração, na qual o tempo de fusão total de determinado PCM fosse menor. Como resultado, os autores verificaram que a taxa de transferência de calor aumenta com o aumento do número de graus de liberdade das ramificações, através do aumento de seu comprimento e do ângulo de inclinação, porém com esse último apresentando um impacto menor no desempenho. O sistema descrito é apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Sistema de armazenamento com ramificações internas



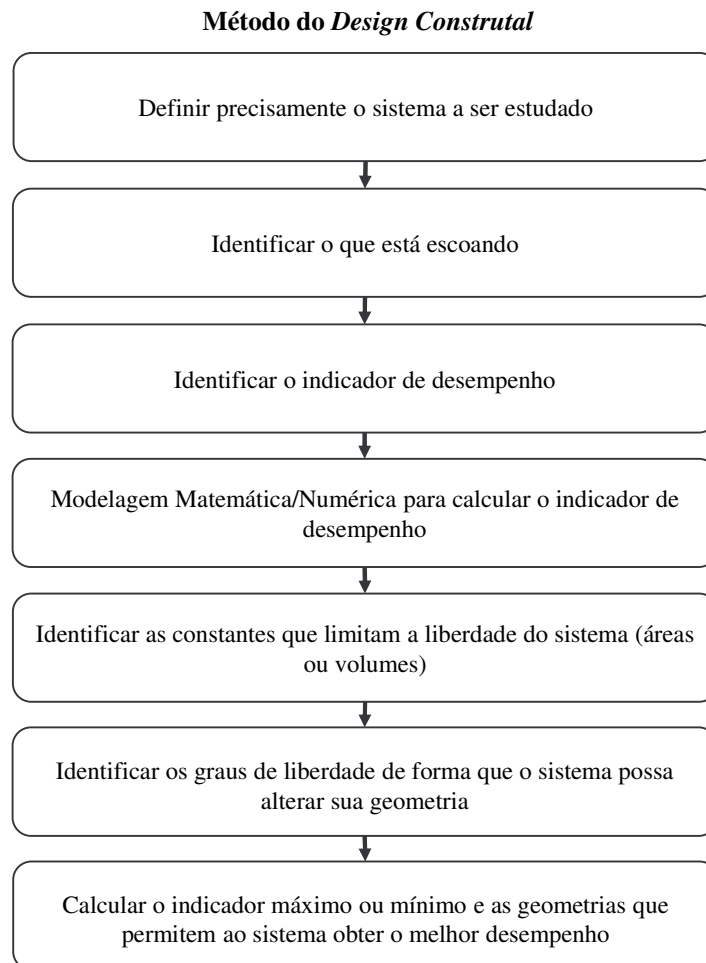
Fonte: adaptado de ZIAEI *et al.* (2016).

A aplicação da Lei Construtal, na engenharia, é realizada através da utilização do método denominado *Design Construtal*, conhecido como Design com Teoria Construtiva (DTC) (ROCHA *et al.* 2017).

### 3.2 Design Construtal

O *Design Construtal* é um método empregado para análise da evolução do design de determinada aplicação. O mesmo não é considerado um método de otimização, porém, quando o sistema possuir graus de liberdade, este poderá ser implementado em associação a métodos de otimização existentes (ROCHA *et al.* 2017). Para a implementação deste método, torna-se necessária a execução das etapas apresentadas na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Fluxograma com aplicação do *Design Construtal*

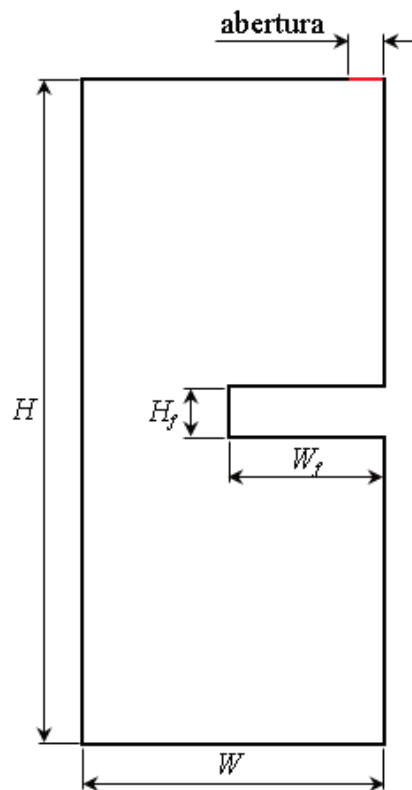


Fonte: adaptado de ROCHA *et al.* (2017) e RAZERA *et al.* (2018).

#### 4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A geometria analisada consiste em uma cavidade retangular aletada, conforme representado na Figura 4.1, preenchida totalmente com PCM ácido láurico, inicialmente no estado sólido. A cavidade é considerada bidimensional, com largura ( $W$ ) de 50 mm e altura ( $H$ ) de 120 mm. A aleta possui largura  $W_f$  e altura  $H_f$ , estando posicionada horizontalmente no centro da parede direita. Existe na parede superior uma abertura de 2 mm, localizada junto à parede direita, para que possa ser realizada a simulação da retirada do PCM de dentro da cavidade durante o processo de fusão.

Figura 4.1 - Desenho esquemático do problema



Fonte: o autor (2018).

A cavidade está totalmente preenchida com PCM ácido láurico ( $C_{12}H_{24}O_2$ ), o qual é um ácido graxo com 99% de pureza, Shokouhmand *et al.* (2013), e que está inicialmente na temperatura  $T_i = 298$  K. As propriedades termofísicas do ácido láurico estão expostas na Tabela 4.1, Tabela 4.2, e Tabela 4.3. Estas tabelas apresentam valores de calor específico ( $c_p$ ), calor latente de fusão ( $L$ ), massa específica ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $k$ ) e viscosidade dinâmica ( $\mu$ ). Os sub-índices  $s$  e  $l$  referem-se aos estados sólido e líquido, respectivamente. Os valores de  $k$  e de  $\mu$  em função da temperatura foram obtidos através de interpolação linear. O valor de  $\rho_s$  foi

considerado constante, porém os valores de  $\rho_l$  foram considerados variáveis de acordo com a variação de temperatura, com valores de 885 kg/m<sup>3</sup> em 321,35 K, 870 kg/m<sup>3</sup> para 323 K e 862 kg/m<sup>3</sup> para 333 K, obtidos de Chuah *et al.* (2006).

Tabela 4.1 - Propriedades termofísicas do ácido láurico

$c_p$ [J/(kg K)]		$L$ [J/kg]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		$T$ [K]	
$s$	$l$		$s$	$l$	$s$	$l$
2180	2390	187210	940	885	316,65	321,35

Fonte: KAMKARI e SHOKOUHMAND (2014).

Tabela 4.2 - Condutividade térmica do ácido láurico

$T$ [K]	293	303	313	323	328	333	338	343
$k$ [W/(m K)]	0,161	0,159	0,158	0,145	0,143	0,142	0,139	0,138

Fonte: SHOKOUHMAND e KAMKARI (2013).

Tabela 4.3 - Viscosidade dinâmica do ácido láurico

$T$ [K]	321,2	322	333	344	355	372	383
$\mu$ [kg/(m s)]	0,00760	0,00747	0,00542	0,00428	0,00338	0,00250	0,00210

Fonte: VALERI e MEIRELLES (1997).

As dimensões da aleta foram modificadas através da variação da razão de aspecto ( $RA_f$ ) da mesma, determinada pela relação da altura e comprimento da aleta, conforme Eq. (4.1). Estas foram realizadas para diferentes valores de frações de área ( $\phi$ ), buscando-se minimizar o tempo máximo do processo de fusão. O  $\phi$  é a razão entre as áreas da aleta ( $A_f$ ) e da cavidade ( $A$ ), conforme Eq. (4.2), na qual  $A$  é mantida constante e igual a 6000 mm<sup>2</sup>. A  $A$  e a  $A_f$  foram obtidas conforme a Eq. (4.3) e (4.4), respectivamente.

$$RA_f = \frac{H_f}{W_f}, \quad (4.1)$$

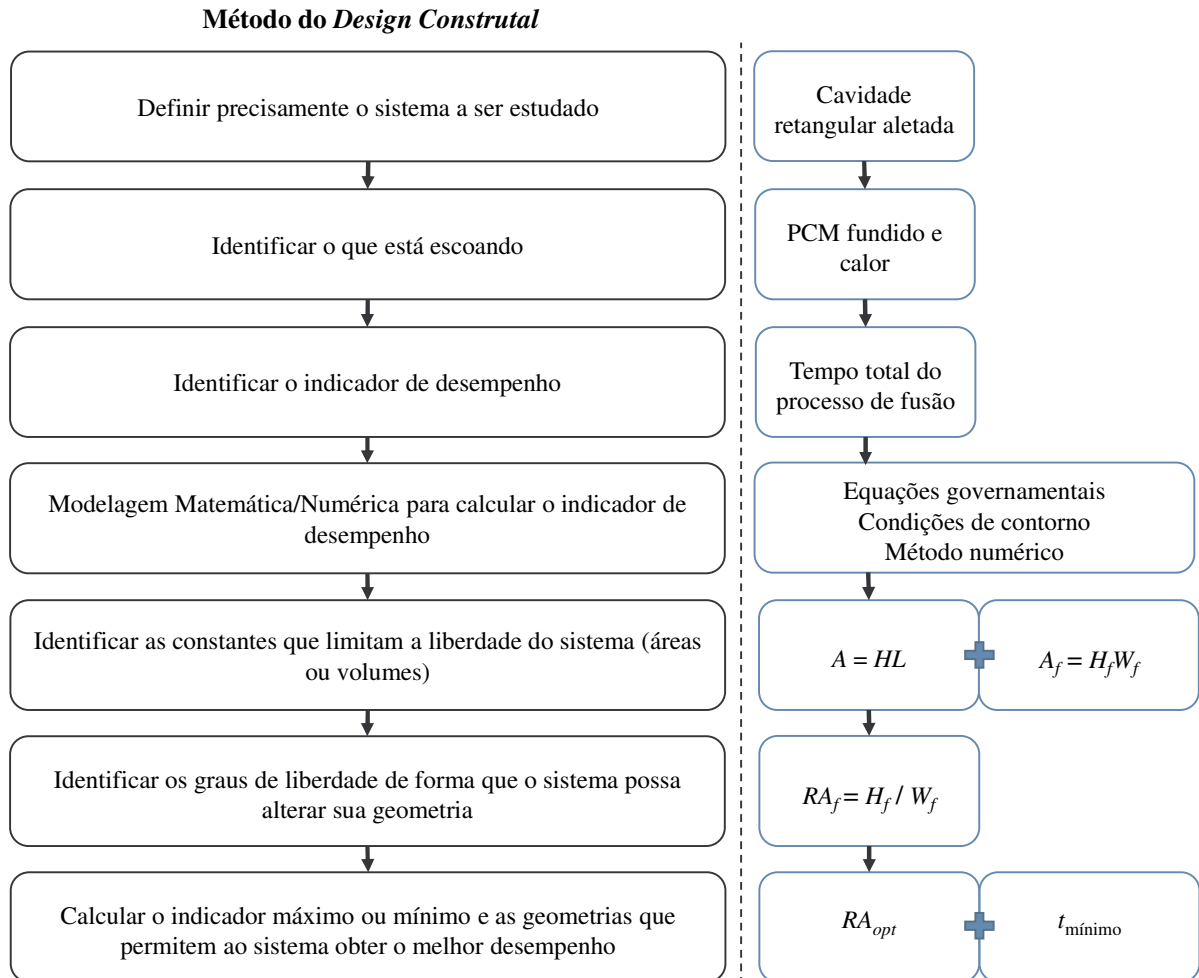
$$\phi = \frac{A_f}{A}, \quad (4.2)$$

$$A = HW, \quad (4.3)$$

$$A_f = H_f W_f, \quad (4.4)$$

Na Figura 4.2 estão representadas, em modo de fluxograma, as etapas para implementação do *Design Construtal*, sendo que no lado esquerdo estão as etapas descritas anteriormente, na Figura 3.5, e no lado direito a adaptação para este estudo.

Figura 4.2 - Fluxograma com aplicação do Design Construtal para o presente estudo



Fonte: adaptado de ROCHA *et al.* (2017) e RAZERA *et al.* (2018).

$W$  e  $H$  da cavidade são mantidas constantes e a variação de  $RA_f$  é dependente dos valores obtidos para  $A_f$ , em relação aos arbitrados para  $\phi$ . Com isto, para cada  $A_f$  resultante,  $W_f$  e  $H_f$  são alterados, em um espaço de busca de 10 à 48 mm, para  $W_f$ , com intervalos de 5 mm entre 10 e 45 mm, gerando-se, portanto, 78 casos conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Dimensões da aleta

		$W_f$ [mm]								
		10	15	20	25	30	35	40	45	48
$\phi = 0,005$	$H_f$ [mm]	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,67	0,63
$\phi = 0,01$		6,00	4,00	3,00	2,40	2,00	1,71	1,50	1,33	1,25
$\phi = 0,02$		12,00	8,00	6,00	4,80	4,00	3,43	3,00	2,66	2,50
$\phi = 0,03$		18,00	12,00	9,00	7,20	6,00	5,14	4,50	4,00	3,75
$\phi = 0,04$		24,00	16,00	12,00	9,60	8,00	6,86	6,00	5,33	5,00
$\phi = 0,05$		30,00	20,00	15,00	12,00	10,00	8,57	7,50	6,66	6,25
$\phi = 0,10$		60,00	40,00	30,00	24,00	20,00	17,14	15,00	13,33	12,50
$\phi = 0,20$			80,00	60,00	48,00	40,00	34,29	30,00	26,66	25,00
$\phi = 0,30$				90,00	72,00	60,00	51,43	45,00	40,00	37,50

Fonte: o autor (2018).

#### 4.1 Modelo matemático

O modelo matemático para o presente trabalho é baseado no modelo entalpia-porosidade, que consiste na equação da massa, conforme Eq. (4.5), quantidade de movimento, conforme Eq. (4.6) e conservação de energia, conforme Eq. (4.7), acrescidas do modelo de mudança de fase:

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

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

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

sendo  $\vec{V}$  o vetor velocidade,  $t$  o tempo,  $p$  a pressão,  $\vec{g}$  a aceleração da gravidade,  $S$  o termo fonte da quantidade de movimento e  $\lambda$  a entalpia específica total, obtida através da soma da variação da entalpia específica na mudança de fase ( $\lambda_L$ ) e pela entalpia específica sensível ( $\lambda_{se}$ ), obtida através da Eq. (4.8):

$$\lambda_{se} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT, \quad (4.8)$$

onde  $\lambda_{ref}$  é a entalpia na temperatura de referência ( $T_{ref} = 298 \text{ K}$ ), com a entalpia na mudança de fase calculada conforme Eq. (4.9):

$$\lambda_L = \beta L, \quad (4.9)$$

O modelo de mudança de fase baseia-se no modelo entalpia-porosidade (VOLLER e PRAKASH, 1987), que trata a zona de interface sólido-líquido (*mushy zone*) como uma zona porosa, sendo o termo fonte  $S$  obtido conforme Eq. (4.10):

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} C \vec{V}, \quad (4.10)$$

onde  $\beta$  representa a fração líquida durante a mudança de fase,  $\varepsilon$ , uma constante de valor 0,001, utilizada para evitar que ocorra divisão por zero e  $C$ , a constante da zona porosa, dependente da morfologia da zona porosa (VOLLER e PRAKASH, 1987). Valores entre  $10^4$  e  $10^7$  são recomendados (SAS IP, 2015), porém podem ser diferentes dependendo do tipo de material (SHMUELI *et al.* 2010). O valor dessa constante deve ser elevado, para obrigar a velocidade, nas regiões sólidas, a tender à 0 (zero) (BRENT *et al.*, 1988). Como consequência, pode haver oscilações na solução (SAS IP, 2015), obrigando, dessa forma, a realização de uma análise do valor atribuído a ela (BRENT *et al.*, 1988).

A fração líquida para diferentes instantes de tempo, que ocorrem para o range de temperaturas  $T_s < T < T_l$ , pode ser obtida pelas relações apresentadas na Eq. (4.11):

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ T - T_s / T_l - T_s & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (4.11)$$

## 4.2 Condições de contorno

Foi adotada a condição de contorno adiabática nas paredes da esquerda, inferior e superior, conforme indica as Eqs. (4,12 - 4,14), respectivamente. A condição de temperatura prescrita foi utilizada para a parede vertical direita e para a aleta, assim como para a abertura, conforme indicado nas Eqs. (4.15) e (4.16), respectivamente. Em todas as paredes da cavidade, bem como as da aleta, foi considerada a condição de não deslizamento, com exceção da abertura, a qual foi considerada com escoamento livre.



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

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\substack{x=0-W \\ y=0}} = 0 \quad (4.13)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=W-abertura \\ y=H}} = 0 \quad (4.14)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=W \\ y=0-H}} = T_a \quad (4.15)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=abertura \\ y=H}} = T_a \quad (4.16)$$

### 4.3 Condições iniciais

A parede do lado direito e a aleta estão submetidas a uma temperatura de aquecimento  $T_a = 343$  K. Na parede superior há uma abertura de 2 mm, rente à parede direita, para simular a saída do PCM durante o processo de fusão. O PCM foi submetido inicialmente a uma temperatura inicial ( $T_i$ ) de 298 K.

### 4.4 Abordagem Numérica

Neste estudo serão utilizados os softwares ANSYS ICEM<sup>®</sup>, para geração das malhas computacionais, ANSYS FLUENT<sup>®</sup> para realização das simulações numéricas e ANSYS CFD-Post<sup>®</sup> para pós processamento dos resultados. Através do emprego dos conceitos da Lei Construtal, será obtida a razão de aspecto que minimizará o tempo total do processo de fusão do PCM.

Na abertura de 2 mm foi considerada a condição de “*pressure-outlet*”, com pressão manométrica de 0 Pa e temperatura de 343 K. Com estas configurações, busca-se simular a saída de PCM, para manter a pressão constante dentro da cavidade devido a variação volumétrica, oriunda do processo de fusão. Para correção da pressão, utilizou-se o esquema “*presto*” e para o acoplamento da pressão-velocidade utilizou-se o esquema “*simple*”. Considerou-se regime transiente, com intervalo de tempo de 0,1 s. Além disso, considerou-se a

aceleração da gravidade e o escoamento em regime laminar, com modelos de energia, solidificação e fusão. Para as equações de energia e quantidade de movimento utilizou-se o esquema “*first order upwind*”. O limite máximo de iterações por intervalo de tempo foi fixado em 1000. Adotou-se como critérios de convergência  $10^{-8}$ , para a equação da energia, e  $10^{-5}$ , para velocidade e continuidade. Os coeficientes de relaxamento utilizados foram de 0,15 para pressão e quantidade de movimento, 0,3 para massa específica, forças de campo e energia e 0,2 para fração líquida.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados resultados da validação numérica e da avaliação da constante  $C$ , bem como aqueles que foram submetidos para congressos. Também serão apresentados resultados que serão submetidos a um periódico internacional.

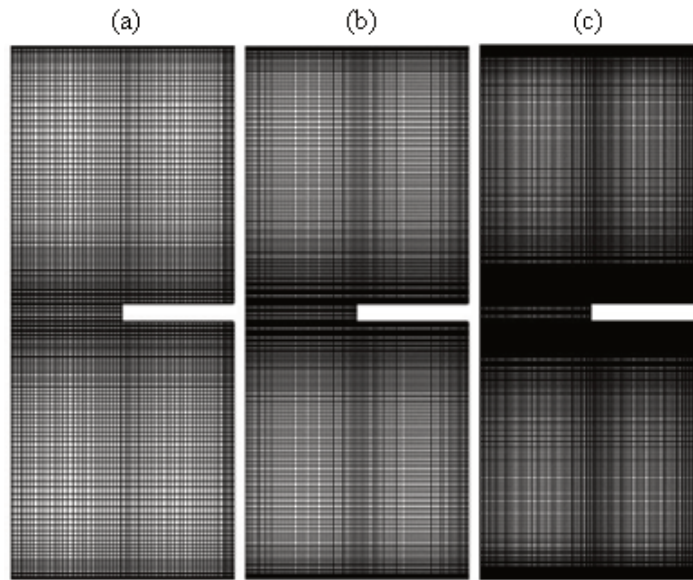
### 5.1 Validação numérica

A validação numérica foi realizada com base nos dados experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014). Esses autores estudaram o processo de fusão do ácido láurico em uma cavidade retangular, com 50 mm de largura, 120 mm de altura e 120 mm de espessura, com aleta de 25 mm de largura e 4 mm de altura. As condições de contorno do estudo experimental são: parede direita e aleta submetidas a uma temperatura constante de 343 K, com as demais paredes isoladas termicamente. O PCM estava na temperatura inicial ( $T_i$ ) de 298 K, portanto, na fase sólida.

Considerando-se as condições de contorno descritas, o problema foi modelado como bidimensional. Desta forma, foram criadas inicialmente três malhas computacionais, contendo 10118, 14520 e 28457 elementos, respectivamente, representadas na Figura 5.1(a-c). A análise de independência da malha computacional foi realizada pelo método *GCI (Grid Convergence Method)*, através do comparativo entre a malha intermediária, Figura 5.1(b), com a menos refinada, Figura 5.1(a), e com a mais refinada, Figura 5.1(c). Os índices obtidos foram de 5,5% e 1,9%, respectivamente, sendo assim, a malha de 28457 elementos foi indicada para realização das simulações numéricas. Porém, considerando-se o baixo erro obtido entre a malha intermediária e a mais refinada, e a diferença de aproximadamente 3 dias no tempo computacional, a malha de 14520 elementos foi escolhida como malha base para realização das demais simulações numéricas.

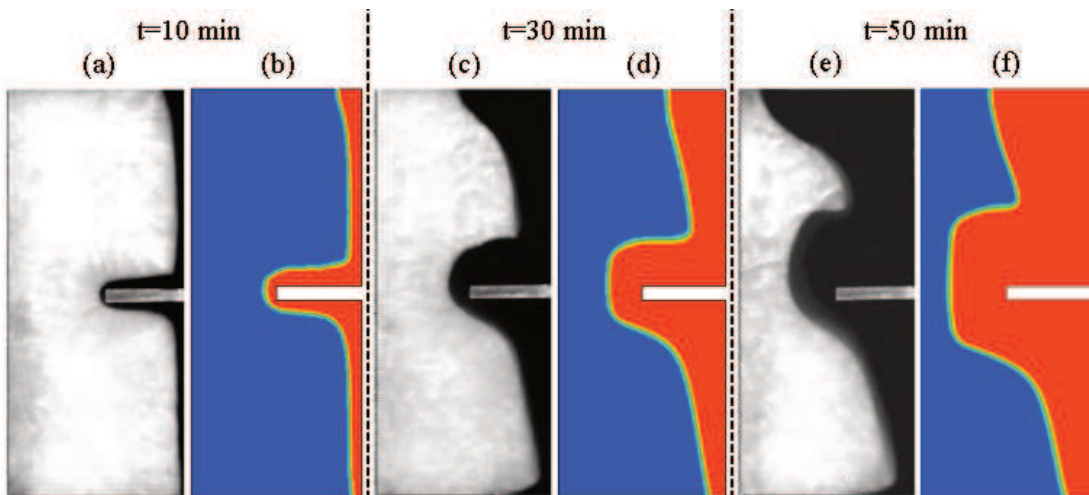
Nas Figura 5.2(a-f) são apresentados campos de fração de líquido ( $\beta$ ) para tempos de 10, 30 e 50 min, respectivamente, obtidos de Kamkari e Shokouhmand (2014), Figura 5.2(a, c e e), e o presente trabalho, Figura 5.2(b, d e f). Nessas figuras, o estado sólido do PCM é representado pelas cores branca e azul, enquanto que, o estado líquido é representado pelas cores preta e vermelha. Através do comparativo entre os resultados experimentais e numéricos, tanto nos instantes de 10, 30 e 50 min, observa-se que há boa concordância para os campos de  $\beta$ .

Figura 5.1 - Malhas computacionais: (a) 10118, (b) 14520 e (c) 28457



Fonte: o autor (2018).

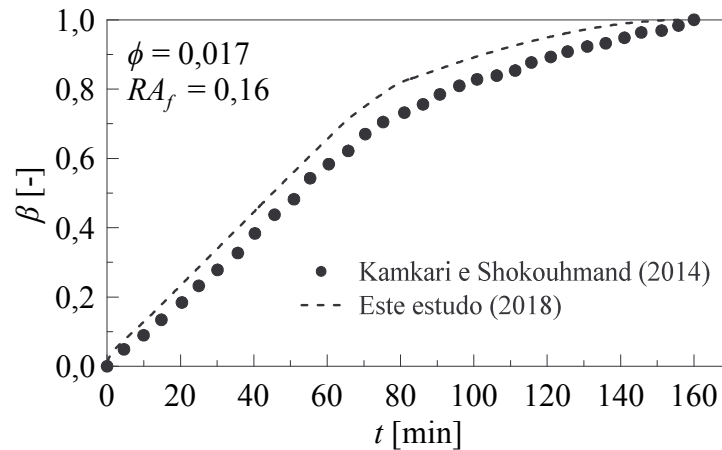
Figura 5.2 - Campos de  $\beta$  para  $t = 10$  e  $30$  min: (a) experimental de KAMKARI e SHOKOUHMAND (2014), (b) este estudo, (c) experimental de KAMKARI e SHOKOUHMAND (2014) e (d) este estudo



Fonte: adaptado de KAMKARI e SHOKOUHMAND (2014) e este estudo.

Na Figura 5.3 são apresentados perfis transientes de  $\beta$ , obtidos experimentalmente por Kamkari e Shokouhmand (2014) e o presente estudo. Os valores variam de 0 até 1, sendo 0 a representação do PCM no estado sólido e 1 a representação do PCM no estado líquido. Observa-se que há boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. O erro médio de afastamento entre os resultados foi de, aproximadamente, 5,4%, enquanto que o máximo foi de, aproximadamente, 6,3%, para  $\beta = 0,856$  e  $t = 110$  min.

Figura 5.3 -  $\beta$  pelo tempo: experimental de KAMKARI *et al.* (2014) e este estudo



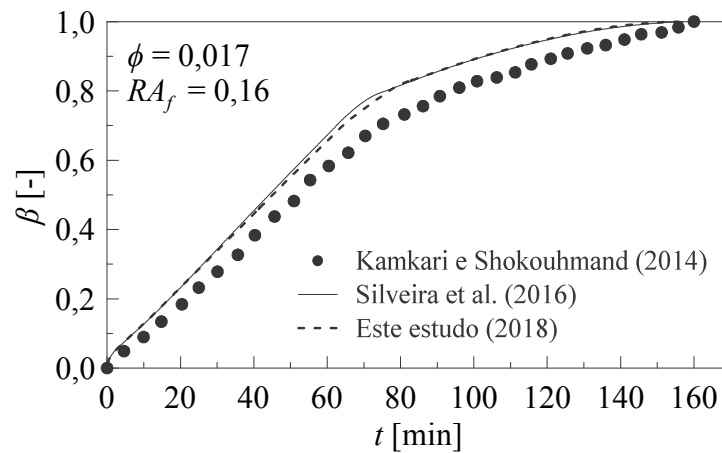
Fonte: o autor (2018).

## 5.2 Análise da constante $C$

Para este trabalho, a determinação do valor da constante  $C$  foi baseada no trabalho numérico desenvolvido por Silveira *et al.*, (2016). Esses autores estudaram o processo de fusão do PCM ácido láurico em uma cavidade retangular aletada, semelhante a cavidade estudada experimentalmente por Kamkari e Shokouhmand (2014) e o presente trabalho. Neste estudo, foram analisadas  $\beta$  ao longo do tempo para:  $C = 10^9$ ,  $C = 10^{10}$  e  $C = 10^{11}$ , em uma malha computacional de 28537 elementos. Como resultado, os autores verificaram que o parâmetro  $C = 10^{11}$  reproduziu de forma mais satisfatória o processo de fusão do PCM. Dessa forma, para o presente trabalho, esse foi o valor atribuído para a constante  $C$ .

Na Figura 5.4 são apresentados resultados de  $\beta$  ao longo do tempo para  $C = 10^{11}$ , obtidos do estudo numérico de Silveira *et al.*, (2016) e pelo presente estudo, bem como os experimentais obtidos Kamkari e Shokouhmand (2014). Percebe-se a boa concordância entre resultados, apesar dos resultados numéricos apresentarem um pequeno afastamento em relação aos resultados experimentais. O afastamento máximo entre os resultados do presente trabalho, em relação aos experimentais, foi de, aproximadamente, 6,3%. No entanto, foi de apenas 0,7% em relação aos resultados numéricos de Silveira *et al.* (2016), o qual apresentou, aproximadamente, 7,0% de afastamento aos resultados experimentais. Dessa forma, este estudo apresentou através de uma malha computacional com menor número de elementos, para o mesmo parâmetro de constante  $C$ , erro menor em relação ao estudo de Silveira *et al.*, (2016). Com isto, considera-se o modelo numérico validado para a constante  $C$ .

Figura 5.4 -  $\beta$  pelo tempo: experimental de KAMKARI *et al.* (2014), SILVEIRA *et al.* (2016) e este estudo



Fonte: o autor (2018).

Considerando-se a boa concordância entre os resultados experimentais, de Kamkari e Shokouhmand (2014), Silveira *et al.* (2016) e os numéricos do presente estudo, tanto qualitativos (Figura 5.2) quanto quantitativos (Figura 5.3), e constante  $C$  (Figura 5.4), considera-se o modelo numérico validado.

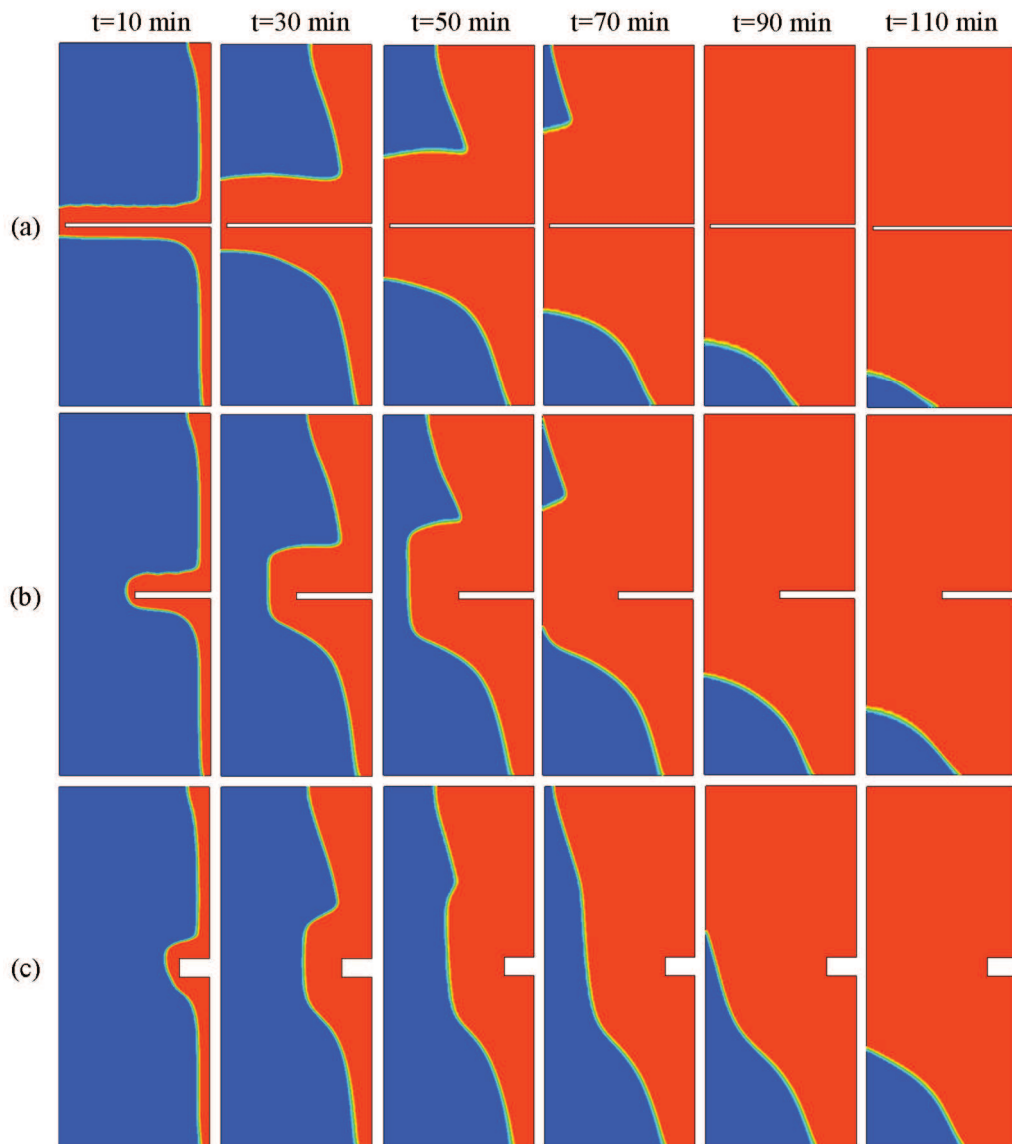
### 5.3 Artigo I – Estudo numérico para obtenção da razão de aspecto ótima de uma aleta no processo de fusão de material de mudança de fase (PCM)

Nesta seção são apresentados os resultados que foram submetidos e publicados, em forma de artigo, no 8º MCSul. O mesmo foi indicado para publicação na revista RIPE (Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia). O conteúdo completo do mesmo encontra-se no apêndice A.

#### 5.3.1 Estudo de Caso

As Figura 5.5(a-c) apresentam campos de  $\beta$  para tempos de 10, 30, 50, 70, 90 e 110 min, para três tamanhos de aletas. Pode-se observar que, para qualquer tempo, a fusão ocorreu mais rapidamente para o caso com  $RA_f = 0,026$ , o qual apresenta maior área de transferência de calor.

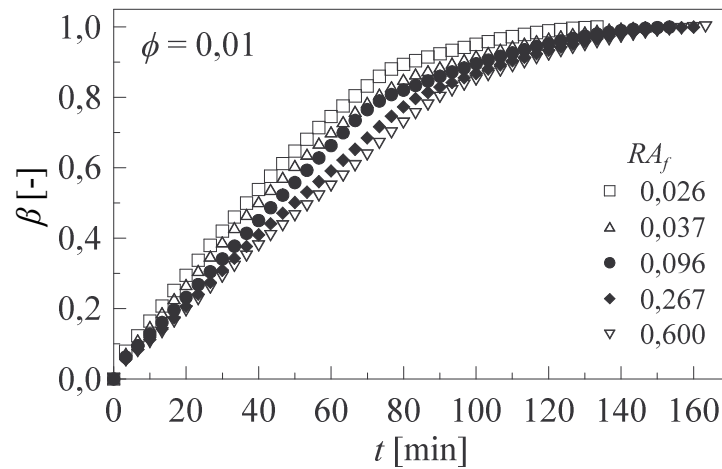
Figura 5.5 - Campos de  $\beta$  para  $t = 10, 30, 50, 70, 90$  e  $110$  min para:  
 (a)  $RA_f = 0,026$ ; (b)  $RA_f = 0,096$ ; (c)  $RA_f = 0,600$



Fonte: o autor (2018).

Na Figura 5.6 estão apresentados valores de perfis de  $\beta$  em função do tempo para as diferentes  $RA_f$ . Nela observa-se uma tendência de redução do tempo total do processo de fusão, com a redução dos valores de  $RA_f$ . Isso ocorre devido ao aumento do perímetro da aleta, aumentando, dessa forma, a área de transferência de calor entre a aleta e o PCM. Por exemplo, o tempo para o PCM atingir  $\beta = 0,8$  foi de, aproximadamente, 66 e de 90 min, para  $RA_f = 0,026$  e 0,6, respectivamente.

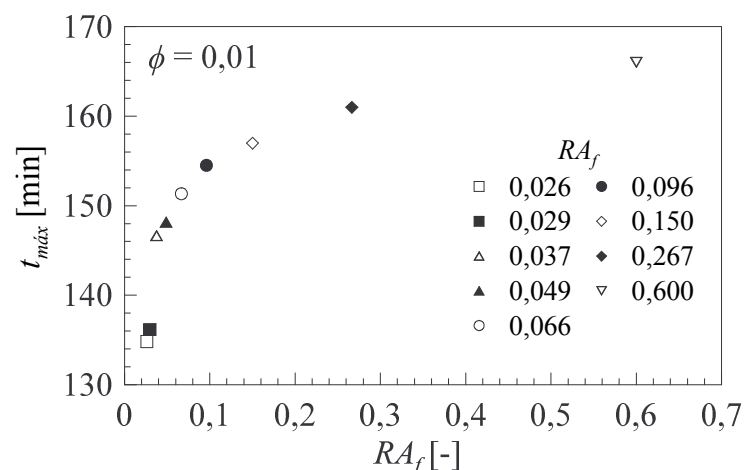
Figura 5.6 -  $\beta$  x tempo para diferentes  $RA_f$ :  
0,026; 0,037; 0,096; 0,267; 0,600



Fonte: o autor (2018).

A Figura 5.7 mostra, para várias  $RA_f$ , o tempo necessário para que o PCM passe da fase sólida para a fase líquida, ou seja, para que atinja a condição de  $\beta = 1$ . Nessa figura observa-se que, quanto menor é o valor da  $RA_f$ , menor é o tempo necessário para o PCM atingir a condição de fusão completa. Enquanto a aleta com  $RA_f = 0,026$  leva, aproximadamente, 135 min para fundir completamente, a aleta com  $RA_f = 0,6$  leva, aproximadamente, 166 min, o que corresponde a uma diferença de, aproximadamente, 19 %. Dessa forma, através dos resultados apresentados, se obteve como  $RA_{opt}$  da aleta, a  $RA_f = 0,026$  para  $\phi$  de 0,01.

Figura 5.7 - Tempo de fusão total para as diferentes  $RA_f$



Fonte: o autor (2018).



### 5.3.2 Conclusões

Esse trabalho apresentou um estudo numérico para análise do processo de fusão de PCM, contido em uma cavidade retangular aletada. O objetivo desse estudo foi determinar a  $RA_{opt}$  da aleta, por meio de otimização geométrica e implementação da teoria construtal, para razões de aspecto de 0,026 até 0,6, com a qual fosse possível obter o menor tempo do processo de fusão do PCM, para a respectiva cavidade.

Verificou-se que os resultados qualitativos e quantitativos estão de acordo com os resultados experimentais apresentados por Kamkari e Shokouhmand (2014), validando, dessa forma, o modelo e metodologia utilizados.

Em relação ao estudo de caso, os resultados preliminares de campos e perfis de fração de líquido em função do tempo revelaram que o processo de fusão de PCM apresentou menor tempo para a menor  $RA_f$  analisada. Nesse caso, obteve-se uma redução de, aproximadamente, 19% no tempo total do processo, da  $RA_f = 0,6$  à 0,026, respectivamente. Dessa forma, obteve-se como  $RA_{opt}$  da aleta a  $RA_f = 0,026$ . Este resultado concorda com resultados encontrados na literatura para problemas com cavidade sólida, onde, para cavidades de baixo valor da fração de área, a razão de aspecto ótima é aquela que penetra quase completamente o sólido conforme Biserni *et al.* (2004).

## 5.4 Artigo II – Estudo numérico para otimização do processo de fusão de material de mudança de fase (PCM) através da variação da razão de aspecto ótima de uma aleta

Esta seção traz os resultados do resumo estendido, que foi submetido e aceito, ao *Constructal Law & Second Law Conference 2019*. Seu conteúdo completo encontra-se no apêndice B.

### 5.4.1 Resultados e discussões

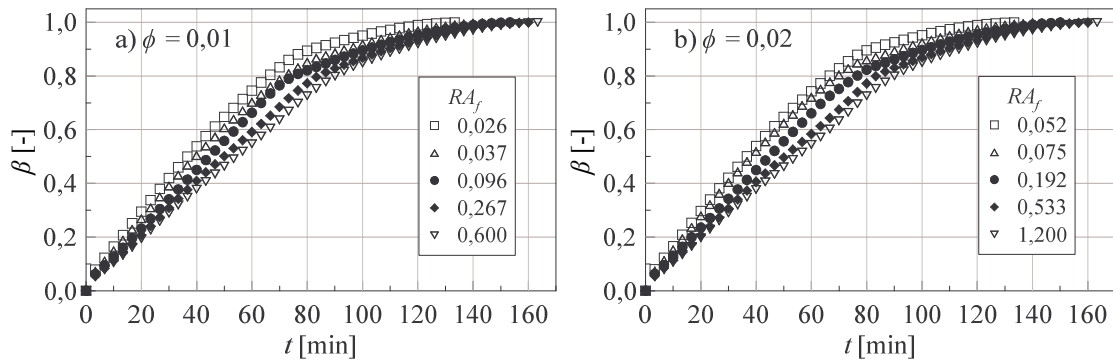
O presente estudo de caso é uma continuação do estudo numérico desenvolvido por Becker *et al.* (2018), onde foram utilizadas malhas computacionais validadas pelo método *GCI*. Como resultado, foram obtidos os índices de 1,9% e 5,5%, entre a malha intermediária e a mais e menos refinada, respectivamente.

As Figura 5.8(a-b) apresentam perfis de fração de líquido ( $\beta$ ) em função do tempo para diferentes  $RA_f$ , para a  $\phi = 0,01$ , Figura 5.8(a), e  $\phi = 0,02$ , Figura 5.8(b). Observa-se, para ambas

$\phi$ , uma tendência de diminuição do tempo total do processo de fusão, ao se diminuir a  $RA_f$  da aleta.

Figura 5.8 -  $\beta$  x tempo para diferentes  $RA_f$  para:

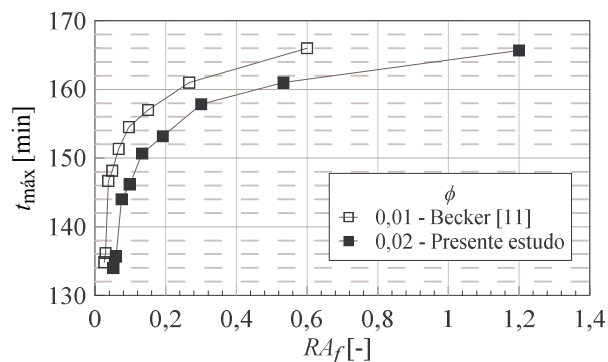
(a)  $\phi$  0,01, adaptado de Becker *et al.* (2018) e (b)  $\phi$  0,02, este estudo



Fonte: o autor (2018).

Na Figura 5.9 são apresentados, para diferentes  $RA_f$ , o tempo para o PCM estar completamente fundido, para as  $\phi$  de 0,01, e 0,02, respectivamente. Nas duas  $\phi$  verifica-se que quanto menor for a  $RA_f$ , menor será o tempo total do processo de fusão, resultando em uma diferença de, aproximadamente, 19% no tempo total, entre a maior e menor  $RA_f$ . Obteve-se como  $RA_{opt}$ , a  $RA_f = 0,026$  e  $0,052$ , para as  $\phi$  de 0,01, e 0,02, respectivamente.

Figura 5.9 - Tempo de fusão total para as diferentes  $RA_f$



Fonte: o autor (2018).

#### 5.4.2 Conclusões

Os resultados mostram que o processo de fusão apresentou menor tempo para as menores  $RA_f$  analisadas, para  $\phi$  de 0,01 e 0,02. Em ambos os casos foram obtidas reduções de, aproximadamente, 19% no tempo total do processo de fusão, entre a maior e a menor  $RA_f$ . Obteve-se como  $RA_{opt}$  da aleta, a  $RA_f = 0,026$  e  $0,052$ , para  $\phi$  de 0,01 e  $\phi$  0,02, respectivamente.

Desta forma, não foram observadas diferenças significativas no processo de fusão do PCM com o aumento da  $\phi$  de 0,01 para 0,02.

### **5.5 Artigo III – Design Construtal para aletas no processo de fusão de material de mudança de fase (PCM) em cavidades retangulares**

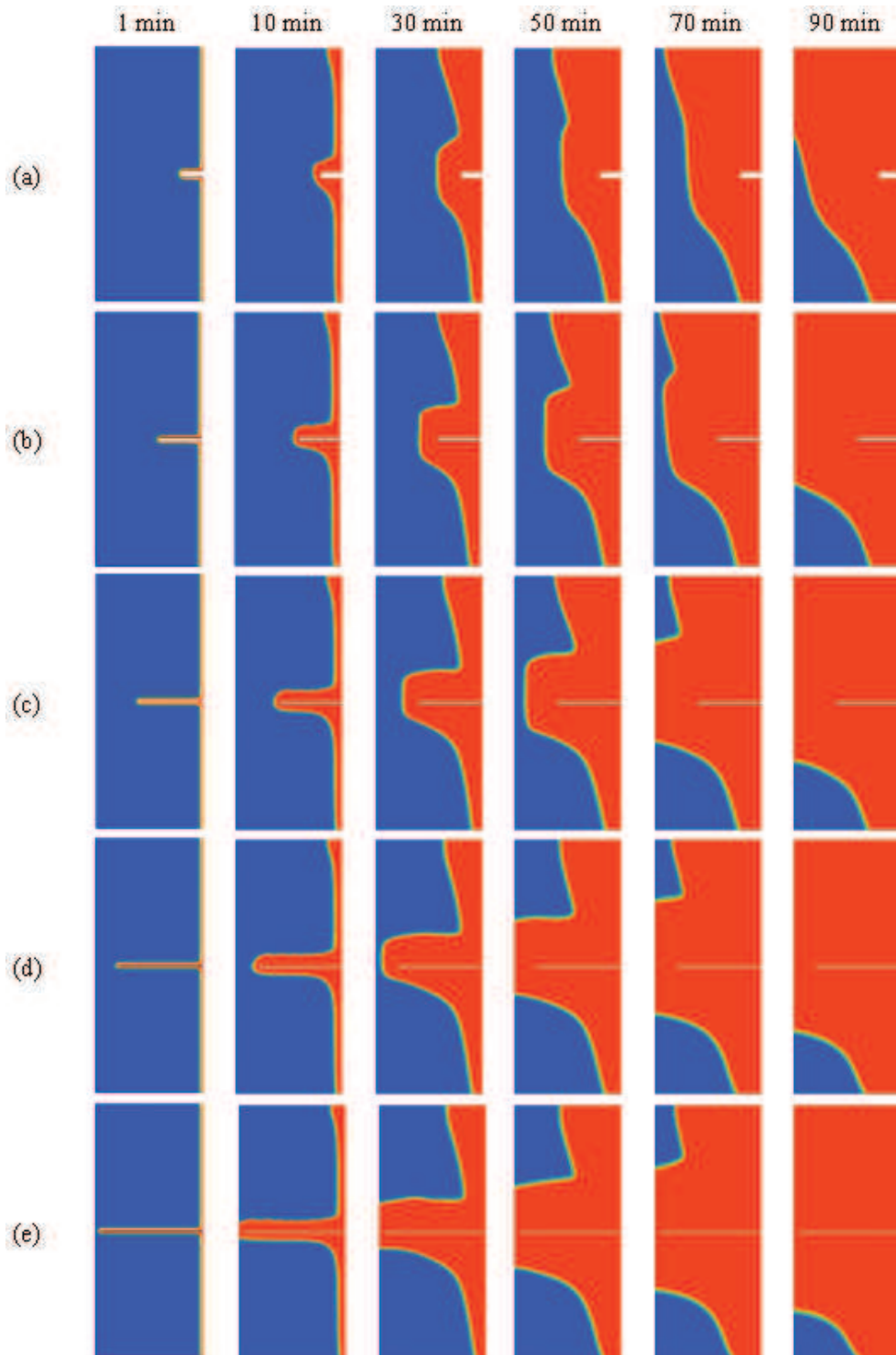
Nesta seção são apresentados os resultados que serão submetidos, em forma de artigo, para um periódico internacional, a ser definido. No apêndice C está o conteúdo completo do mesmo.

#### **5.5.1 Resultados e discussões**

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da  $RA_f$ , para obter a  $RA_{opt}$  e, com isso, minimizar o tempo do processo de fusão. Para alcançar este objetivo, foram testadas 78 configurações de aletas, com  $\phi$  variando entre 0,005 e 0,3 e  $W_f$  variando entre 10 e 48 mm, conforme apresentado na Tabela 4.4.

Nas Figura 5.10(a-e) são apresentados campos de  $\beta$ , para  $\phi = 0,005$ , em  $t = 1, 10, 30, 50, 70$  e  $90$  min, para  $RA_f = 0,300; 0,075; 0,033; 0,019$  e  $0,013$ . Em  $t = 1$  min, nota-se que a camada de PCM fundido está próxima da parede aquecida, apresentando, para as diferentes  $RA_f$ , diferença apenas no contorno da aleta. Nesse instante, quando o PCM se encontra quase que totalmente na fase sólida, o processo de transferência de calor é predominantemente por condução. Este mecanismo prevalece enquanto a interface sólido-líquido permanece próxima da parede. Com o passar do tempo, nota-se que a espessura da camada fundida aumenta e, com isto, há aumento da força de empuxo em relação a força viscosa, o que gera mudança no mecanismo de transferência de calor, que passa a ser, portanto, por convecção natural. Como consequência, ocorre erosão da fase sólida na parte superior da cavidade, na interface sólido-líquido, formando uma curvatura da frente de fusão. Isto pode ser melhor identificado em  $t = 30, 50$  e  $70$  min, para qualquer tamanho de aleta. Nota-se que a variação da  $RA_f$  influencia na camada de PCM fundido e que, passados os instantes iniciais, há uma tendência de aceleração do processo de fusão do PCM com a redução da  $RA_f$ . Para este  $\phi$  (0,005), o processo de fusão ocorreu de forma mais rápida para a menor  $RA_f$ , ou seja,  $RA_f = 0,013$ , e de forma mais lenta para a maior  $RA_f$ , ou seja,  $RA_f = 0,300$ . Este comportamento se deve ao aumento do perímetro da aleta inserido no PCM, na qual aumenta a área de transferência de calor entre a aleta e o PCM.

Figura 5.10 - Campos de  $\beta$ , para  $\phi = 0,005$ , em  $t = 1, 10, 30, 50, 70$  e  $90$  min para: (a)  $RA_f = 0,300$ ; (b)  $RA_f = 0,075$ ; (c)  $RA_f = 0,033$ ; (d)  $RA_f = 0,019$ ; (e)  $RA_f = 0,013$



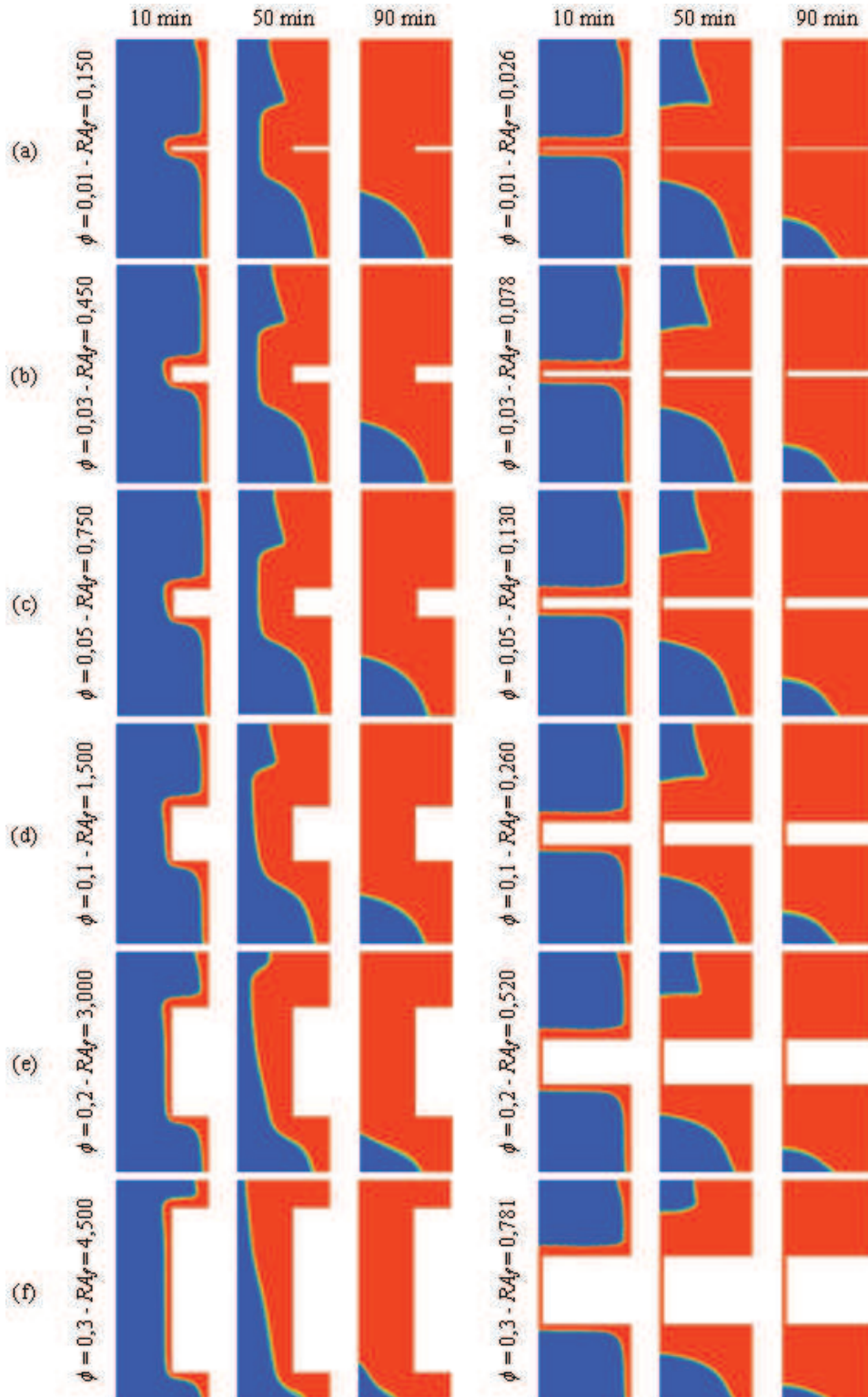
Fonte: o autor (2018).

As Figura 5.11(a-f) apresentam campos de  $\beta$ , para  $W_f = 20$  e  $48$  mm, e  $\phi = 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2$  e  $0,3$ , respectivamente. Nestas figuras, as três primeiras colunas apresentam campo de  $\beta$  para casos com  $W_f = 20$  mm, nos tempos  $t = 10, 50$  e  $90$  min. As três últimas colunas

representam também campos de  $\beta$  para os mesmos instantes de tempo, porém, para  $W_f = 48$  mm.

Figura 5.11 - Campos de  $\beta$  em  $t = 10, 50$  e  $90$  min, para  $W_f = 20$  e  $48$  mm, para:

(a)  $\phi = 0,01$ ; (b)  $\phi = 0,03$ ; (c)  $\phi = 0,05$ ; (d)  $\phi = 0,1$ ; (e)  $\phi = 0,2$ ; (f)  $\phi = 0,3$



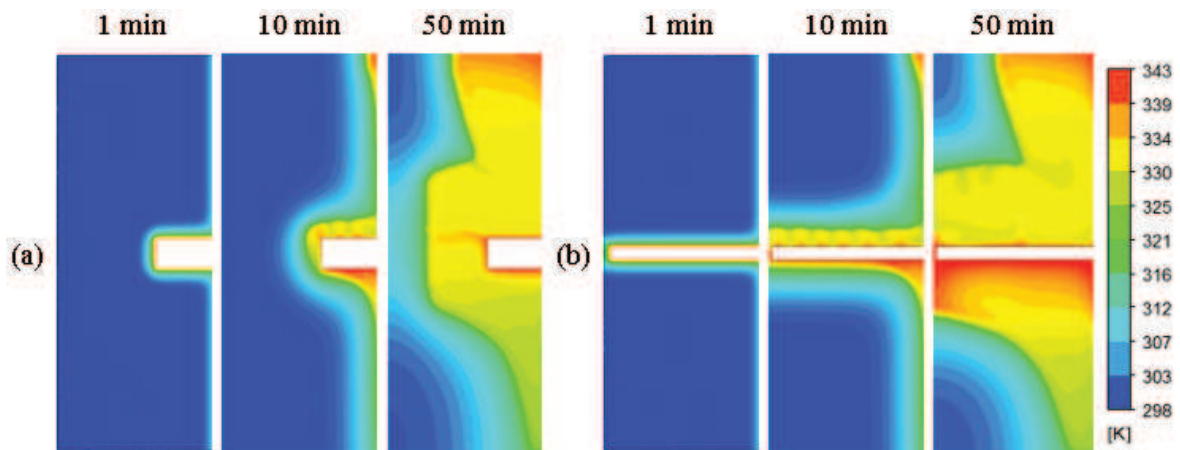
Fonte: o autor (2018).

Nas Figura 5.11(a-f) pode-se observar ainda que os campos de fração de líquido, próximo a parede vertical direita, são semelhantes entre si, em  $t = 10$  min, tanto para  $W_f = 20$  mm quanto para  $W_f = 48$  mm, apresentando fina camada de PCM fundido, para diferentes  $RA_f$  e  $\phi$ .

As Figura 5.12(a-b) apresentam, respectivamente, campos de temperatura para  $RA_f = 0,450$  e  $0,078$ , para  $\phi = 0,03$ , em  $t = 1, 10$  e  $50$  min. Em  $t = 1$  min, observa-se que a camada limite térmica está próxima da parede aquecida e, em  $t = 10$  min e  $50$  min, a mesma já apresenta afastamento desta, o que caracteriza os mecanismos de transferência de calor, citados anteriormente, na Figura 5.10.

Figura 5.12 - Campos de temperatura em  $t = 1, 10$  e  $50$  min, de  $\phi = 0,03$ , para:

(a)  $RA_f = 0,450$  e (b)  $RA_f = 0,078$



Fonte: o autor (2018).

Ainda em relação as Figura 5.12(a-b), pode-se observar duas condições interessantes: forte estratificação térmica nos instantes finais ( $50$  min) e campo de temperatura acima e abaixo da aleta muito diferentes entre si, para os mesmos  $50$  min. As forças de empuxo que surgem em função da variação da massa específica, próxima a parede vertical ativa, faz com que ocorra uma corrente convectiva ascendente, estratificando termicamente o PCM líquido na região superior da cavidade. Condição semelhante é observada na região inferior da aleta, para ambas as  $RA_f$ , o que contribui para a formação da curvatura da frente de fusão. Porém, em  $t = 10$  min e  $50$  min, com a redução de  $RA_f$ , observa-se aumento da estratificação térmica na região abaixo da aleta. Este comportamento tem relação com o aumento do perímetro da aleta, que limita a movimentação das correntes ascendentes até o topo da cavidade, o que contribui para a aceleração do processo de fusão do mesmo. Observa-se também, em  $t = 10$  min, para ambas  $RA_f$ , pequenas variações de temperatura na parte superior da aleta. Estas caracterizam

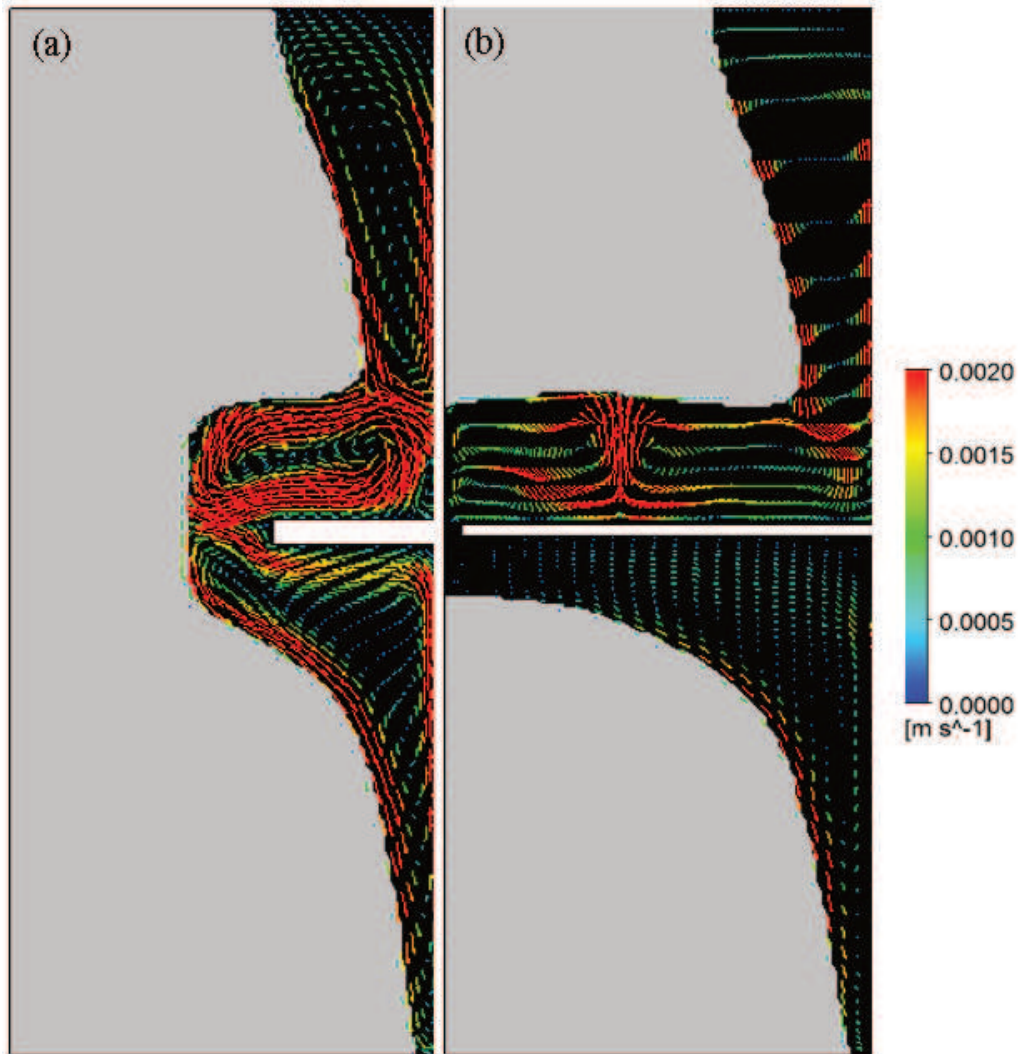
instabilidades da camada fundida e formação da convecção de Rayleigh-Bénard, a ser analisada posteriormente, através dos campos de velocidade. Foram observados, para os demais  $\phi$ , comportamento similar ao descrito para o presente  $\phi$ .

Como visto anteriormente, nos instantes iniciais o processo de fusão é predominantemente condutivo. Com o passar do tempo este passa a ser predominantemente convectivo. Estas condições podem ser verificadas nas Figura 5.13(a, b), as quais mostram campos de velocidade para  $t = 30$  min e  $\phi = 0,01$ , para  $RA_f = 0,150$  e  $0,026$ , respectivamente. Nestas figuras, a cor cinza representa o PCM na fase sólida e a preta na fase líquida, onde está representado o campo de velocidade do respectivo instante de tempo. Nas duas figuras pode-se observar, junto a parede quente (direita), a existência de escoamento ascendente, causado pelo empuxo, decorrente da variação da temperatura da fase líquida. Este empuxo é o responsável pela estratificação térmica apresentada, por exemplo, nas Figura 5.12, para 50 min. Escoamento em sentido inverso ao citado anteriormente ocorre junto a interface sólido líquido, uma vez que a fase líquida cede calor para a fase sólida, reduzindo assim sua massa específica. Estes dois escoamentos formam uma grande recirculação, decorrente da alta temperatura da parede direita em relação a temperatura da fase sólida. Processo semelhante pode ser observado entre a base da cavidade e a base da aleta, provocando nesta região, outra grande recirculação, uma vez que, pela direita tem-se alta temperatura em relação a temperatura da fase sólida, que se encontra na esquerda.

Além das duas grandes recirculações citadas anteriormente, pode-se observar também recirculações situadas muito próximas ao topo da aleta, as quais podem ser também classificadas como convecção de Rayleigh-Bénard, uma vez que o aquecimento se dá pelo topo da aleta. Além disso, com a redução da  $RA_f$ , observa-se uma aceleração do escoamento ascendente acima da aleta, o que pode ser identificado pela maior definição do perfil de velocidades junto a parede vertical direita. Isso ocorre devido ao aumento do perímetro da aleta inserido no PCM e, conseqüentemente, aumento de calor inserido no mesmo.

Figura 5.13 - Campos de velocidade em  $t = 30$  min, para  $\phi = 0,01$ :

(a)  $RA_f = 0,150$ , (b)  $RA_f = 0,026$



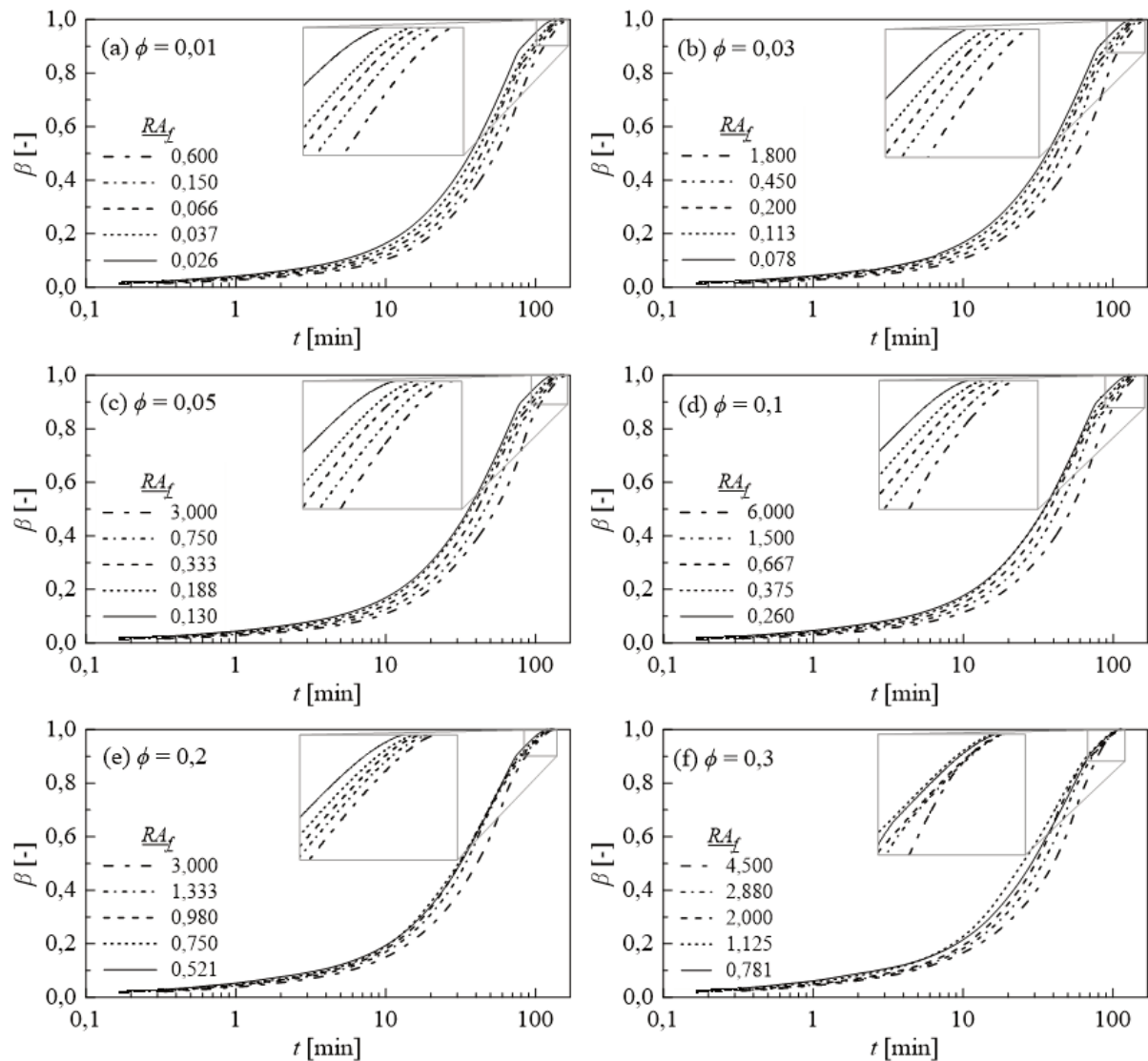
Fonte: o autor (2018).

Nas Figura 5.14(a-f) são apresentadas variações de  $\beta$  em função do tempo, para diferentes  $RA_f$ , e  $\phi = 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2$  e  $0,3$ , respectivamente. Apesar das poucas diferenças, nestas figuras pode-se observar que, quanto maior a  $RA_f$  ( $RA_f = H_f / W_f$ ), maior é o tempo necessário para o PCM fundir completamente ( $\beta = 1$ ), independentemente do valor do  $\phi$ . Uma vez que as maiores  $RA_f$  representam aletas com menor área de troca térmica, é esperado que estas transfiram menos calor por unidade de tempo.



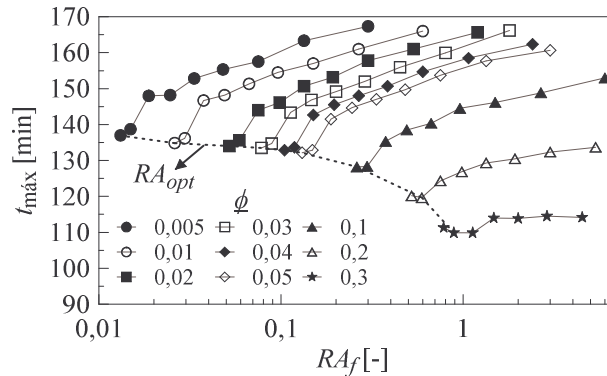
Figura 5.14 - Fração de líquido ( $\beta$ ) x tempo, para diferentes  $RA_f$ :

(a)  $\phi = 0,01$ ; (b)  $\phi = 0,03$ ; (c)  $\phi = 0,05$ ; (d)  $\phi = 0,1$ ; (e)  $\phi = 0,2$  e (f)  $\phi = 0,3$



Fonte: o autor (2018).

A Figura 5.15 mostra quais foram as razões de aspecto ótimas ( $RA_{opt}$ ) obtidas para cada  $\phi$ . Nesta figura, cada símbolo representa o tempo máximo de fusão, para cada um dos 78 casos simulados. Para os  $\phi$  de 0,005 até 0,1, os menores tempos do processo de fusão foram obtidos para as menores  $RA_f$ , representando, portanto, as respectivas  $RA_{opt}$ . Já para  $\phi = 0,2$  e 0,3, o menor tempo ocorreu na segunda menor  $RA_f$ , correspondendo as suas  $RA_{opt}$ . Essas  $RA_{opt}$  estão representadas, na mesma figura, através da curva de  $RA_{opt}$ . Comportamento similar foi verificado por Biserni *et al.* (2004), na qual as  $RA_{opt}$  obtidas, para os menores valores de  $\phi$ , foram aquelas cujas aletas penetraram mais na cavidade. Na Tabela 5.1 são apresentados, respectivamente, os valores das  $RA_{opt}$  obtidas para os diferentes  $\phi$  analisados.

Figura 5.15 - Tempo máximo de fusão de cada aleta, para diferentes  $RA_f$ , de diferentes  $\phi$ 

Fonte: o autor (2018).

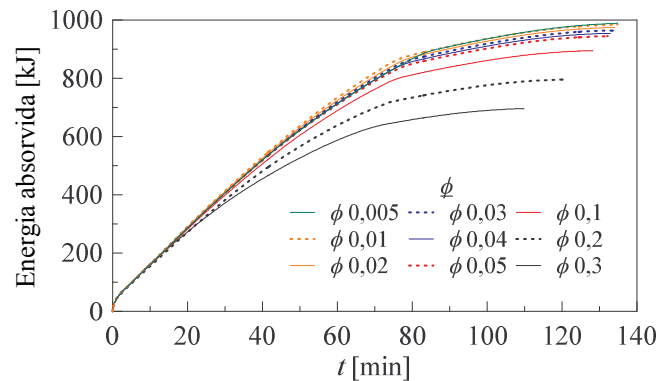
Tabela 5.1 -  $RA_{opt}$  de diferentes  $\phi$ 

$\phi$	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1	0,2	0,3
$RA_{opt}$	0,013	0,026	0,052	0,078	0,104	0,130	0,260	0,592	0,889

Fonte: o autor (2018).

Uma vez que a área da cavidade ( $A$ ) é mantida constante, a área da aleta ( $A_f$ ) aumenta quando a fração de área ( $\phi = A_f/A$ ) aumenta. Com estas condições, o aumento de  $\phi$  implica na redução da quantidade de massa contida na cavidade e conseqüente variação da energia absorvida pela cavidade. Este comportamento pode ser observado na Figura 5.16, a qual apresenta, para diferentes  $\phi$ , a energia total absorvida pela cavidade em função do tempo, para as diferentes  $RA_{opt}$ . Pode-se observar que, conforme  $\phi$  aumenta, ocorre redução da energia absorvida. Como exemplo, para  $\phi = 0,1$  e  $\phi = 0,3$ , em  $t = 100$  min, a energia absorvida em foi de, aproximadamente, 861 kJ e 690 kJ, respectivamente, o que representa uma diferença de, aproximadamente, 20% de energia absorvida. No entanto, para uma variação de  $\phi$  de 10% ( $\phi = 0,005$  e  $\phi = 0,05$ ), em  $t = 100$  min, a energia absorvida foi de, aproximadamente, 935 kJ e 902 kJ, respectivamente, o que representa uma variação de, aproximadamente, 3% de energia absorvida. Com estes resultados pode-se dizer que a redução da energia absorvida é significativa apenas para  $\phi$  maiores que 0,05.

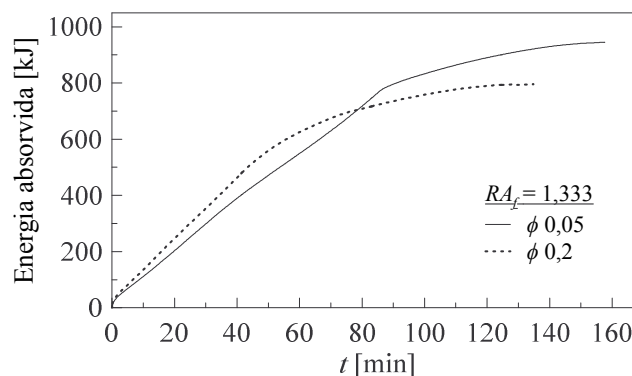
Figura 5.16 - Energia absorvida, para as  $RA_{opt}$ , de diferentes  $\phi$



Fonte: o autor (2018).

Na Figura 5.17 é apresentado a variação da energia absorvida em função do tempo para o caso de  $RA_f = 1,33$  e  $\phi = 0,05$  e  $0,2$ . Observa-se que, com o aumento de  $\phi$ , há redução da energia absorvida, porém, nota-se que nos instantes iniciais há uma maior taxa de absorção de energia. Como exemplo, em  $t = 60$  min, para  $\phi = 0,05$  e  $\phi = 0,2$ , foi absorvido, aproximadamente, 549 kJ e 625 kJ, respectivamente, o que corresponde a uma diferença de, aproximadamente, 12% de energia absorvida. Este comportamento pode ser interessante em aplicações que necessitam de uma elevada taxa de armazenamento em um curto período de tempo. Já nos instantes finais, observa-se comportamento inverso. Em  $t = 120$  min, para  $\phi = 0,05$  e  $0,2$  foi absorvido, aproximadamente, 890 kJ e 790 kJ, respectivamente. Esta variação de 15% na fração de área, corresponde a uma redução de, aproximadamente, 11% na absorção total de energia.

Figura 5.17 - Energia absorvida, para mesma  $RA_f$ , de diferentes  $\phi$



Fonte: o autor (2018).

Os diferentes mecanismos de transferência de calor em um processo de fusão (condução e convecção) podem ser melhor identificados através da variação do número de Nusselt ( $Nu$ ), Eq. (5.1), em função do número de Fourier ( $Fo$ ).

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (5.1)$$

onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor e  $L_c$  é o comprimento característico, obtidos, respectivamente, por:

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_m)\Delta t} \quad (5.2)$$

$$L_c = A^{1/2} \quad (5.3)$$

onde  $Q$  é a quantidade de calor absorvido no intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $A$  é a área de transferência de calor (incluindo parede lateral direita e perímetro da aleta),  $T_w$  é a temperatura da parede e  $T_m$  é a temperatura de fusão do PCM. Já o número de  $Fo$  é obtido conforme Eq. (5.4).

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (5.4)$$

onde  $\alpha$  é a difusividade térmica.

Nas

Figura 5.18(a-f) são apresentados perfis de  $Nu$  em função de  $Fo$ , para diferentes  $RA_f$  e  $\phi = 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2$  e  $0,3$ , respectivamente. Inicialmente pode-se observar que, independentemente dos valores de  $RA_f$  e  $\phi$ , todos os resultados apresentam 3 situações distintas: I – redução acentuada de  $Nu$  nos instantes iniciais; II – valores de  $Nu$  sem grandes variações, apesar das oscilações, na maior parte do processo de fusão e III – redução acentuada de  $Nu$  nos instantes finais.

A baixa resistência térmica da fina camada de PCM fundido junto à parede nos instantes iniciais permite que se caracterize a região I como condutiva. Com o início do processo de fusão, ainda no regime I, ocorre aumento da camada de líquido, o que gera mudança do mecanismo de transferência de calor, de condutivo para convectivo, representado pela região II. No regime II, o número de  $Nu$  continua a reduzir, porém de forma mais lenta. Este comportamento é semelhante ao verificado por Ji *et al.* (2008).

Como visto anteriormente nos campos de velocidade (Figura 5.14), o aquecimento da aleta no topo da mesma faz com que ocorra recirculações do PCM líquido do tipo Rayleigh-Bénard. Estas recirculações provocam oscilações na temperatura daquela região.

Conseqüentemente,  $Nu$  também apresenta flutuações, conforme pode-se verificar na região II da

Figura 5.18. Estas flutuações diminuem à medida que a interface sólido-líquido se afasta da aleta. Este comportamento também foi verificado por Kamkari e Shokouhmand (2014).

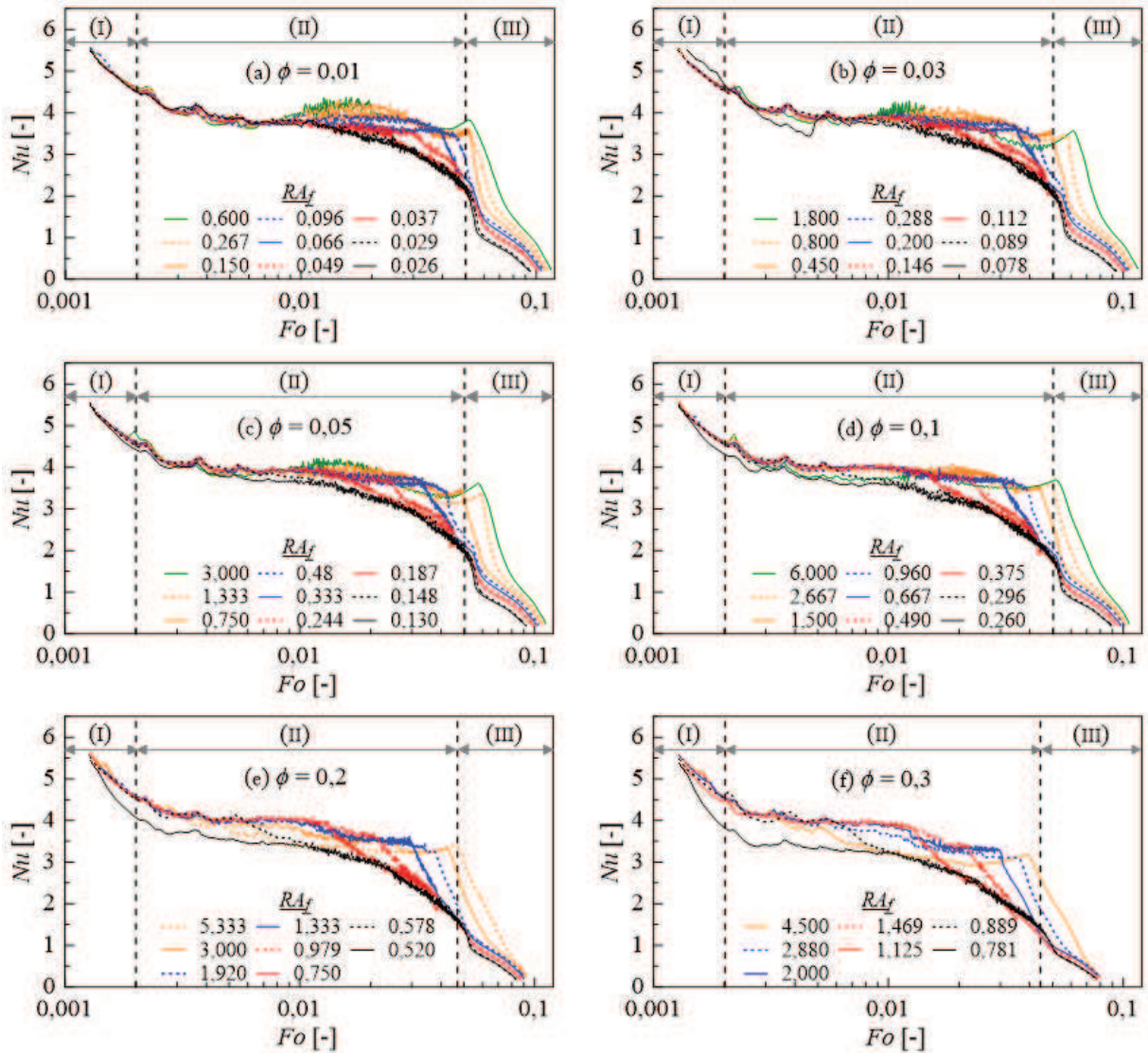
Na região II da

Figura 5.18 também pode ser observado que, quanto menor  $RA_f$  ( $RA_f = H_f / W_f$ ), maior é o tempo de ocorrência das flutuações de  $Nu$ , comentadas anteriormente. Isto ocorre devido ao aumento de  $W_f$ . Além disso, observa-se que, com o aumento de  $\phi$ , há uma redução da amplitude das instabilidades (melhor identificadas na

Figura 5.18(a)). Este fato justifica a redução da diferença dos tempos do processo de fusão com o aumento de  $\phi$ , verificada na análise dos perfis de fração de líquido. Nos instantes finais (região III) nota-se que o número de  $Nu$  volta a apresentar uma redução mais acentuada, devido à redução da taxa de transferência de calor, oriunda do enfraquecimento das correntes de convecção. Percebeu-se também que, para todos os  $\phi$  analisados, os casos com menor  $Nu$  foram aqueles que apresentaram processo de fusão mais rápido.

Figura 5.18 - Número de  $Nu$  em função do número de  $FO$ , de diferentes  $RA_f$ , para:

(a)  $\phi = 0,01$ ; (b)  $\phi = 0,03$ ; (c)  $\phi = 0,05$ ; (d)  $\phi = 0,1$ ; (e)  $\phi = 0,2$ ; (f)  $\phi = 0,3$



Fonte: o autor (2018).

### 5.5.2 Conclusões

Este estudo apresentou uma análise da influência da razão de aspecto de aletas em uma cavidade retangular, durante o processo de fusão do PCM ácido láurico. Os resultados foram obtidos através de simulação numérica por CFD. Com o método *Design Constructal* foram obtidas as razões de aspecto ótimas das aletas, as quais minimizaram o tempo máximo do processo de fusão.

Os resultados revelaram que, no processo de fusão do PCM em cavidade aletada, para qualquer fração de área analisada, quanto maior a razão de aspecto da aleta, maior é o tempo necessário para o processo atingir fusão completa, devido à redução da área e consequente redução da quantidade de calor transferido.

Também foi possível verificar que, quanto maior a fração de área, para um mesmo valor de razão de aspecto, menor é o tempo total do processo de fusão. Além disso, foi observado que, para cada fração de área, a redução dos valores da razão de aspecto também reduz o tempo necessário para o processo atingir fusão completa.

## REFERÊNCIAS

ABHAT, A. Short term thermal energy storage. **Revue de Physique Appliquee**, v. 15 (3), p. 477-501, 1980.

ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. **Solar Energy**, v. 30 (4), p. 313-332, 1983.

AGYENIM, F.; HEWITT, N.; EAMES, P.; SMYTH, M. A review of materials, heat and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 615-628, 2010.

AKEIBER, H.; NEJAT, P.; MAJID, M. Z. A.; WAHID, M. A.; JOMEHZADEH, F.; FAMILI, I. Z.; CALAUTIT, J. K.; HUGHES, B. R.; ZAKI, S. A. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1470-1497, 2016.

ALMOGBEL, M.; BEJAN, A. Conduction trees with spacings at the tips. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 42, p. 3739-3756, 1999.

ASSIS, E.; KATSMAN L.; ZISKIND G.; LETAN R. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, p. 1790-1804, 2007.

BABY, R.; BALAJI, C. Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, p. 1642-1649, 2012.

BABY, R.; BALAJI, C. Thermal optimization of PCM based pin fin heat sinks: An experimental study. **Applied Thermal Engineering**, v. 54, p. 65-77, 2013.

BECKER, F.; OLIVESKI, R. C.; ROCHA, L. A. O.; MENDES, A.; COSTA, P. V. Estudo numérico para obtenção da razão de aspecto ótima de uma aleta no processo de fusão de material de mudança de fase (PCM). In: CONFERÊNCIA SUL EM MODELAGEM COMPUTACIONAL, 8º, 2018, Rio Grande. **MCSul**. Rio Grande: FURG, 2018b.

BEJAN, A. Constructal-theory network of conducting paths for cooling a heat generating volume. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 40, p. 799-816, 1997.

BEJAN, A. **The Physics of Life, The Evolution of Everything**, St. Martin's Press, 2016.

BEJAN, A.; LORENTE, S. Constructal law of design and evolution: Physics, biology, technology, and society. **Journal of Applied Physics**, v. 113, p. 151301, 2013.

BEJAN, A.; LORENTE, S. **Design with Constructal Theory**, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

BEJAN, A.; LORENTE, S. The constructal law and the evolution of design in nature. **Physics of Life reviews**, v. 8, p. 209-240, 2011.



BEJAN, A.; ROCHA, L. A. O.; LORENTE, S. Thermodynamic optimization of geometry: T- and Y-shaped constructs of fluid streams. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 39, p. 949-960, 2000.

BEJAN, A.; ZANE, J. P. **Design in Nature: how the constructal law governs evolution in biology, physics, technology, and social organization**. 1ª Edição, Doubleday, 2012.

BISERNI, C.; ROCHA, L. A. O.; BEJAN, A. Inverted fins: geometric optimization of the intrusion into a conducting wall. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, p. 2577-2586, 2004.

BRENT, A. D.; VOLLER, V. R.; REID, K. J. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal. **Numerical Heat Transfer**, v. 13, p. 297-318, 1988.

CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; FREITAS, C. J.; COLEMAN, H.; RAAD, P. E. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, 2008.

CHIDAMBARAM, L. A.; RAMANA, A. S.; KAMARAJ, G.; VELRAJ, R. Review of solar cooling methods and thermal storage options. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 3220-3228, 2011.

CHUAH, T. G.; ROZANNA D.; SALMIAH, A.; THOMAS, C. S. Y.; SA'ARI, M. Fatty acids used as phase change materials (PCMs) for thermal energy storage in building material applications. **JURUTERA**, p. 8-15, 2006.

DABIRI, S.; MEHRPOOYA, M.; NEZHAD, E. G. Latent and sensible heat analysis of PCM incorporated in a brick for cold and hot climatic conditions, utilizing computational fluid dynamics. **Energy**, v. 159, p. 160-171, 2018.

DEVAHASTIN, S.; PITAKSUTIYARAT, S. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, p. 1705-1713, 2006.

DHAIDAN, N. S.; KHODADADI, J. M.; AL-HATTAB, T. A.; AL-MASHAT, S. M. Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 66, p. 672-683, 2013.

DINÇER, I.; HAMUT, H. S.; JAVANI, N. **Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems**. 1ª ed. Chichester, United Kingdom, WILEY, 2017.

FARID, M. M.; KHUDHAIR, A. M.; RAZACK, S. A. K.; AL-HALLAJ, S. A review on phase change energy storage: materials and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 1597-1615, 2004.

FUKAI, J.; KANOU, M.; KODAMA, Y.; MIYATAKE, O. Thermal conductivity enhancement of energy storage media using carbon fibers. **Energy Conversion & Management**, v. 41, p. 1543-1556, 2000.

GRACIA, A.; CABEZA, L. F. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. **Energy and Buildings**, v. 103, p. 414-419, 2015.

GUO, S.; LIU, Q.; SUN, J.; JIN, H. A review on the utilization of hybrid renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 1121-1147, 2018.

HASNAIN, S. M. Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, part I: Heat Storage Materials and Techniques. **Energy Conversion and Management**, v. 39, p. 1127-1138, 1998.

HOSSEINI, M. J.; RANJBAR, A. A.; RAHIMI, M.; BAHRAMPOURY, R. Experimental and numerical evaluation of longitudinally finned latent heat thermal storage systems. **Energy and Buildings**, v. 99, p. 263-272, 2015.

IBRAHIM, N. I.; AL-SULAIMAN, F. A.; RAHMAN, S.; YILBAS, B. S.; SAHIN, A. Z. Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 26-50, 2017.

JAGUEMONT, J.; OMAR N.; BOSSCHE, P. V.; MIERLO, J. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. **Applied Thermal Engineering**, v. 132, p. 308-320, 2018.

KALBASI, R.; SALIMPOUR, M. R. Constructal design of phase change material enclosures used for cooling electronic devices. **Applied Thermal Engineering**, v. 84, p. 339-349, 2015.

KALNAES, S. E.; JELLE, B. P. Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 150-176, 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.

KAMKARI, B.; SHOKOUHMAND, H.; BRUNO, F. Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 72, p. 186-200, 2014.

KHAN, M. M.; SAIDUR, R.; AL-SULAIMAN, F. A. A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 105-137, 2017.

KHAN, Z.; KHAN, Z.; GHAFOR, A. A review of performance of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. **Energy Conversion and Management**, v. 115, p. 132-158, 2016.

KATSMAN, L.; DUBOVSKY, V.; ZISKIND, G.; LETAN, R. Experimental investigation of solid-liquid phase change in cylindrical geometry. In: 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference, Vancouver, Canadá, 2007.

- LEDUCQ, D.; NDOYE, F. T.; ALVAREZ, G. Phase change material for the thermal protection of ice cream during storage and transportation. **International Journal of Refrigeration**, v. 52, p. 133-139, 2015.
- LIZANA, J.; CHACARTEGUI, R.; BARRIOS-PADURA, A.; VALVERDE, J. M. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review. **Applied Energy**, v. 203, p. 219-239, 2017.
- LORENTE, S.; BEJAN, A. Svelteness, freedom to morph, and constructal multi-scale flow structures. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 44, p. 1123-1130, 2005.
- LORENTE, S.; BEJAN, A.; NIU, J. L. Constructal design of latent thermal energy storage with vertical spiral heaters. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 81, p. 283-288, 2015.
- MEHLING, H.; CABEZA, L. F. **Heat and cold storage with PCM – An up to date introduction into basics and applications**, Springer, 2008.
- MOALLEMI, M. K.; WEBB, B. W.; VISKANTA, R. An Experimental and Analytical Study of Close-Contact Melting. **Journal of Heat Transfer**, v. 108, p. 894-899, 1986.
- NOMURA, T.; OKINAKA, N.; AKIYAMA, T. Technology of Latent Heat Storage for High Temperature Application: A Review. **ISIJ International**, v. 50, p. 1229-1239, 2010.
- PAL, D.; JOSHI, Y. K. Melting in a side heated tall enclosure by a uniformly dissipating heat source. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 44, p. 375-387, 2001.
- PIELICHOWSKA, K.; PIELICHOWSKI, K. Phase change materials for thermal energy storage. **Progress in Materials Science**, v. 65, p. 67-123, 2014.
- RAZERA, A. L.; FONSECA, R. J. C.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; BISERNI, C. 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.
- REDDY, K. S.; MUDGAL, V.; MALLICK, T. K. Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management. **Journal of Energy Storage**, v. 15, p. 205-227, 2018.
- ROCHA, L. A. O.; LORENTE, S.; BEJAN, A. **Handbook of Thermal Science and Engineering**. Springer, 2017.
- SAS IP, Inc. ANSYS Fluent 16.1 Theory Guide, 2015.
- SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, D. Review on thermal storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 318-345, 2009.

SHMUELI, H.; ZISKIND, G.; LETAN, R. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, p. 4082-4091, 2010.

SHOKOUHMAND, H.; KAMKARI, B. Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 50, p. 201-212, 2013.

SILVEIRA, A. M.; DAL-RI, I.; OLIVESKI, R. D. C. Análise da fusão do PCM ácido láurico em cavidade retangular com aleta horizontal. In: CONFERÊNCIA SUL EM MODELAGEM COMPUTACIONAL, 7<sup>a</sup>, 2016, Rio Grande. **MCSul**. Rio Grande: FURG, 2016b.

SOARES, N.; COSTA, J. J.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 82-103, 2013.

SOUAYFANE, F.; FARDOUN, F.; BIWOLE, P.H. Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 396-431, 2016.

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

TAN, F. L.; FOK, S. C. Melt Fraction Estimation Using Solid Modeling for Melting Inside a Sphere. **Computer Applications in Engineering Education**, v. 18 (2), p. 290-297, 2010.

VALERI, D.; MEIRELLES, A. J. A. Viscosities of Fatty Acids, Triglycerides, and Their Binary Mixtures. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 74, p. 1221-1226, 1997.

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

ZHANG, H.; BAEYENS, J.; CÁCERES, G.; DEGRÈVE, J.; LV, Y. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 53, p. 1-40, 2016.

ZHU, N.; MA, Z.; WANG, S. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 3169-3181, 2009.

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.

## APÊNDICE A – ARTIGO I – SUBMETIDO AO 8ºMCSUL

### ESTUDO NUMÉRICO PARA OBTENÇÃO DA RAZÃO DE ASPECTO ÓTIMA DE UMA ALETA NO PROCESSO DE FUSÃO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM)

**Resumo:** Com a crescente utilização de fontes de energia renováveis, diversos estudos sobre a utilização de materiais de mudança de fase (PCM) ganharam destaque mundial. Muitos destes estudos concentram-se na utilização de PCM contidos em cavidades, as quais podem ser utilizadas em diversos sistemas, tais como: sistemas eletrônicos, de secagem de alimentos, condicionadores de ar, etc. Para uma cavidade retangular aletada internamente, contendo o PCM ácido láurico em processo de fusão, este trabalho tem por objetivo verificar a influência da razão de aspecto da aleta, bem como, por otimização geométrica, determinar a razão de aspecto ótima, a qual minimizará o tempo do processo de fusão do PCM. Para os casos estudados, a aleta encontra-se posicionada horizontalmente no centro da parede direita da cavidade, sendo suas dimensões alteradas através da variação da sua razão de aspecto, para uma fração de área de 0,01. As simulações numéricas foram realizadas no software ANSYS Fluent, com o modelo matemático baseado nas equações da conservação da massa, quantidade de movimento e conservação da energia. Para o processo de mudança de fase utilizou-se o modelo entalpia-porosidade. Os modelos matemático e numérico foram validados com base em resultados experimentais obtidos da literatura. As malhas computacionais foram avaliadas através do método GCI, onde obteve-se um índice de 1,9 % em relação a malha utilizada. Os resultados preliminares obtidos de fração de líquido em função do tempo mostraram que houve uma redução de, aproximadamente, 19 % no tempo total do processo de fusão do PCM, entre as razões de aspecto de 0,026 e 0,6, respectivamente. Dessa forma, para este estudo, obteve-se a menor razão de aspecto como razão de aspecto ótima para a aleta.

**Palavras-chave:** Material de mudança de fase (PCM). Simulação numérica. Otimização. Razão de aspecto.

#### 1. Introdução

Com o crescente uso de fontes de energia renováveis, estudos com materiais de mudança de fase (PCM - *Phase Change Material*) apresentam grande importância no cenário mundial. Muitos estudos são direcionados à sua aplicabilidade em cavidades, que podem ser utilizadas

em diversos tipos de sistemas. Como exemplo, têm-se sistemas eletrônicos, sistemas de secagem de alimentos, sistemas de condicionadores de ar, entre outros.

A aplicação de PCM em sistemas de condicionadores de ar baseia-se na coleta do ar frio durante o período da noite, para posterior troca de calor com o ar quente do ambiente, durante o dia. Dessa forma, a energia necessária para o resfriamento de ar é reduzida, melhorando a eficiência do sistema de ar condicionado (Zalba *et al.*, 2003).

Pesquisas a respeito da utilização de PCM para melhor aproveitamento de energia térmica, no processo de secagem de batata doce foram alvo de estudo por parte de Devahastin e Pitaksuriyarat (2006). Esse trabalho consistiu na comparação entre a economia de energia no processo, para diferentes velocidades de entrada de ar no sistema, que tinha como componentes um aquecedor de ar, uma cavidade cilíndrica com PCM e a câmara de secagem, respectivamente. Durante os períodos de maior exposição ao sol, o PCM absorve a energia em excesso, para que quando esta diminua, o processo possa ter continuidade. Os resultados apontaram que foi obtida uma economia de até 40%, com a menor velocidade estudada por eles.

Conforme estudo de Kalbasi e Salimpour (2015), cavidades contendo PCM podem ser utilizadas para resfriamento de sistemas eletrônicos. Nesse estudo, os autores buscaram determinar o maior tempo de operação do sistema, sem que fosse obtida a temperatura crítica de operação. Há estudos que analisam a aplicabilidade de PCM em cavidades contendo aletas, como o estudo desenvolvido por Kamkari e Shokouhmand (2014), onde foi analisado o processo de fusão de PCM contido em uma cavidade retangular, com e sem aletas. Nessa análise, os autores observaram que havendo a inclusão de aletas, há uma redução no tempo do processo de fusão do PCM.

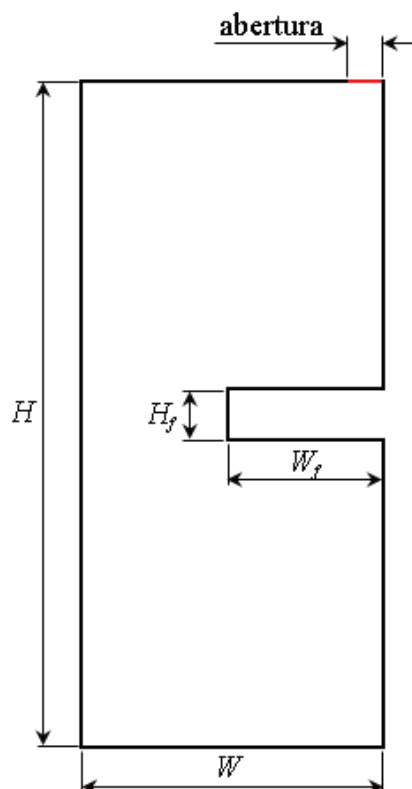
Outros estudos sobre o comportamento de PCM em cavidades buscam aliar conceitos da Teoria Construtal, caracterizada pela obtenção de fluxos naturais mais eficientes (Lorente *et al.*, 2015), para otimização das mesmas. Esses estudos se relacionam a essa teoria através de relações de sua geometria, para obtenção de fluxos mais próximos aos eficientes. Como exemplo, as considerações feitas por Kalbasi e Salimpour (2015), a respeito da análise do comportamento do processo de fusão de PCM através da inclusão de aletas, visando obter o número ótimo de aletas e suas razões de aspecto, no intuito de se obter a temperatura que maximiza o processo de fusão do PCM. Nesse estudo, os autores concluíram que quanto maior o número de aletas, menores podem ser seus comprimentos e que as menores razões de aspecto apresentaram melhor desempenho.

Para uma cavidade retangular aletada internamente, contendo o PCM ácido láurico em processo de fusão, este trabalho tem por objetivo verificar a influência da razão de aspecto da aleta, bem como, por otimização geométrica, por meio do método de pesquisa e implementação da teoria construtal, determinar a razão de aspecto ótima ( $RA_{opt}$ ), a qual minimizará o tempo do processo de fusão do PCM.

## 2. Apresentação do Problema

A cavidade estudada apresenta geometria retangular aletada, conforme Figura 1, preenchida com PCM ácido láurico, inicialmente no estado sólido. A mesma possui largura ( $L$ ) de 50 mm e altura ( $H$ ) de 120 mm. A aleta possui largura  $W_f$  e altura  $H_f$ , e está posicionada horizontalmente no centro da parede direita da cavidade. Na parede superior há uma abertura de 2 mm, rente à parede direita, para simulação da saída do PCM durante o processo de fusão.

Figura 1 - Desenho esquemático do problema



Para o PCM ácido láurico, os valores do calor específico ( $c_p$ ), calor latente de fusão ( $L$ ), massa específica ( $\rho$ ) e temperaturas do sólido ( $T_s$ ) e líquido ( $T_l$ ), respectivamente, estão apresentados na Tab. 1. Os valores da condutividade térmica ( $k$ ) e da viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) estão apresentados nas Tab. 2 e Tab. 3, respectivamente.

Tabela 1 - Propriedades termofísicas do ácido láurico

$c_p$ [J/(kg K)]		$L$ [J/kg]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		$T$ [K]	
$s$	$l$		$s$	$l$	$s$	$l$
2180	2390	187210	940	885	316,65	321,35

Fonte: KAMKARI e SHOKOUMAND (2014).

Tabela 2 - Condutividade térmica do ácido láurico

$T$ [K]	293	303	313	323	328	333	338	343
$k$ [W/(m K)]	0,161	0,159	0,158	0,145	0,143	0,142	0,139	0,138

Fonte: SHOKOUMAND e KAMKARI (2013).

Tabela 3 - Viscosidade dinâmica do ácido láurico

$T$ [K]	321,2	322	333	344	355	372	383
$\mu$ [kg/(m s)]	0,00760	0,00747	0,00542	0,00428	0,00338	0,00250	0,00210

Fonte: VALERI e MEIRELLES (1997).

### 3 Abordagem Teórica

A abordagem teórica é desenvolvida através de duas metodologias: simulação numérica por CFD e otimização geométrica através da aplicação do método de pesquisa, com a utilização da Teoria Construtal, as quais são apresentadas na sequência.

#### 3.1 Simulação Numérica

O modelo matemático consiste na equação da conservação da massa, conforme Eq. (1), quantidade de movimento, conforme Eq. (2) e conservação de energia, conforme Eq. (3), acrescidas do modelo de mudança de fase.

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla(\mu \nabla \vec{V}) - \nabla p + \rho g + S \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \lambda) + \nabla(\rho \vec{V} \lambda) = \nabla(k \nabla T) \quad (3)$$



onde  $\vec{V}$  é o vetor velocidade,  $t$ , o tempo,  $p$ , a pressão,  $\vec{g}$ , a aceleração da gravidade,  $S$ , o termo fonte e  $\lambda$ , a entalpia total, obtida pela soma da variação da entalpia na mudança de fase ( $\lambda_L$ ) e pela entalpia sensível ( $\lambda_{se}$ ), obtida através da Eq. (4) (SHMUELI *et al.*, 2010).

$$\lambda_{se} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (4)$$

onde  $\lambda_{ref}$  é a entalpia na temperatura de referência ( $T_{ref}$ ). Já a entalpia na mudança de fase é calculada pela Eq. (5).

$$\lambda_L = \beta L \quad (5)$$

O modelo de mudança de fase é o da entalpia-porosidade, o qual trata a zona de interface sólido-líquido (mushy zone) como uma zona porosa, sendo o termo  $S$  descrito conforme a Eq. (6) (ASSIS *et al.*, 2007).

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} C \vec{V} \quad (6)$$

onde  $\beta$  é a fração líquida,  $\varepsilon$  é uma constante de valor 0,001, utilizada para evitar divisão por zero e  $C$  é a constante da zona porosa, dependente da morfologia da zona porosa (VOLLER & PRAKASH, 1987). A fração líquida durante o processo de mudança de fase é obtida através da Eq. (7).

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ T - T_s / T_l - T_s & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (7)$$

Os softwares utilizados para este estudo foram: ANSYS ICEM<sup>®</sup>, para criação das malhas computacionais, ANSYS FLUENT<sup>®</sup>, para realização das simulações numéricas e ANSYS CFD-Post<sup>®</sup>, para realização do pós-processamento. Na correção da pressão foi utilizado o esquema *PRESTO* e no acoplamento da pressão-velocidade o esquema *SIMPLE*. Nas equações de energia e quantidade de movimento foi utilizado *First Order Upwind*, com critério de convergência  $10^{-8}$  para energia e  $10^{-5}$  para velocidade e continuidade.

As paredes inferior, superior e esquerda da cavidade foram consideradas adiabáticas. Já a condição de contorno da aleta e da parede direita foi de temperatura prescrita e uniforme:  $T_a$

= 343 K. A condição inicial do PCM foi:  $T_i = 298$  K. Para a abertura de 2 mm foi utilizada condição de *Pressure Outlet*, com temperatura de 343 K.

### 3.2 Otimização

A otimização geométrica da aleta será determinada através do método de pesquisa com a aplicação da Lei Construtal. Pela utilização desta, as melhores configurações poderão ser obtidas com a determinação dos melhores fluxos (LORENTE *et al.*, 2015). Dessa forma, para este estudo, a geometria da aleta que caracteriza o melhor fluxo é a que apresenta o menor tempo do processo de fusão, o que resultará na razão de aspecto ótima ( $RA_{opt}$ ). Para obtenção desta, diferentes razões de aspecto de aleta ( $RA_f$ ) são analisadas. A razão de aspecto da aleta ( $RA_f$ ) é a razão entre a  $H_f$  e  $W_f$  ( $RA_f = H_f / W_f$ ), para uma fração de área ( $\phi$ ) de 0,01. A fração de área é a razão entre a área da aleta e a área da cavidade ( $\phi = A_f / A$ ), sendo as áreas constantes e iguais a  $60 \text{ mm}^2$  e  $6000 \text{ mm}^2$ , respectivamente. As dimensões da aleta, com suas respectivas  $RA_f$ , estão expostas na Tab. 4.

Tabela 4 - Dimensões da aleta

$W_f$ [mm]	10	15	20	25	30	35	40	45	48
$H_f$ [mm]	6,00	4,00	3,00	2,40	2,00	1,71	1,50	1,33	1,25
$RA_f$ [-]	0,600	0,267	0,150	0,096	0,066	0,049	0,037	0,029	0,026

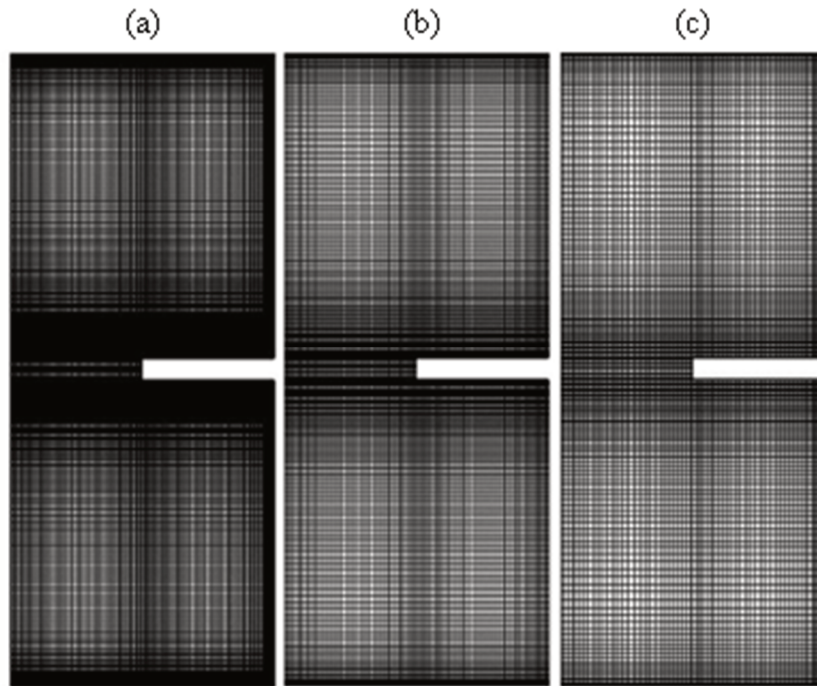
## 4 Resultados e Discussões

Os resultados aqui apresentados dizem respeito à validação numérica e ao estudo de caso proposto.

### 4.1 Validação Numérica

A validação numérica foi realizada com base no estudo experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014). Inicialmente foram criadas três malhas computacionais, contendo: 28457, 14520 e 10118 elementos, representadas na Figura 2. A análise da independência de malha foi realizada pelo método *GCI* (CELIK *et al.*, 2008). Através desse método, foi realizado o comparativo entre a malha intermediária com a mais refinada e menos refinada, o que resultou em 1,9% e 5,5%, respectivamente. Dessa forma, a malha selecionada foi a intermediária, que contém 14520 elementos.

Figura 2 - Malhas computacionais: (a) 28457, (b) 14520 e (c) 10118 elementos



As Figuras 3(a-d) apresentam campos de fração de líquido ( $\beta$ ) para os tempos de 10 e 30 min, respectivamente, obtidos por Kamkari e Shokouhmand (2014), Figuras 3 (a, c), e o presente estudo, Figuras 3 (b, d). As cores branca e azul representam o PCM no estado sólido e as cores preta e vermelha representam o PCM no estado líquido. Comparando-se os resultados experimentais e numéricos, tanto para o  $t = 10$  min quanto para o  $t = 30$  min, observa-se uma boa concordância entre os campos de fração de líquido.

Na Figura 4 são apresentados perfis de  $\beta$  ao longo do tempo, obtidos pelo presente estudo e resultados experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014). Ao longo do tempo, o erro médio, para o afastamento entre resultados foi de, aproximadamente, 5,4%, enquanto que o máximo afastamento foi de, aproximadamente, 6,3%, para  $\beta = 0,856$  e  $t = 110$  min.

Figura 3 - Campos de  $\beta$  para  $t = 10$  e  $30$  min para:  
 (a) experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014), (b) este estudo, (c) experimental de  
 Kamkari e Shokouhmand (2014) e (d) este estudo

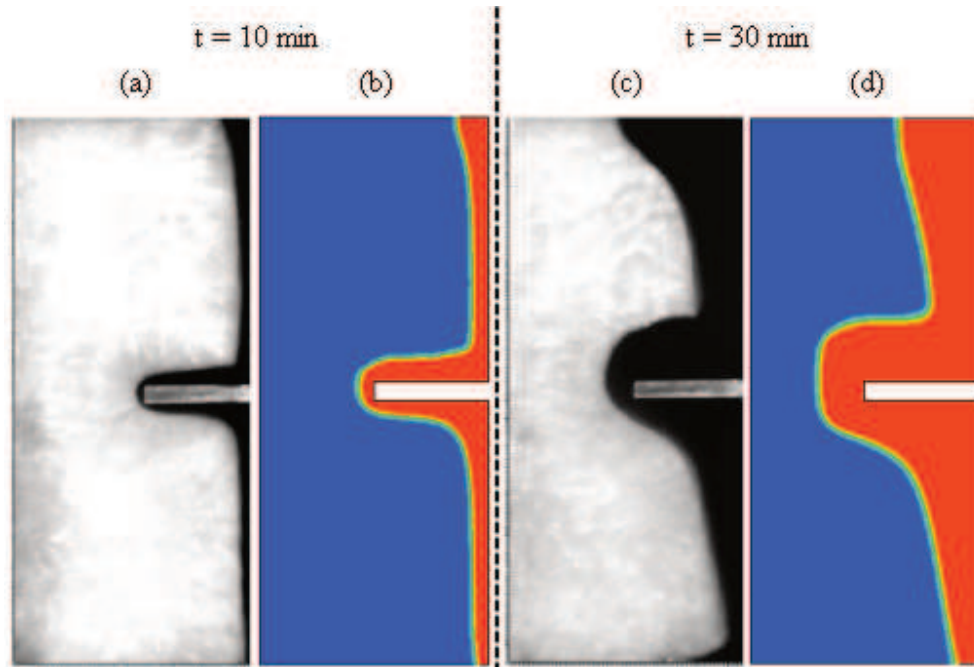
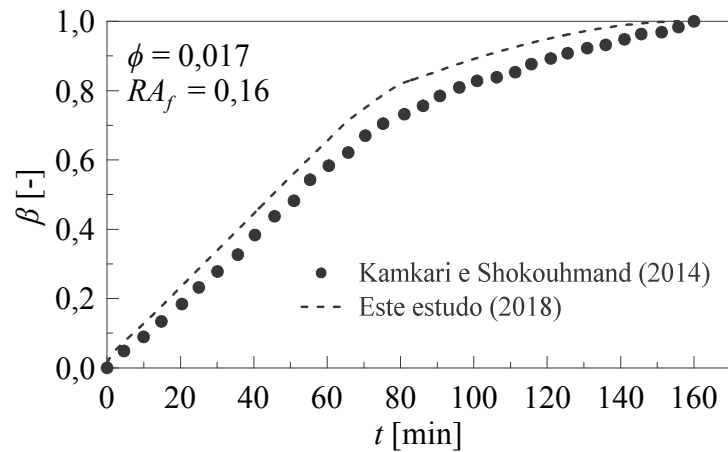


Figura 4 –  $\beta$  pelo tempo: experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014) e este estudo



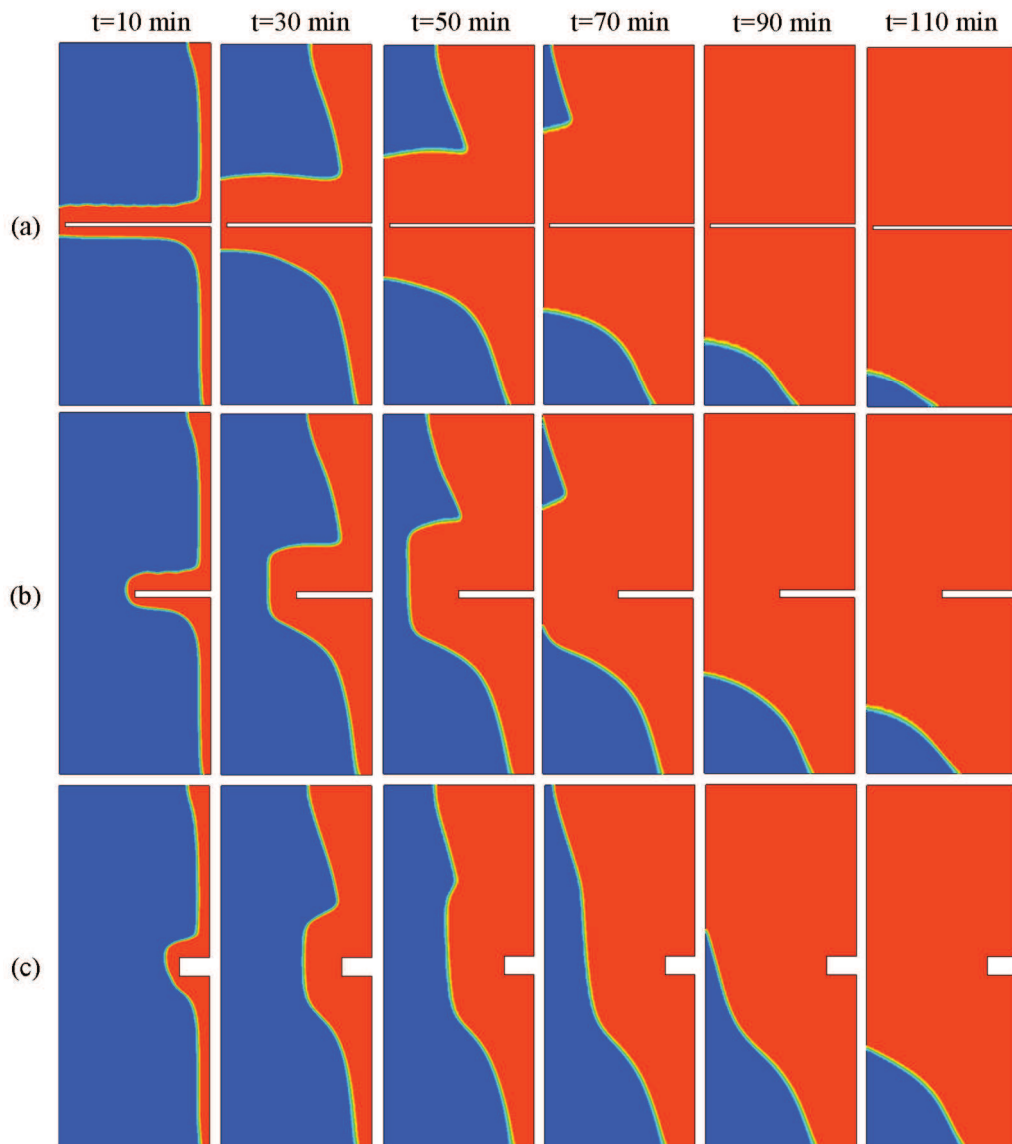
Considerando-se a boa concordância entre os resultados experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014) e os numéricos do presente trabalho, tanto na forma qualitativa (Figura 3) quanto quantitativa (Figura 4), considera-se então o modelo validado e apto a ser utilizado para o Estudo de Caso.

## 4.2 Estudo de Caso

As Figuras 5(a-c) apresentam campos de  $\beta$  para tempos de 10, 30, 50, 70, 90 e 110 min, para três tamanhos de aletas. Pode-se observar que, para qualquer tempo, a fusão ocorreu mais rapidamente para o caso com  $RA_f = 0,026$ , o qual apresenta maior área de transferência de calor.

Figura 5 - Campos de  $\beta$  para  $t=10, 30, 50, 70, 90$  e  $110$  min para:

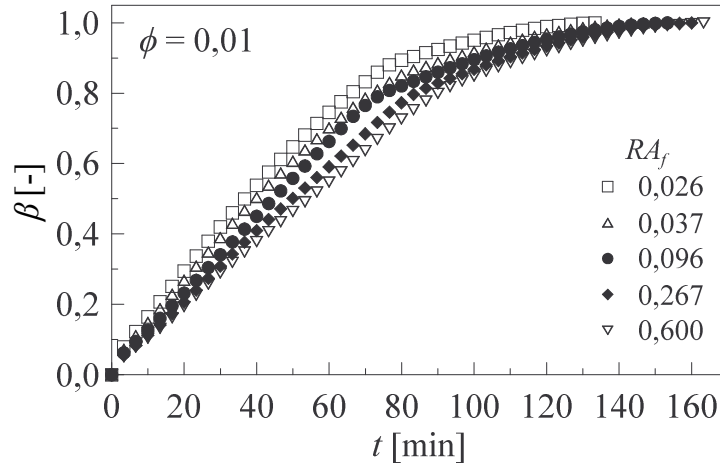
(a)  $RA_f = 0,026$ ; (b)  $RA_f = 0,096$ ; (c)  $RA_f = 0,600$



Na Figura 6 estão apresentados valores de perfis de  $\beta$  em função do tempo para as diferentes  $RA_f$ . Nela observa-se uma tendência de redução do tempo total do processo de fusão, com a redução dos valores de  $RA_f$ . Isso ocorre devido ao aumento do perímetro da aleta, aumentando, dessa forma, a área de transferência de calor entre a aleta e o PCM. Por exemplo,

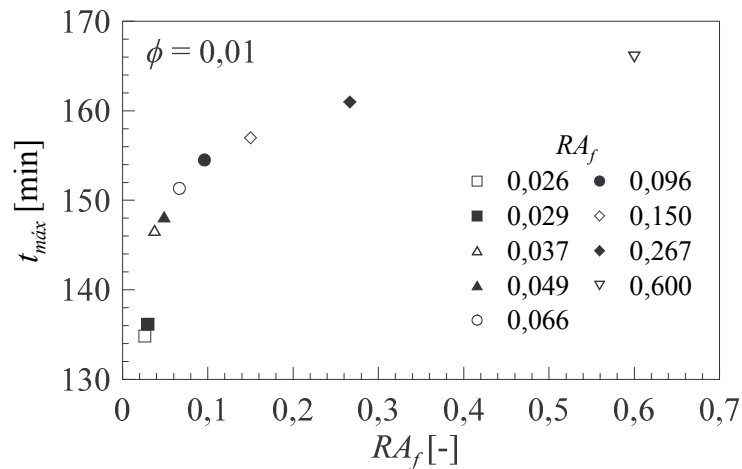
o tempo para o PCM atingir  $\beta = 0,8$  foi de, aproximadamente, 66 e de 90 min, para  $RA_f = 0,026$  e 0,6, respectivamente.

Figura 6 –  $\beta$  x tempo para diferentes  $RA_f$ :  
0,026; 0,037; 0,096; 0,267; 0,600



A Figura 7 mostra, para várias  $RA_f$ , o tempo necessário para que o PCM passe da fase sólida para a fase líquida, ou seja, para que atinja a condição de  $\beta = 1$ . Nessa figura observa-se que, quanto menor é o valor da  $RA_f$ , menor é o tempo necessário para o PCM atingir a condição de fusão completa. Enquanto a aleta com  $RA_f = 0,026$  leva, aproximadamente, 135 min para fundir completamente, a aleta com  $RA_f = 0,6$  leva, aproximadamente, 166 min, o que corresponde a uma diferença de, aproximadamente, 19%. Dessa forma, através dos resultados apresentados, se obteve como  $RA_{opt}$  da aleta, a  $RA_f = 0,026$  para  $\phi$  de 0,01.

Figura 7 – Tempo de fusão total para as diferentes  $RA_f$



## 5 Conclusões

Esse trabalho apresentou um estudo numérico para análise do processo de fusão de PCM, contido em uma cavidade retangular aletada. O objetivo desse estudo foi determinar a  $RA_{opt}$  da aleta, por meio de otimização geométrica e implementação da teoria construtal, para razões de aspecto de 0,026 até 0,6, com a qual fosse possível obter o menor tempo do processo de fusão do PCM, para a respectiva cavidade.

Verificou-se que os resultados qualitativos e quantitativos estão de acordo com os resultados experimentais apresentados por Kamkari e Shokouhmand (2014), validando, dessa forma, o modelo e metodologia utilizados.

Em relação ao estudo de caso, os resultados preliminares de campos e perfis de fração de líquido em função do tempo revelaram que o processo de fusão de PCM apresentou menor tempo para a menor  $RA_f$  analisada. Nesse caso, obteve-se uma redução de, aproximadamente, 19% no tempo total do processo, da  $RA_f= 0,6$  à 0,026, respectivamente. Dessa forma, obteve-se como  $RA_{opt}$  da aleta a  $RA_f= 0,026$ . Este resultado concorda com resultados encontrados na literatura para problemas com cavidade sólida, onde, para cavidades de baixo valor da fração de área, a razão de aspecto ótima é aquela que penetra quase completamente o sólido conforme Biserni *et al.* (2004).

**APÊNDICE B – ARTIGO II – SUBMETIDO AO *CONSTRUCTAL LAW & SECOND LAW CONFERENCE 2019***

**ESTUDO NUMÉRICO PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FUSÃO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM) ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DA RAZÃO DE ASPECTO ÓTIMA DE UMA ALETA**

**Resumo:** Com a constante redução das reservas de combustíveis fósseis e a crescente utilização de fontes de energia renováveis, estudos para utilização de materiais de mudança de fase (PCM) ganharam evidência mundial. Diversos estudos estão concentrados no uso dos mesmos contidos em cavidades, porém, por apresentarem baixa condutividade térmica, a inserção de aletas é apresentada como técnica de aprimoramento da transferência de calor. Este trabalho possui o objetivo de analisar a influência da razão de aspecto de aletas, posicionadas internamente em uma cavidade retangular, preenchida com PCM ácido láurico, em processo de fusão. Através de otimização geométrica, é determinada a razão de aspecto ótima, que minimiza o tempo do processo de fusão do PCM. Nos estudos de caso, a aleta é posicionada no centro da parede direita da cavidade, na posição horizontal, e suas dimensões alteradas pela variação de sua razão de aspecto, para frações de área de 0,01 e 0,02. O modelo matemático é baseado nas equações da conservação da massa, quantidade de movimento e conservação da energia, acrescido do modelo entalpia-porosidade para representar o processo de fusão. O software ANSYS Fluent foi utilizado para a solução dos problemas. A validação dos modelos numérico e matemático foi realizada com base em resultados experimentais existentes na literatura, apresentando bons resultados. As malhas computacionais foram analisadas através do método *GCI*, o qual apresentou índice de 1,9% para a malha utilizada. Para as duas frações de área testadas (0,01 e 0,02), obteve-se como resultado de fração de líquido uma redução de, aproximadamente, 19% no tempo do processo de fusão do PCM, entre a menor e a maior razão de aspecto. Dessa forma, para este estudo, obteve-se a menor razão de aspecto como razão de aspecto ótima para a aleta de cada fração de área.

**Palavras-chave:** Material de mudança de fase (PCM), CFD, Otimização, Lei Construtal.

### **1. Introdução**

Estudos com materiais de mudança de fase (PCM) estão em evidência no cenário mundial, devido a necessidade de desenvolvimento de fontes de energias renováveis. Estas são vistas como alternativa ao consumo de combustíveis fósseis, apesar de apresentarem instabilidade (GUO *et al.*, 2018). Pesquisas buscam analisar a utilização de PCM em cavidades



(KALBASI e SALIMPOUR, 2015, KAMKARI e SHOKOUHMAND, 2014), porém, devido sua baixa condutividade térmica, alguns estudos de aprimoramento da transferência de calor, através da inclusão de aletas (KALBASI e SALIMPOUR, 2015), foram desenvolvidos. Torna-se, portanto, importante a análise da geometria da aleta, para otimizar o processo de transferência de calor.

Este trabalho tem por objetivo verificar a influência da razão de aspecto de uma aleta, que está inserida em uma cavidade retangular, contendo o PCM. E, através de otimização geométrica, determinar a razão de aspecto ótima ( $RA_{opt}$ ) da mesma, que irá minimizar o tempo do processo de fusão do PCM, para diferentes frações de área  $\phi$ .

## 2. Apresentação do problema

O estudo é realizado em uma cavidade retangular, com altura ( $H$ ) de 120 mm e largura ( $W$ ) de 50 mm, preenchida com PCM ácido láurico, inicialmente no estado sólido. Uma aleta horizontal, com altura  $H_f$  e largura  $W_f$ , é posicionada a meia altura da parede direita. A cavidade possuiu uma abertura de 2 mm na parede superior, rente a parede direita, cuja finalidade é simular a saída do PCM durante o processo de fusão.

Os valores do calor específico, calor latente de fusão, massa específica e temperaturas do sólido e líquido, foram obtidos de Kamkari e Shokouhmand (2014), enquanto que a condutividade térmica foi obtida de Shokouhmand e Kamkari (2013) e viscosidade dinâmica de Valeri e Meirelles (1997).

## 3. Simulação numérica

Para simulação numérica, foi utilizado o modelo entalpia-porosidade. O mesmo consiste na equação da massa, Eq. (1), quantidade de movimento, Eq. (2), e conservação da energia, Eq. (3), com acréscimo do modelo de mudança de fase,

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla(\mu \nabla \vec{V}) - \nabla p + \rho g + S \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \lambda) + \nabla(\rho \vec{V} \lambda) = \nabla(k \nabla T) \quad (3)$$

na qual  $\vec{V}$  representa o vetor velocidade,  $S$  o termo fonte da quantidade de movimento,  $p$  a pressão,  $\vec{g}$  a aceleração da gravidade,  $t$  o tempo e  $\lambda$  a entalpia total, obtida através da soma da variação da entalpia sensível ( $\lambda_{se}$ ), Eq. (4), e da entalpia na mudança de fase ( $\lambda_L$ ), Eq. (5) (SHMUELI *et al.*, 2010),

$$\lambda_{se} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (4)$$

$$\lambda_L = \beta L \quad (5)$$

onde  $\lambda_{ref}$  é a entalpia na temperatura de referência ( $T_{ref}$ ). O termo fonte é obtido pela Eq. (6) (ASSIS *et al.*, 2007),

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} C \vec{V} \quad (6)$$

sendo  $\beta$  a fração líquida,  $C$  a constante da zona porosa e  $\varepsilon$  uma constante de valor 0,001, para evitar divisão por zero (VOLLER e PRAKASH, 1987). Para o processo de mudança de fase, a fração líquida é obtida conforme Eq. (7),

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_S \\ 1 & \text{se } T > T_L \\ T - T_S / T_L - T_S & \text{se } T_S < T < T_L \end{cases} \quad (7)$$

As simulações numéricas foram realizadas no software ANSYS Fluent<sup>®</sup>. A aleta e a parede direita, foram submetidas à temperatura de aquecimento de 343 K. As demais paredes foram consideradas adiabáticas. A abertura de 2 mm foi considerada como *Pressure Outlet*, na temperatura de 343 K, e o PCM sob temperatura de 298 K.

#### 4. Otimização

Através do Design Constructal a geometria da aleta será otimizada, e as melhores configurações serão obtidas pela determinação dos melhores fluxos (LORENTE *et al.*, 2015). A geometria da aleta será analisada através de diferentes razões de aspecto ( $RA_f$ ), para frações de área ( $\phi$ ) de 0,01 e 0,02, e a  $RA_f$  que apresentar o menor tempo do processo de fusão, será a razão de aspecto ótima ( $RA_{opt}$ ). As dimensões da aleta estão apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1 - Dimensões da aleta

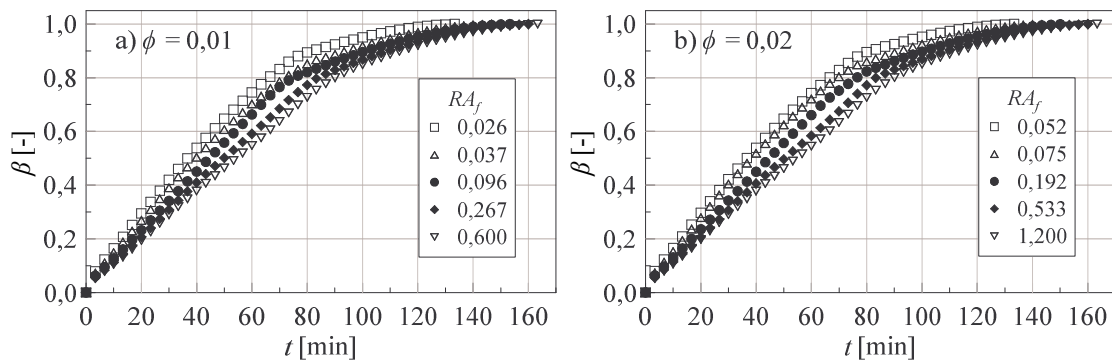
		$W_f$ [mm]								
		10	15	20	25	30	35	40	45	48
$\phi = 0,01$	$H_f$ [mm]	6,00	4,00	3,00	2,40	2,00	1,71	1,50	1,33	1,25
$\phi = 0,02$		12,00	8,00	6,00	4,80	4,00	3,43	3,00	2,66	2,50

## 5. Resultados e discussões

O presente estudo de caso é uma continuação do estudo numérico desenvolvido por Becker *et al.* (2018), onde foram utilizadas malhas computacionais validadas pelo método GCI. Como resultado, foram obtidos os índices de 1,9% e 5,5%, entre a malha intermediária e a mais e menos refinada, respectivamente.

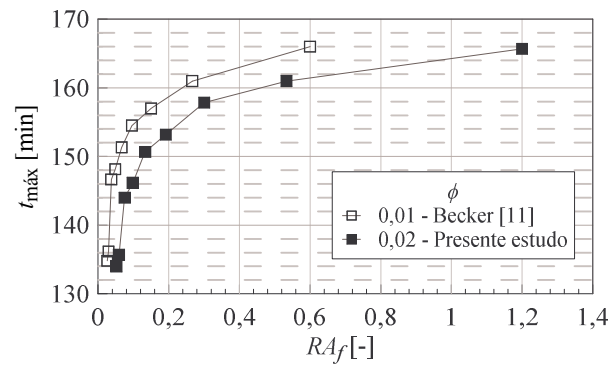
As Figuras 1(a-b) apresentam perfis de fração de líquido ( $\beta$ ) em função do tempo para diferentes  $RA_f$ , para a  $\phi = 0,01$ , Fig. 1(a), e  $\phi = 0,02$ , Fig. 1(b). Observa-se, para ambas  $\phi$ , uma tendência de diminuição do tempo total do processo de fusão, ao se diminuir a  $RA_f$  da aleta.

Figura 1 -  $\beta$  x tempo para diferentes  $RA_f$  para:  
(a)  $\phi = 0,01$ , adaptado de Becker *et al.* (2018) e (b)  $\phi = 0,01$ , este estudo



Na Figura 2 são apresentados, para diferentes  $RA_f$ , o tempo para o PCM estar completamente fundido, para as  $\phi$  de 0,01, e 0,02, respectivamente. Nas duas  $\phi$  verifica-se que quanto menor for a  $RA_f$ , menor será o tempo total do processo de fusão, resultando em uma diferença de, aproximadamente, 19% no tempo total, entre a maior e menor  $RA_f$ . Obteve-se como  $RA_{opt}$ , a  $RA_f = 0,026$  e  $0,052$ , para as  $\phi$  de 0,01, e 0,02, respectivamente.

Figura 2 - Tempo de fusão total para as diferentes  $RA_f$



## 6. Conclusões

Os resultados mostram que o processo de fusão apresentou menor tempo para as menores  $RA_f$  analisadas, para  $\phi$  de 0,01 e 0,02. Em ambos os casos foram obtidas reduções de, aproximadamente, 19% no tempo total do processo de fusão, entre a maior e a menor  $RA_f$ . Obteve-se como  $RA_{opt}$  da aleta, a  $RA_f = 0,026$  e  $0,052$ , para  $\phi$  de 0,01 e  $\phi$  0,02, respectivamente. Desta forma, não foram observadas diferenças significativas no processo de fusão do PCM com o aumento da  $\phi$  de 0,01 para 0,02.

## APÊNDICE C – ARTIGO III – A SER SUBMETIDO PARA PERIÓDICO INTERNACIONAL

### DESIGN CONSTRUTAL PARA ALETAS NO PROCESSO DE FUSÃO DE MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE (PCM) EM CAVIDADES RETANGULARES

**Resumo:** A utilização de energia térmica é uma forma eficiente de armazenamento de energia e pode ser aplicada em várias áreas, tais como indústria automotiva, de construção civil, plantas de energia solar e em componentes eletrônicos. Das possíveis formas de armazenamento térmico, o calor latente é o mais atrativo, por apresentar alta capacidade de armazenamento de energia em temperatura constante. Muitos estudos concentram-se na utilização de materiais de mudança de fase (PCM - *Phase Change Material*) como forma de armazenamento de energia. Porém, devido a sua baixa condutividade térmica, faz-se necessária a implementação de técnicas de aprimoramento da transferência de calor. Dentre as possíveis técnicas existentes, a utilização de aletas é a mais difundida. Assim, torna-se importante a análise da melhor dimensão das mesmas, para que o processo na qual estão inseridas, possa ser otimizado. Este trabalho tem como objetivo a verificação da influência da razão de aspecto de uma aleta em uma cavidade retangular, contendo PCM ácido láurico, em processo de fusão. Os resultados foram obtidos através de simulação numérica por CFD, utilizando-se o método dos volumes finitos. O modelo matemático é baseado nas equações da conservação da massa, quantidade de movimento e conservação da energia, sendo o processo de mudança de fase baseado no modelo entalpia-porosidade. O modelo matemático foi validado com resultados experimentais da literatura e as malhas computacionais foram verificadas pelo método *GCI*. Foram simuladas 09 razões de aspecto da aleta e 09 frações entre área da cavidade e área da aleta, totalizando 78 configurações. Com estes resultados foi aplicado o método *Design Construtal* para determinar a razão de aspecto ótima para cada fração de área, a qual minimiza o tempo total do processo de fusão do PCM. Em todas as frações de área analisadas, constatou-se que, quanto maior a razão de aspecto da aleta, maior foi o tempo total do processo de fusão. Já para um mesmo valor de razão de aspecto constatou-se que quanto maior a fração de área, menor foi o tempo total do processo.

**Palavras-chave:** Materiais de mudança de fase (PCM). Simulação numérica. *Design Construtal*. Razão de aspecto.

## 1. INTRODUÇÃO

O tema energia é um assunto de grande relevância devido ao seu crescente consumo, aliado aos possíveis impactos ambientais, ou então devido à necessidade de utilização de fontes de energias renováveis (REDDY *et al.*, 2018). Assim, é importante que se realize o armazenamento de tais energias, para que possam ser utilizadas quando necessário (ZHANG *et al.*, 2016 e FARID *et al.*, 2004). Um dos meios mais eficientes de armazenamento de energia dá-se através da energia térmica (HASNAIN *et al.*, 1998, DABIRI *et al.*, 2018 e ZHU *et al.*, 2009), seja através de calor sensível, latente ou termoquímico (ZHANG *et al.*, 2016).

Das possíveis formas de armazenamento térmico, o calor latente torna-se mais atrativo, pela sua alta capacidade de armazenamento de energia (KAMKARI e SHOKOUHMAND, 2014), e por possuir a capacidade de fornecer elevada densidade de armazenamento de energia em temperatura constante, ou seja, na temperatura de transição dos materiais (HASNAIN *et al.*, 1998). Os materiais que são utilizados nesta forma de armazenamento de energia, baseados no calor latente, são denominados de *Phase Change Material* (PCM – Materiais de Mudança de Fase) (IBRAHIM *et al.*, 2017), classificados de acordo com sua composição química em orgânicos, inorgânicos e eutéticos (AGYENIM *et al.*, 2010). Como vantagens, os PCM apresentam pouca variação volumétrica durante a mudança de fase, elevado calor específico e calor latente de fusão (BABY e BALAJI, 2012), além de estabilidade térmica (JAGUEMONT *et al.*, 2018). Entretanto, apresentam baixa condutividade térmica, o que resulta em baixas taxas de carga e descarga (AKEIBER *et al.*, 2016 e AGYENIM *et al.*, 2010).

PCM podem ser utilizados em várias áreas, tais como: biomedicina, indústrias têxtil, automotiva e de construção civil (PIELICHOWSKA e PIELICHOWSKI, 2014), bem como em plantas de energia solar (ZHANG *et al.*, 2016) e em componentes eletrônicos (KALBASI e SALIMPOUR, 2015). Para as aplicações citadas, a seleção do PCM a ser utilizado requer análise da faixa de temperatura de fusão na qual será utilizado, e posterior análise da cavidade na qual será inserido (AGYENIM *et al.*, 2010), as quais podem apresentar formato esférico, tubular (ZHANG *et al.*, 2016), retangular ou tubular concêntrico (KHAN *et al.*, 2016), por exemplo. Como os PCM apresentam baixa condutividade térmica, torna-se necessária a utilização de técnicas de aprimoramento da transferência de calor entre a cavidade e o PCM. Das diversas técnicas existentes, cita-se a inserção de aletas, utilização de múltiplos PCM (IBRAHIM *et al.*, 2017), dispersão de partículas de elevada condutividade térmica no PCM e microencapsulação (SOARES *et al.*, 2013). Entre estas diferentes técnicas, a inserção de aletas

é mais atrativa, devido a facilidade de construção e menor custo de fabricação (AGYENIM *et al.*, 2010).

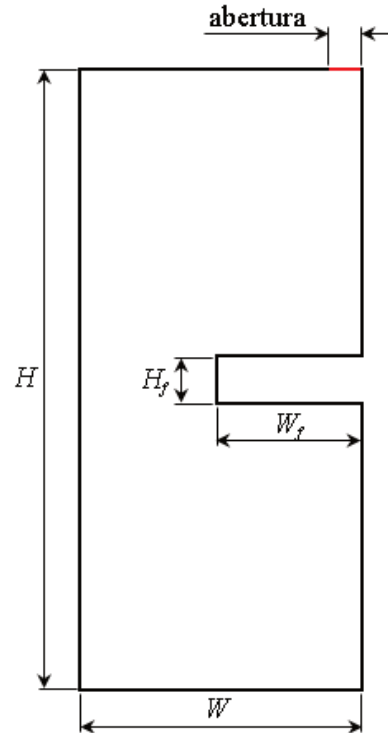
Muitos estudos para entendimento do processo de fusão de PCM, contidos em diferentes tipos de cavidades, com e sem a integração de técnicas de aprimoramento da transferência de calor, já foram realizados (SHMUELI *et al.*, 2010; KATSMAN *et al.*, 2007; ASSIS *et al.*, 2007; DHAIDAN *et al.*, 2013; TAN, 2008; entre outros). Alguns estudos foram destinados à análise do processo de fusão de PCM através da utilização de aletas, como técnica de aprimoramento da transferência de calor (HOSSEINI *et al.*, 2015; KAMKARI e SHOKOUHMAND, 2014; KALBASI e SALIMPOUR, 2015; ABDI *et al.*, 2019). No entanto, muitos destes analisam somente o comportamento da quantidade das mesmas, sua orientação, ou então, seu comprimento. Desta forma, nota-se a falta de uma análise geométrica da aleta, que alie, simultaneamente, a alteração de seu comprimento e de sua altura, mantendo-se a área da mesma constante. Uma possível forma de se realizar esta análise geométrica, dá-se através do método *Design Construtal*. Este método é caracterizado por uma análise sequencial, entre a menor e a maior configuração (BEJAN *et al.*, 2000). Com ele pode-se obter os fluxos mais eficientes (LORENTE *et al.*, 2015) e definir a configuração das aletas para se obter as melhores configurações, de acordo com a aplicação desejada. Portanto, se faz necessária a realização de estudos que utilizem o método *Design Construtal* para análise geométrica de aletas, em processos de fusão de PCM.

Este trabalho tem por objetivo verificar a influência da razão de aspecto de aletas ( $RA_f$ ), inseridas em uma cavidade retangular, no processo de fusão do PCM ácido láurico, bem como, através do método *Design Construtal*, determinar a razão de aspecto ótima ( $RA_{opt}$ ), a qual minimizará o tempo máximo do processo de fusão do PCM, para diferentes valores de frações de área ( $\phi$ ).

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A geometria estudada consiste em uma cavidade retangular aletada, conforme Figura 1. Esta é preenchida com o PCM ácido láurico, inicialmente no estado sólido, e é considerada bidimensional, com largura ( $W$ ) de 50 mm e altura ( $H$ ) de 120 mm. A aleta, que está posicionada horizontalmente no centro da parede direita, possui largura  $W_f$  e altura  $H_f$ . Na parede superior existe uma abertura de 2 mm, localizada junto à parede direita, para simular a retirada do PCM de dentro da cavidade durante o processo de fusão.

Figura 1- Desenho esquemático do problema



As propriedades termofísicas do ácido láurico estão expostas na Tab. 1, Tab. 2 e Tab. 3. A Tab. 1 apresenta os valores de calor específico ( $c_p$ ), massa específica ( $\rho$ ), temperatura ( $T$ ) e calor latente de fusão ( $L$ ). Os sub-índices  $s$  e  $l$  referem-se aos estados sólido e líquido, respectivamente. Valores da condutividade térmica ( $k$ ) e viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), em função da temperatura, foram obtidos por interpolação linear, e são apresentados na Tab. 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1 - Propriedades termofísicas do ácido láurico obtidas de Kamkari e Shokouhmand (2014)

$c_p$ [J/(kg K)]		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]		$T$ [K]		$L$ [J/kg]
$s$	$l$	$s$	$l$	$s$	$l$	
2180	2390	940	885	316,65	321,35	187210

Tabela 2 - Condutividade térmica do ácido láurico obtida de Shokouhmand e Kamkari (2013)

$T$ [K]	293	303	313	323	328	333	338	343
$k$ [W/(m K)]	0,161	0,159	0,158	0,145	0,143	0,142	0,139	0,138



Tabela 3 - Viscosidade dinâmica do ácido láurico obtida de Valeri e Meirelles (1997)

T [K]	321,2	322	333	344	355	372	383
$\mu$ [kg/(m s)]	0,00760	0,00747	0,00542	0,00428	0,00338	0,00250	0,00210

## 2.1. Lei Construtal

Lei Construtal é uma lei da Física (LORENTE *et al.*, 2015, BEJAN e LORENTE, 2013). Por essa Lei, os sistemas possuem duas características muito relevantes, ditas universais: condição de não equilíbrio termodinâmico e condição de livre transformação, ampliando, assim, o alcance termodinâmico. Essa Lei trata da evolução em relação ao tempo como dinâmica, ou seja, está em constante mudança e nunca acaba. Essa Lei preocupa-se com a análise do movimento, do acesso e da velocidade (BEJAN e ZANE, 2012), onde o fluxo existente nas configurações, representa o movimento que ocorre entre diferentes entidades. Dessa forma, através da aplicação da Lei Construtal, busca-se obter, além das melhores configurações dos sistemas, as configurações mais rápidas, mais econômicas, diretas e confiáveis (BEJAN e LORENTE, 2008). A aplicação da Lei Construtal, na engenharia, é realizada através da utilização do método denominado *Design Construtal* (ROCHA *et al.* 2017), usualmente utilizado na seleção da melhor geometria, forma e posição de um componente, a partir de relações adimensionais entre partes da geometria. Esse método é assim denominado por ser baseado na análise sequencial, entre a menor e maior configuração de um sistema (BEJAN *et al.*, 2000), e visa aprimorar o escoamento do mesmo progressivamente (BEJAN e LORENTE, 2013), para obtenção dos fluxos mais eficientes (LORENTE *et al.*, 2015). As etapas para implementação do *Design Construtal* foram descritas por Rocha *et al.* (2017), sendo posteriormente detalhadas por Razera *et al.* (2018). Na Figura 2 as mesmas estão representadas, em modo de fluxograma, para aplicação do método a este estudo. No lado esquerdo são apresentadas as etapas, para implementação do *Design Construtal* e, no lado direito, a adaptação destas a este estudo.

Para a análise geométrica da aleta, suas dimensões foram modificadas através da variação de sua razão de aspecto ( $RA_f$ ), que é determinada pela razão da altura e largura da mesma, conforme Eq. (1). Estas foram realizadas para diferentes frações de área ( $\phi$ ), buscando-se, desta forma, minimizar o tempo máximo do processo de fusão.

$$RA_f = \frac{H_f}{W_f} \quad (1)$$

onde  $\phi$  é a razão entre a área da aleta ( $A_f$ ) e a área da cavidade ( $A$ ), conforme Eq. (2), na qual  $A$  é mantida constante e igual a  $6000 \text{ mm}^2$ .

$$\phi = \frac{A_f}{A} \quad (2)$$

Desta forma,  $W$  e  $H$  da cavidade são mantidas constantes, e a variação de  $RA_f$  é dependente dos valores obtidos para  $A_f$  em relação aos arbitrados para  $\phi$ . Com isto, para cada  $A_f$  resultante,  $W_f$  e  $H_f$  são alteradas, em um espaço de busca de 10 à 48 mm, para a  $W_f$ , com intervalos de 5 mm entre 10 e 45 mm, gerando-se, portanto, os casos apresentados na Tabela 4.

Figura 2 - Fluxograma com aplicação do Design Construtal para o presente estudo

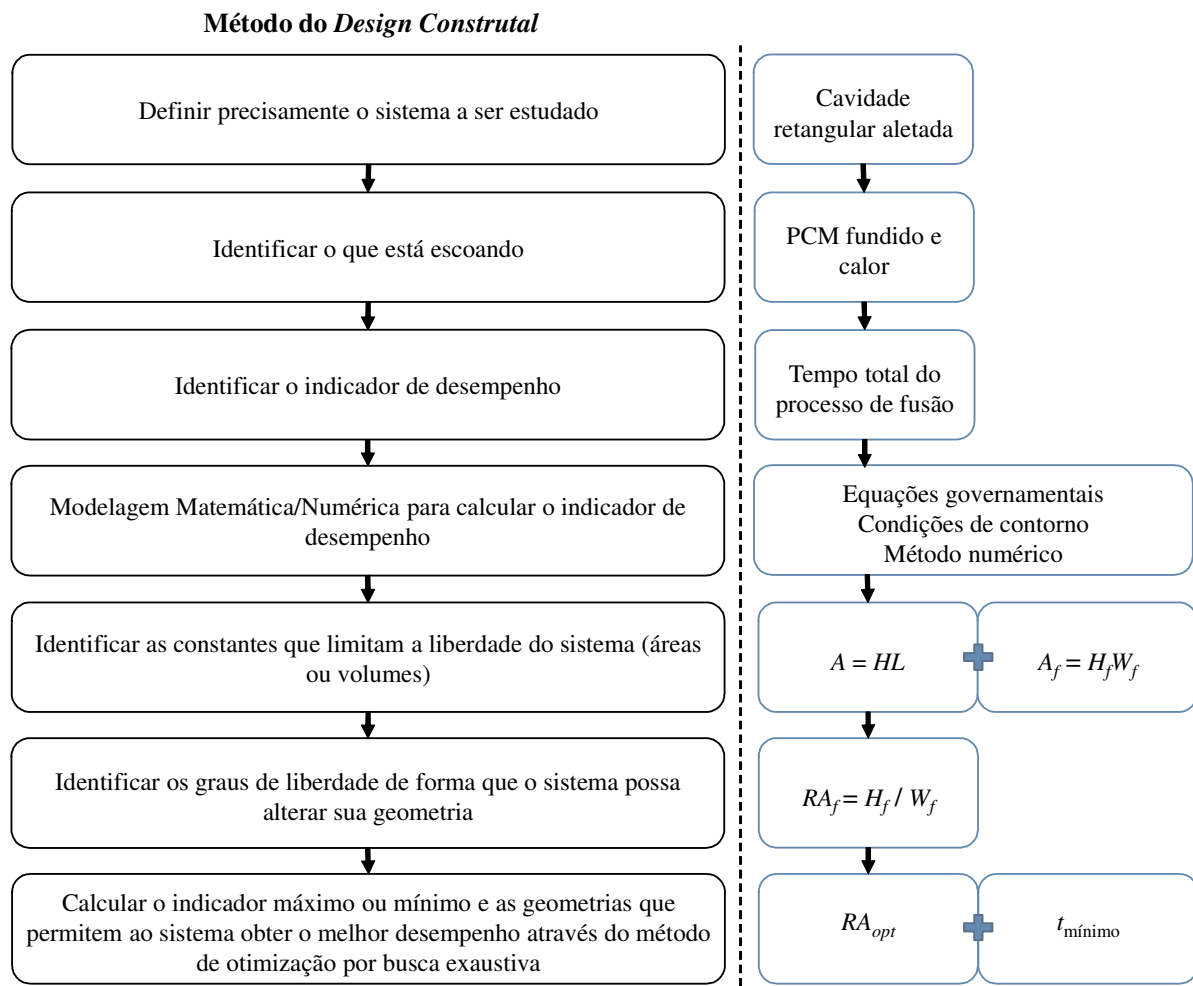


Tabela 4 - Dimensões da aleta

		$W_f$ [mm]								
		10	15	20	25	30	35	40	45	48
$\phi = 0,005$	$H_f$ [mm]	3,00	2,00	1,50	1,20	1,00	0,86	0,75	0,67	0,63
$\phi = 0,01$		6,00	4,00	3,00	2,40	2,00	1,71	1,50	1,33	1,25
$\phi = 0,02$		12,00	8,00	6,00	4,80	4,00	3,43	3,00	2,66	2,50
$\phi = 0,03$		18,00	12,00	9,00	7,20	6,00	5,14	4,50	4,00	3,75
$\phi = 0,04$		24,00	16,00	12,00	9,60	8,00	6,86	6,00	5,33	5,00
$\phi = 0,05$		30,00	20,00	15,00	12,00	10,00	8,57	7,50	6,66	6,25
$\phi = 0,10$		60,00	40,00	30,00	24,00	20,00	17,14	15,00	13,33	12,50
$\phi = 0,20$			80,00	60,00	48,00	40,00	34,29	30,00	26,66	25,00
$\phi = 0,30$				90,00	72,00	60,00	51,43	45,00	40,00	37,50

## 2.2. Modelo Matemático

O modelo matemático utilizado para representar o processo de fusão consiste da equação de conservação da massa, da equação da quantidade de movimento e da equação da conservação da energia, Eq. 1-3, respectivamente, acrescidas do modelo entalpia porosidade, apresentado posteriormente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla(\mu \nabla \vec{V}) - \nabla p + \rho \vec{g} + S \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \lambda) + \nabla(\rho \vec{V} \lambda) = \nabla(k \nabla T) \quad (5)$$

onde  $\vec{V}$  representa o vetor velocidade,  $t$  o tempo,  $p$  a pressão,  $\vec{g}$  a aceleração da gravidade,  $S$  o termo fonte e  $\lambda$  a entalpia total, que é obtida através da soma da variação da entalpia na mudança de fase ( $\lambda_L$ ) e a entalpia sensível ( $\lambda_{se}$ ), obtida através da Eq. (6).

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

sendo  $\lambda_{ref}$  a entalpia na temperatura de referência ( $T_{ref} = 298$  K). A entalpia na mudança de fase é calculada pela Eq. (7).

$$\lambda_L = \beta L \quad (7)$$

O modelo entalpia-porosidade (VOLLER e PRAKASH, 1987) trata a zona de interface sólido-líquido (mushy zone) como uma zona porosa, sendo o termo fonte obtido conforme a Eq. (8).

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} C \bar{V} \quad (8)$$

onde  $\beta$  é a fração líquida,  $\varepsilon$  uma constante de valor igual a 0,001, utilizada para evitar que ocorra divisão por zero e  $C$  é a constante da zona porosa. Esta constante depende da morfologia da zona porosa (VOLLER e PRAKASH, 1987). A fração líquida de PCM dentro do intervalo de mudança de fase é calculada através da Eq. (9).

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ T - T_s / T_l - T_s & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (9)$$

### 2.3. Condições de contorno

Foi adotada a condição de contorno adiabática nas paredes da esquerda, inferior e superior, conforme indica as Eqs. (10-12), respectivamente. A condição de temperatura prescrita foi utilizada para a parede vertical direita e para a aleta, assim como para a abertura, conforme indicado nas Eqs. (13) e (14), respectivamente.

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0-H}} = 0 \quad (10)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\substack{x=0-W \\ y=0}} = 0 \quad (11)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=W - \text{abertura} \\ y=H}} = 0 \quad (12)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=W \\ y=0-H}} = T_a \quad (13)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=abertura \\ y=H}} = T_a \quad (14)$$

## 2.4. Abordagem numérica

As simulações numéricas foram realizadas com o software ANSYS FLUENT<sup>®</sup> e as malhas computacionais foram criadas no software ANSYS ICEM<sup>®</sup>. Na abertura de 2 mm, foi considerada a condição de “*pressure-outlet*”, com pressão manométrica de 0 Pa e temperatura de 343 K. Para a correção da pressão e acoplamento pressão-velocidade utilizou-se o esquema “*presto*” e “*simple*”, respectivamente. Considerou-se escoamento em regime laminar e regime transiente, com intervalo de tempo de 0,1 s. Nas equações de energia e quantidade de movimento, foi utilizado o esquema “*first order upwind*”. Como critérios de convergência adotou-se  $10^{-8}$  para equação da energia e  $10^{-5}$  para velocidade e continuidade. Foram utilizados coeficientes de relaxamento de 0,15 para a pressão e quantidade de movimento, 0,3 para massa específica, forças de campo e energia e 0,2 para fração líquida. Os valores de  $k$  e  $\mu$  (Tab. 2 e 3) foram obtidos por interpolação linear. O valor de  $\rho_s$  foi considerado constante (Tab. 1), porém, os valores de  $\rho_l$  foram considerados variáveis de acordo com a variação de temperatura, sendo: 885 kg/m<sup>3</sup> em 321,35 K (Tab. 1), 870 kg/m<sup>3</sup> em 323 K e 862 kg/m<sup>3</sup> em 333 K, obtidos do estudo de Chuah *et al.* (2006).

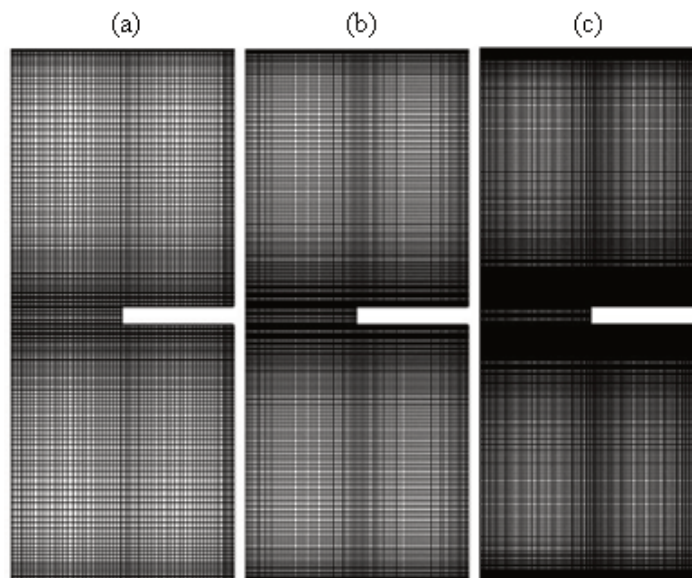
As paredes inferior, superior e esquerda da cavidade foram consideradas adiabáticas. A parede direita e a aleta foram mantidas na temperatura de aquecimento:  $T_a = 343$  K. Em todas as paredes, bem como na aleta, considerou-se a condição de não deslizamento, com exceção da abertura, a qual foi considerada com escoamento livre. O PCM foi submetido inicialmente a uma temperatura inicial ( $T_i$ ) de 298 K.

## 2.5. Validação Numérica

A validação numérica foi realizada com base nos resultados de Kamkari e Shokouhmand (2014). Estes autores estudaram o processo de fusão do PCM ácido láurico em uma cavidade retangular, de 50 mm de largura, 120 mm de altura e 120 mm de espessura, com uma aleta de 25 mm de largura e 4 mm de altura. Nesse estudo, a aleta e a parede direita foram submetidas a uma temperatura constante de 343 K. As demais paredes foram isoladas termicamente. O PCM estava inicialmente na temperatura de 298 K, ou seja, no estado sólido.

Neste estudo numérico, foram criadas três malhas computacionais, contendo 10118, 14520 e 28457 elementos, apresentadas nas Figuras 3(a-c). A análise de independência de malha foi realizada pelo método *GCI (Grid Convergence Method)* (CELIK *et al.*, 2008), através do comparativo da malha intermediária (Figura 3 (b)) com a menos refinada (Figura 3(a)) e com a mais refinada (Figura 3(c)). Os índices obtidos foram de 5,5% e 1,9%, respectivamente, sendo assim, a malha de 28457 elementos é a indicada para realização das simulações numéricas. Porém, considerando-se o baixo erro entre a malha intermediária e a mais refinada, e a diferença no tempo computacional, a malha de 14520 elementos foi escolhida como malha base para realização das demais simulações numéricas.

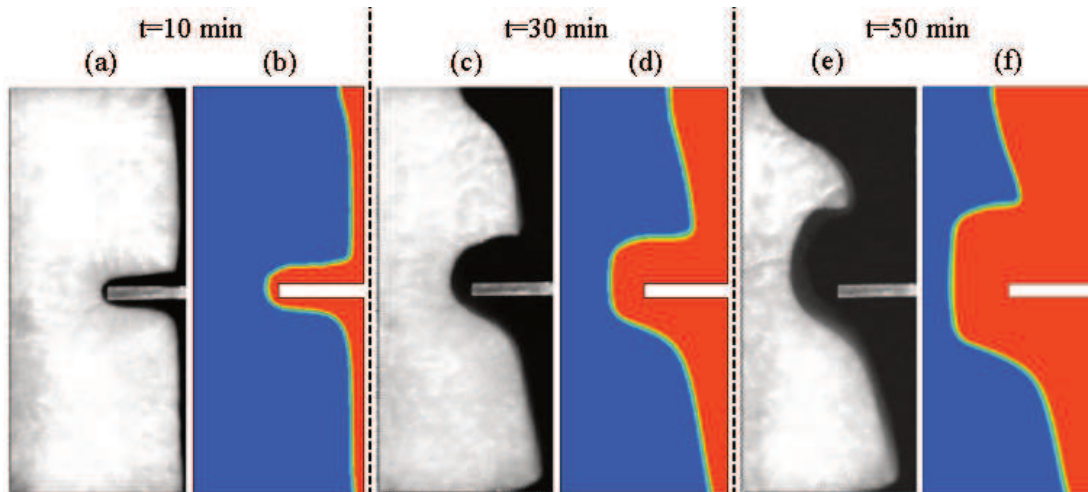
Figura 3 - Malhas computacionais: (a) 10118, (b) 14520 e (c) 28457 elementos



Nas Figuras 4(a-f) são apresentados campos de fração de líquido ( $\beta$ ) para os instantes de 10, 30 e 50 min, respectivamente, obtidos de Kamkari e Shokouhmand (2014) (Figuras 4(a, c e e)) e o presente estudo (Figuras 4(b, d e f)). Nessas figuras, as cores branca e azul representam o PCM no estado sólido, enquanto que, as cores preta e vermelha representam o estado líquido. Comparando-se os resultados experimentais e numéricos, tanto nos instantes de 10, 30 e 50 min, observa-se que há boa concordância nos campos de  $\beta$ .

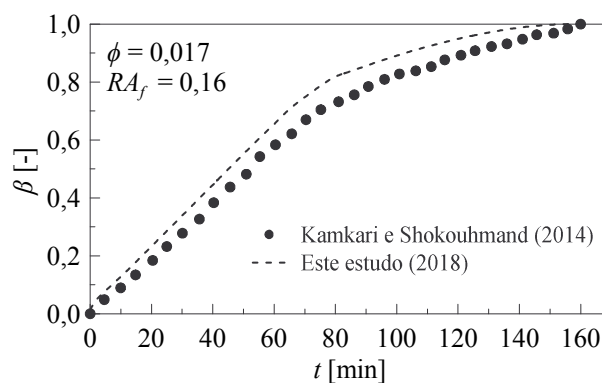
Figura 4 - Campos de  $\beta$  para  $t = 10, 30$  e  $50$  min para:

(a) experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014), (b) este estudo, (c) experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014), (d) este estudo, (e) experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014), (f) este estudo



A Figura 5 apresenta perfis transientes de  $\beta$ , obtidos experimentalmente por Kamkari e Shokouhmand (2014) e presente estudo numérico. Nesta, os valores de  $\beta$  variam de 0 até 1, sendo 0 a representação do PCM no estado sólido e 1 a representação do estado líquido. Observa-se boa concordância entre resultados numéricos e experimentais. O erro médio de afastamento foi de, aproximadamente, 5,4%, enquanto que, o máximo foi de, aproximadamente, 6,3%, no instante de 110 min, para  $\beta = 0,856$ .

Figura 5 -  $\beta$  pelo tempo: experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014) e este estudo



## 2.6. Análise da constante $C$

A constante da zona porosa ( $C$ , Eq. 8) indica o amortecimento da velocidade do material até zero na fase sólida. Esta deve ser ajustada de acordo com o problema analisado. Por definição, o valor de  $C$  deve ser suficiente para permitir escoamento na região de transição e suprimir a velocidade na fase sólida (VOLLER e PRAKASH, 1987). Neste trabalho, várias

ordens de grandeza de valores de  $C$  foram testadas. No entanto, observou-se que  $C = 10^{11}$  reproduziu de forma mais satisfatória o processo de fusão do PCM. Assim, os resultados numéricos apresentados neste trabalho foram obtidos com  $C = 10^{11}$ .

Considerando a boa concordância entre resultados numéricos do presente estudo e experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014), tanto qualitativos (Figura 4) quanto quantitativos (Figura 5) e constante  $C$ , considerou-se o modelo numérico validado.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da  $RA_f$ , para obter a  $RA_{opt}$  e, com isso, minimizar o tempo do processo de fusão. Para alcançar este objetivo, foram testadas 78 configurações de aletas, com  $\phi$  variando entre 0,005 e 0,3 e  $W_f$  variando entre 10 e 48 mm, conforme apresentado na Tab. 4.

Nas Figuras 6(a-e) são apresentados campos de  $\beta$ , para  $\phi = 0,005$ , em  $t = 1, 10, 30, 50, 70$  e  $90$  min, para  $RA_f = 0,300; 0,075; 0,033; 0,019$  e  $0,013$ . Em  $t = 1$  min, nota-se que a camada de PCM fundido está próxima da parede aquecida, apresentando, para as diferentes  $RA_f$ , diferença apenas no contorno da aleta. Nesse instante, quando o PCM se encontra quase que totalmente na fase sólida, o processo de transferência de calor é predominantemente por condução. Este mecanismo prevalece enquanto a interface sólido-líquido permanece próxima da parede. Com o passar do tempo, nota-se que a espessura da camada fundida aumenta e, com isto, há aumento da força de empuxo em relação a força viscosa, o que gera mudança no mecanismo de transferência de calor, que passa a ser, portanto, por convecção natural. Como consequência, ocorre erosão da fase sólida na parte superior da cavidade, na interface sólido-líquido, formando uma curvatura da frente de fusão. Isto pode ser melhor identificado em  $t = 30, 50$  e  $70$  min, para qualquer tamanho de aleta. Nota-se que a variação da  $RA_f$  influencia na camada de PCM fundido e que, passados os instantes iniciais, há uma tendência de aceleração do processo de fusão do PCM com a redução da  $RA_f$ . Para este  $\phi$  (0,005), o processo de fusão ocorreu de forma mais rápida para a menor  $RA_f$ , ou seja,  $RA_f = 0,013$ , e de forma mais lenta para a maior  $RA_f$ , ou seja,  $RA_f = 0,300$ . Este comportamento se deve ao aumento do perímetro da aleta inserido no PCM, na qual aumenta a área de transferência de calor entre a aleta e o PCM.

As Figuras 7(a-f) apresentam campos de  $\beta$ , para  $W_f = 20$  e  $48$  mm, e  $\phi = 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2$  e  $0,3$ , respectivamente. Nestas figuras, as três primeiras colunas apresentam campo de  $\beta$  para casos com  $W_f = 20$  mm, nos tempos  $t = 10, 50$  e  $90$  min. As três últimas colunas



representam também campos de  $\beta$  para os mesmos instantes de tempo, porém, para  $W_f = 48$  mm.

Figura 6 - Campos de  $\beta$ , para  $\phi = 0,005$ , em  $t = 1, 10, 30, 50, 70$  e  $90$  min para:  
 (a)  $RA_f = 0,300$ ; (b)  $RA_f = 0,075$ ; (c)  $RA_f = 0,033$ ; (d)  $RA_f = 0,019$ ; (e)  $RA_f = 0,013$

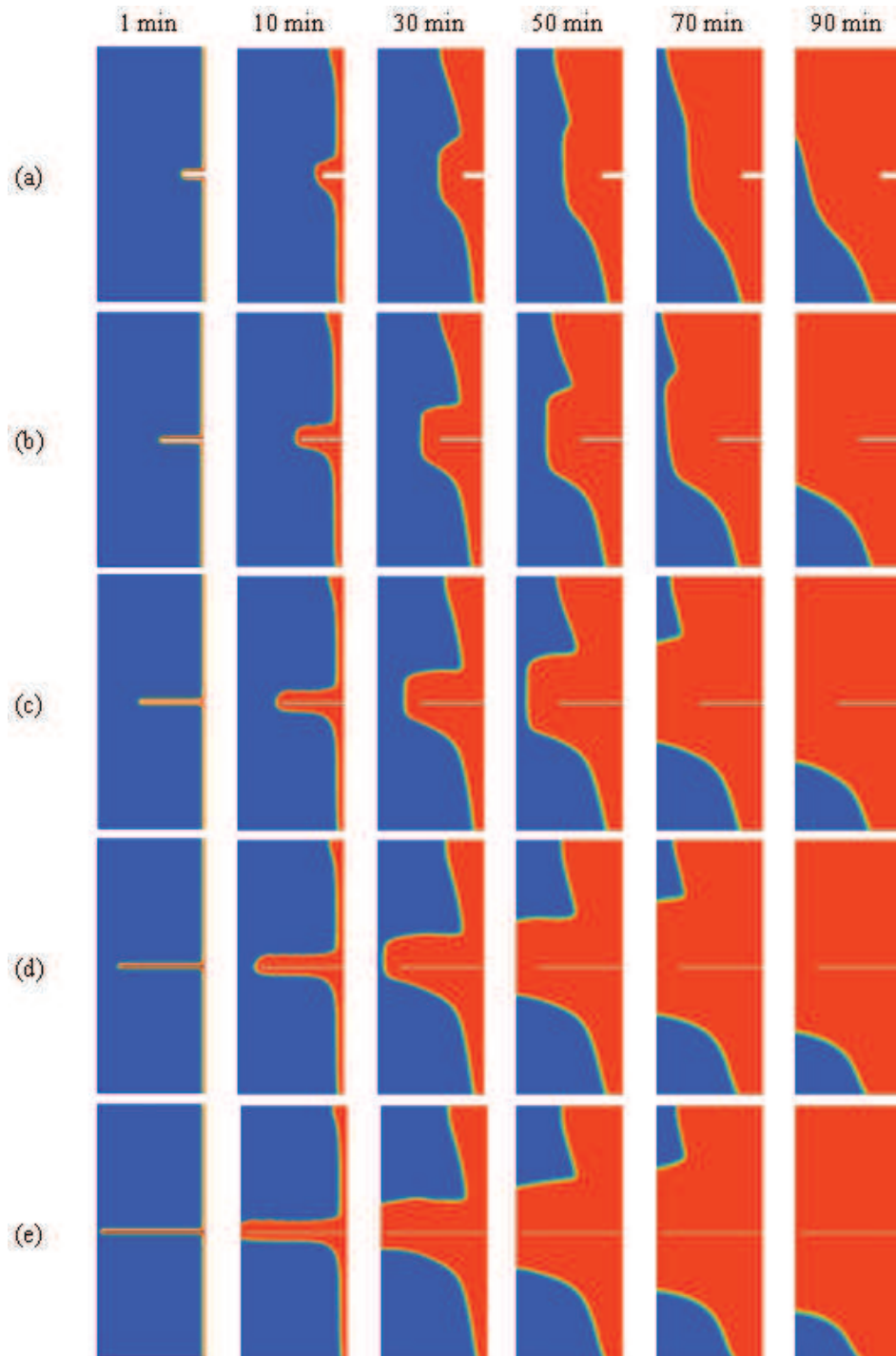
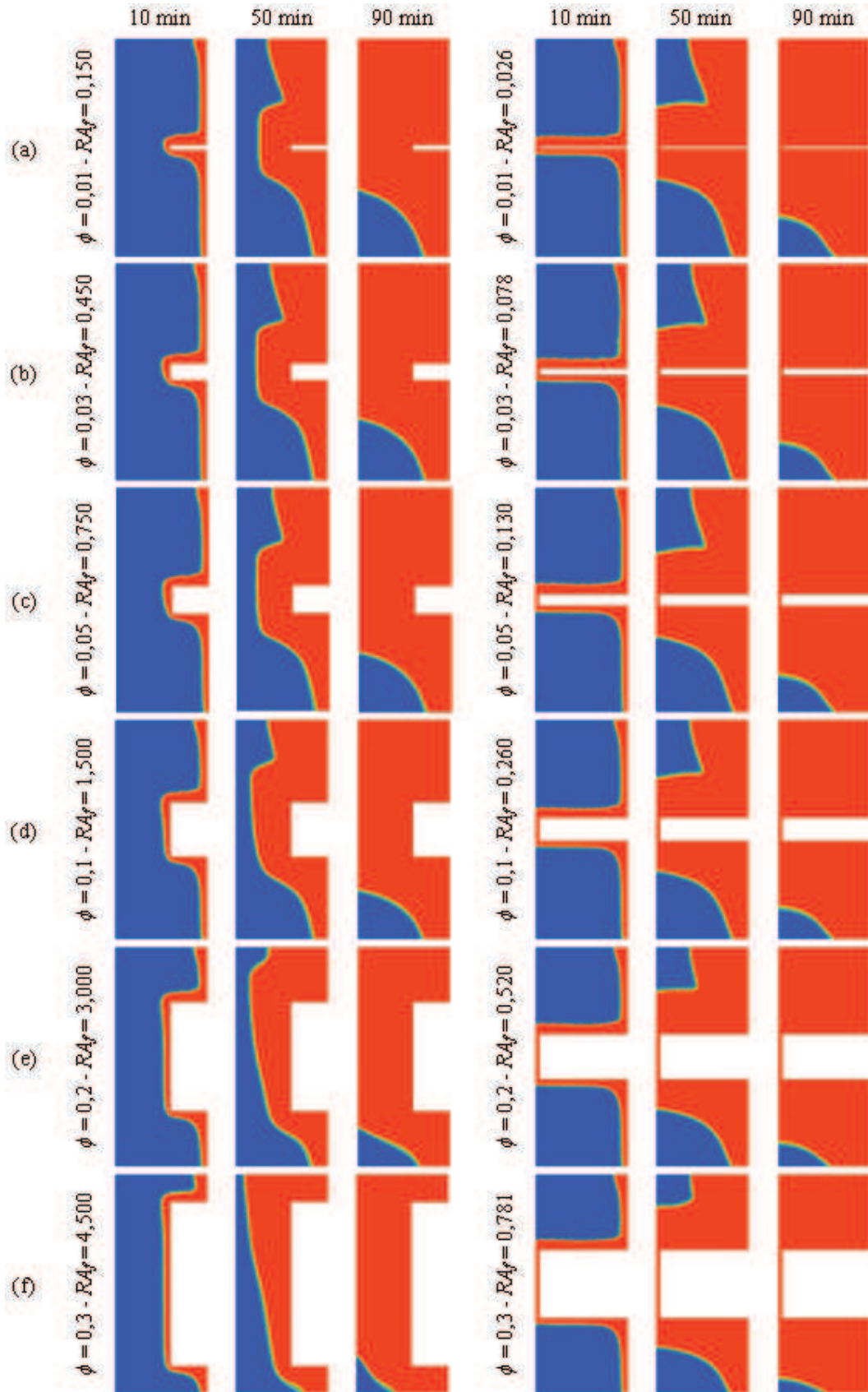


Figura 7 - Campos de  $\beta$  em  $t = 10, 50$  e  $90$  min, para  $W_f = 20$  e  $48$  mm, para:  
 (a)  $\phi = 0,01$ ; (b)  $\phi = 0,03$ ; (c)  $\phi = 0,05$ ; (d)  $\phi = 0,1$ ; (e)  $\phi = 0,2$ ; (f)  $\phi = 0,3$

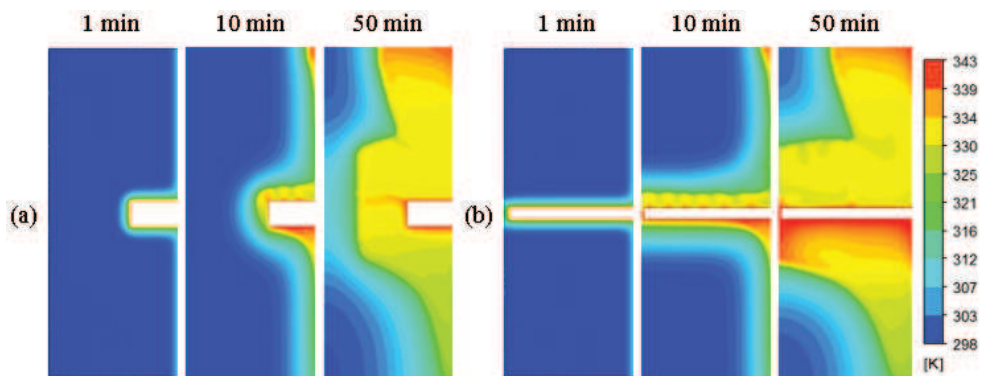


Nas Figuras 7(a-b) pode-se observar ainda que os campos de fração de líquido, próximo a parede vertical direita, são semelhantes entre si, em  $t = 10$  min, tanto para  $W_f = 20$  mm quanto para  $W_f = 48$  mm, apresentando fina camada de PCM fundido, para diferentes  $RA_f$  e  $\phi$ .

As Figuras 8(a-b), apresentam, respectivamente, campos de temperatura para  $RA_f = 0,450$  e  $0,078$ , para  $\phi = 0,03$ , em  $t = 1, 10$  e  $50$  min. Em  $t = 1$  min, observa-se que a camada limite térmica está próxima da parede aquecida e, em  $t = 10$  min e  $50$  min, a mesma já apresenta afastamento desta, o que caracteriza os mecanismos de transferência de calor, citados anteriormente, na Figura 6.

Figura 8 - Campos de temperatura em  $t = 1, 10$  e  $50$  min, de  $\phi = 0,03$ , para:

(a)  $RA_f = 0,450$  e (b)  $RA_f = 0,078$

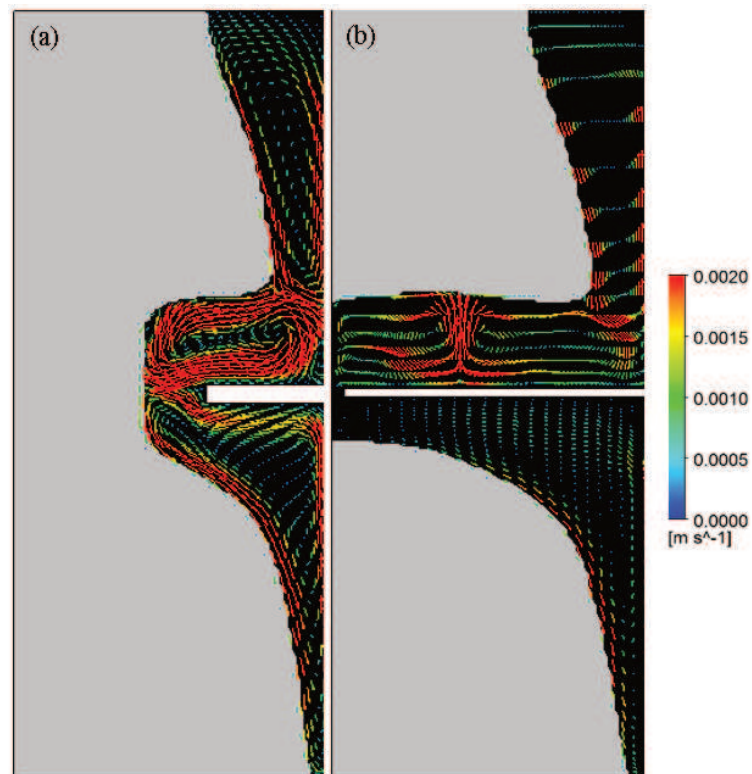


Ainda em relação as Figuras 8(a-b), pode-se observar duas condições interessantes: forte estratificação térmica nos instantes finais (50 min) e campo de temperatura acima e abaixo da aleta muito diferentes entre si, para os mesmos 50 min. As forças de empuxo que surgem em função da variação da massa específica, próxima a parede vertical ativa, faz com que ocorra uma corrente convectiva ascendente, estratificando termicamente o PCM líquido na região superior da cavidade. Condição semelhante é observada na região inferior da aleta, para ambas as  $RA_f$ , o que contribui para a formação da curvatura da frente de fusão. Porém, em  $t = 10$  min e  $50$  min, com a redução de  $RA_f$ , observa-se aumento da estratificação térmica na região abaixo da aleta. Este comportamento tem relação com o aumento do perímetro da aleta, que limita a movimentação das correntes ascendentes até o topo da cavidade, o que contribui para a aceleração do processo de fusão do mesmo. Observa-se também, em  $t = 10$  min, para ambas  $RA_f$ , pequenas variações de temperatura na parte superior da aleta. Estas caracterizam instabilidades da camada fundida e formação da convecção de Rayleigh-Bénard, a ser analisada posteriormente, através dos campos de velocidade. Foram observados, para os demais  $\phi$ , comportamento similar ao descrito para o presente  $\phi$ .

Como visto anteriormente, nos instantes iniciais o processo de fusão é predominantemente condutivo. Com o passar do tempo este passa a ser predominantemente convectivo. Estas condições podem ser verificadas nas Figuras 9(a, b), as quais mostram campos de velocidade para  $t = 30$  min e  $\phi = 0,01$ , para  $RA_f = 0,150$  e  $0,026$ , respectivamente. Nestas figuras, a cor cinza representa o PCM na fase sólida e a preta na fase líquida, onde está representado o campo de velocidade do respectivo instante de tempo. Nas duas figuras pode-se observar, junto a parede quente (direita), a existência de escoamento ascendente, causado pelo empuxo, decorrente da variação da temperatura da fase líquida. Este empuxo é o responsável pela estratificação térmica apresentada, por exemplo, nas Figuras 8, para 50 min. Escoamento em sentido inverso ao citado anteriormente ocorre junto a interface sólido líquido, uma vez que a fase líquida cede calor para a fase sólida, reduzindo assim sua massa específica. Estes dois escoamentos formam uma grande recirculação, decorrente da alta temperatura da parede direita em relação a temperatura da fase sólida. Processo semelhante pode ser observado entre a base da cavidade e a base da aleta, provocando nesta região, outra grande recirculação, uma vez que, pela direita tem-se alta temperatura em relação a temperatura da fase sólida, que se encontra na esquerda.

Além das duas grandes recirculações citadas anteriormente, pode-se observar também recirculações situadas muito próximas ao topo da aleta, as quais podem ser também classificadas como convecção de Rayleigh-Bénard, uma vez que o aquecimento se dá pelo topo da aleta. Além disso, com a redução da  $RA_f$ , observa-se uma aceleração do escoamento ascendente acima da aleta, o que pode ser identificado pela maior definição do perfil de velocidades junto a parede vertical direita. Isso ocorre devido ao aumento do perímetro da aleta inserido no PCM e, conseqüentemente, aumento de calor inserido no mesmo.

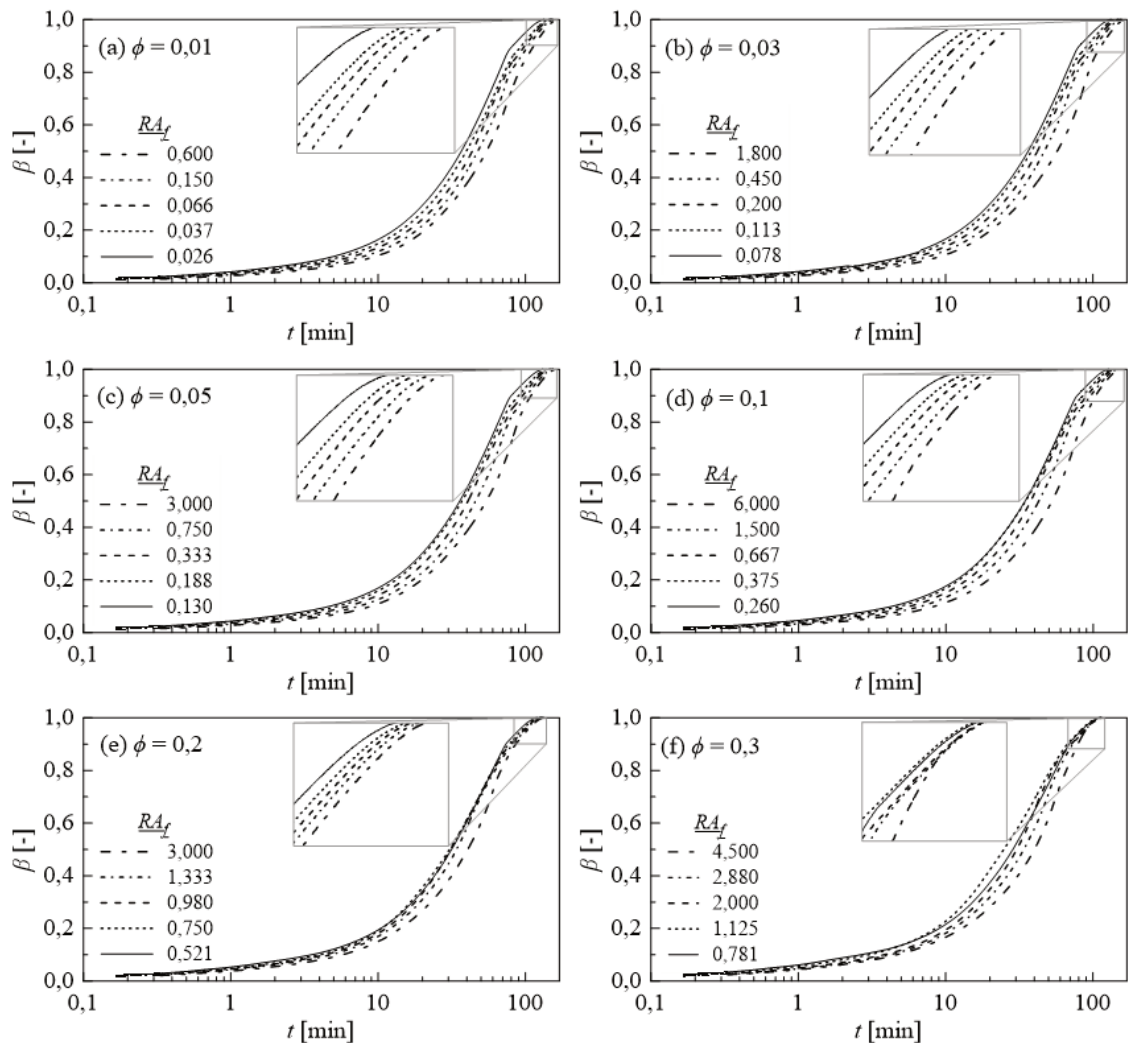
Figura 9 - Campos de velocidade em  $t = 30$  min, para  $\phi = 0,01$ :  
 (a)  $RA_f = 0,150$ , (b)  $RA_f = 0,026$



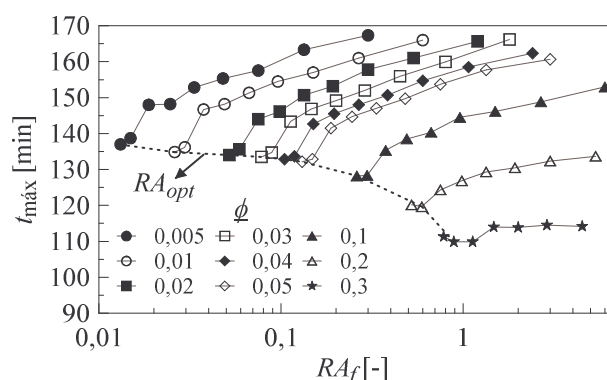
Nas Figuras 10(a-f) são apresentadas variações de  $\beta$  em função do tempo, para diferentes  $RA_f$ , e  $\phi = 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2$  e  $0,3$ , respectivamente. Apesar das poucas diferenças, nestas figuras pode-se observar que, quanto maior a  $RA_f$  ( $RA_f = H_f / W_f$ ), maior é o tempo necessário para o PCM fundir completamente ( $\beta = 1$ ), independentemente do valor do  $\phi$ . Uma vez que as maiores  $RA_f$  representam aletas com menor área de troca térmica, é esperado que estas transfiram menos calor por unidade de tempo.

Figura 10 - Fração de líquido ( $\beta$ ) x tempo, para diferentes  $RA_f$ :

(a)  $\phi = 0,01$ ; (b)  $\phi = 0,03$ ; (c)  $\phi = 0,05$ ; (d)  $\phi = 0,1$ ; (e)  $\phi = 0,2$  e (f)  $\phi = 0,3$



A Figura 11 mostra quais foram as razões de aspecto ótimas ( $RA_{opt}$ ) obtidas para cada  $\phi$ . Nesta figura, cada símbolo representa o tempo máximo de fusão, para cada um dos 78 casos simulados. Para os  $\phi$  de 0,005 até 0,1, os menores tempos do processo de fusão foram obtidos para as menores  $RA_f$ , representando, portanto, as respectivas  $RA_{opt}$ . Já para  $\phi = 0,2$  e 0,3, o menor tempo ocorreu na segunda menor  $RA_f$ , correspondendo as suas  $RA_{opt}$ . Essas  $RA_{opt}$  estão representadas, na mesma figura, através da curva de  $RA_{opt}$ . Comportamento similar foi verificado por Biserni *et al.* (2004), na qual as  $RA_{opt}$  obtidas, para os menores valores de  $\phi$ , foram aquelas cujas aletas penetraram mais na cavidade. Na Tabela 5 são apresentados, respectivamente, os valores das  $RA_{opt}$  obtidas para os diferentes  $\phi$  analisados.

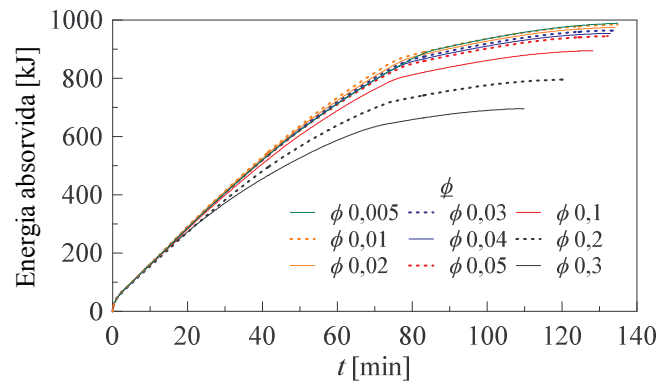
Figura 11 - Tempo máximo de fusão de cada aleta, para diferentes  $RA_f$ , de diferentes  $\phi$ Tabela 5 -  $RA_{\text{opt}}$  de diferentes  $\phi$ 

$\phi$	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1	0,2	0,3
$RA_{\text{opt}}$	0,013	0,026	0,052	0,078	0,104	0,130	0,260	0,592	0,889

Uma vez que a área da cavidade ( $A$ ) é mantida constante, a área da aleta ( $A_f$ ) aumenta quando a fração de área ( $\phi = A_f/A$ ) aumenta. Com estas condições, o aumento de  $\phi$  implica na redução da quantidade de massa contida na cavidade e conseqüente variação da energia absorvida pela cavidade. Este comportamento pode ser observado na Figura 12, a qual apresenta, para diferentes  $\phi$ , a energia total absorvida pela cavidade em função do tempo, para as diferentes  $RA_{\text{opt}}$ . Pode-se observar que, conforme  $\phi$  aumenta, ocorre redução da energia absorvida. Como exemplo, para  $\phi = 0,1$  e  $\phi = 0,3$ , em  $t = 100$  min, a energia absorvida em foi de, aproximadamente, 861 kJ e 690 kJ, respectivamente, o que representa uma diferença de, aproximadamente, 20% de energia absorvida. No entanto, para uma variação de  $\phi$  de 10% ( $\phi = 0,005$  e  $\phi = 0,05$ ), em  $t = 100$  min, a energia absorvida foi de, aproximadamente, 935 kJ e 902 kJ, respectivamente, o que representa uma variação de, aproximadamente, 3% de energia absorvida. Com estes resultados pode-se dizer que a redução da energia absorvida é significativa apenas para  $\phi$  maiores que 0,05.



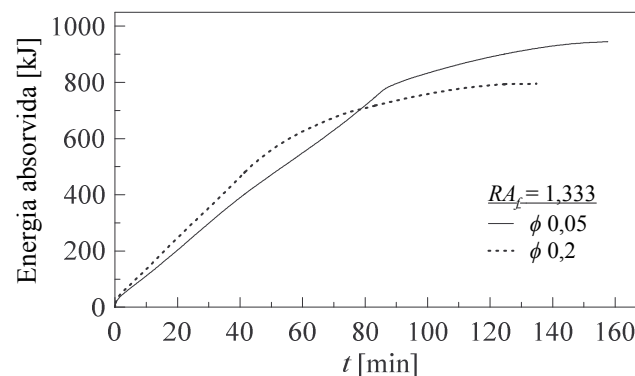
Figura 12 - Energia absorvida, para as  $RA_{opt}$ , de diferentes  $\phi$



Fonte: o autor (2018).

Na Figura 13 é apresentado a variação da energia absorvida em função do tempo para o caso de  $RA_f = 1,33$  e  $\phi = 0,05$  e  $0,2$ . Observa-se que, com o aumento de  $\phi$ , há redução da energia absorvida, porém, nota-se que nos instantes iniciais há uma maior taxa de absorção de energia. Como exemplo, em  $t = 60$  min, para  $\phi = 0,05$  e  $\phi = 0,2$ , foi absorvido, aproximadamente, 549 kJ e 625 kJ, respectivamente, o que corresponde a uma diferença de, aproximadamente, 12% de energia absorvida. Este comportamento pode ser interessante em aplicações que necessitam de uma elevada taxa de armazenamento em um curto período de tempo. Já nos instantes finais, observa-se comportamento inverso. Em  $t = 120$  min, para  $\phi = 0,05$  e  $0,2$  foi absorvido, aproximadamente, 890 kJ e 790 kJ, respectivamente. Esta variação de 15% na fração de área, corresponde a uma redução de, aproximadamente, 11% na absorção total de energia.

Figura 13 - Energia absorvida, para mesma  $RA_f$ , de diferentes  $\phi$



Fonte: o autor (2018).

Os diferentes mecanismos de transferência de calor em um processo de fusão (condução e convecção) podem ser identificados através da variação do número de Nusselt ( $Nu$ ), Eq. (8), em função do número de Fourier ( $Fo$ ).



$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (8)$$

onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor e  $L_c$  é o comprimento característico, obtidos, respectivamente, por:

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_m)\Delta t} \quad (9)$$

$$L_c = A^{1/2} \quad (10)$$

onde  $Q$  é a quantidade de calor absorvido no intervalo de tempo  $\Delta t$ ,  $A$  é a área de transferência de calor (incluindo parede lateral direita e perímetro da aleta),  $T_w$  é a temperatura da parede e  $T_m$  é a temperatura de fusão do PCM. Já o número de  $Fo$  é obtido conforme Eq. (11).

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2} \quad (11)$$

onde  $\alpha$  é a difusividade térmica.

Nas Figuras 14(a-f) são apresentados perfis de  $Nu$  em função de  $Fo$ , para diferentes  $RA_f$  e  $\phi = 0,01, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2$  e  $0,3$ , respectivamente. Inicialmente pode-se observar que, independentemente dos valores de  $RA_f$  e  $\phi$ , todos os resultados apresentam 3 situações distintas: I – redução acentuada de  $Nu$  nos instantes iniciais; II – valores de  $Nu$  sem grandes variações, apesar das oscilações, na maior parte do processo de fusão e III – redução acentuada de  $Nu$  nos instantes finais.

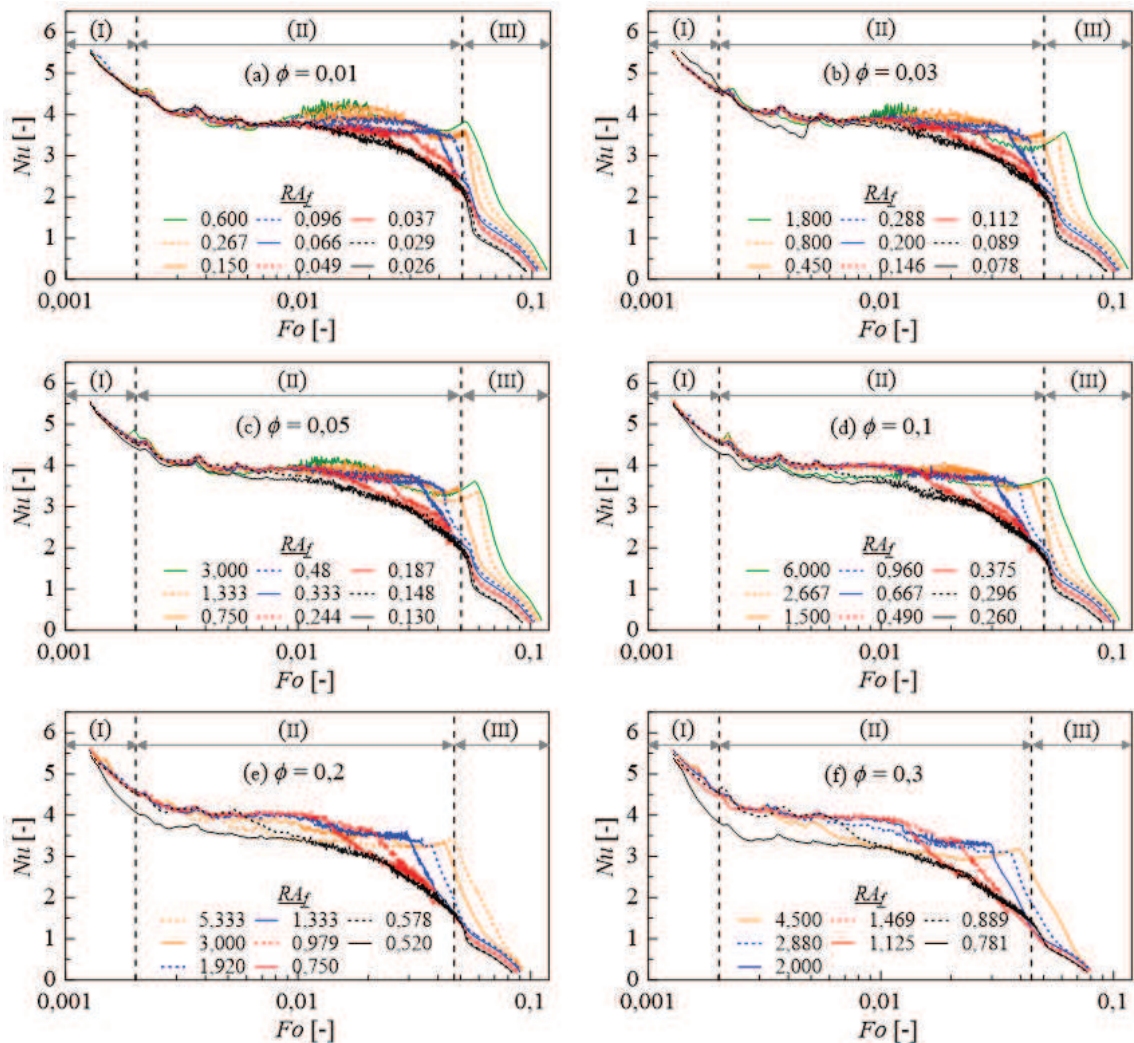
A baixa resistência térmica da fina camada de PCM fundido junto à parede nos instantes iniciais permite que se caracterize a região I como condutiva. Com o início do processo de fusão, ainda no regime I, ocorre aumento da camada de líquido, o que gera mudança do mecanismo de transferência de calor, de condutivo para convectivo, representado pela região II. No regime II, o número de  $Nu$  continua a reduzir, porém de forma mais lenta. Este comportamento é semelhante ao verificado por Ji *et al.* (2008).

Como visto anteriormente nos campos de velocidade (Figura 9), o aquecimento da aleta no topo da mesma faz com que ocorra recirculações do PCM líquido do tipo Rayleigh-Bénard. Estas recirculações provocam oscilações na temperatura daquela região. Consequentemente,  $Nu$  também apresenta flutuações, conforme pode-se verificar na região II da Figura 14. Estas flutuações diminuem à medida que a interface sólido-líquido se afasta da aleta. Este comportamento também foi verificado por Kamkari e Shokouhmand (2014).

Na região II da Figura 14 também pode ser observado que, quanto menor  $RA_f$  ( $RA_f = H_f / W_f$ ), maior é o tempo de ocorrência das flutuações de  $Nu$ , comentadas anteriormente. Isto ocorre devido ao aumento de  $W_f$ . Além disso, observa-se que, com o aumento de  $\phi$ , há uma redução da amplitude das instabilidades (melhor identificadas na Figura 14 (a)). Este fato justifica a redução da diferença dos tempos do processo de fusão com o aumento de  $\phi$ , verificada na análise dos perfis de fração de líquido. Nos instantes finais (região III) nota-se que o número de  $Nu$  volta a apresentar uma redução mais acentuada, devido à redução da taxa de transferência de calor, oriunda do enfraquecimento das correntes de convecção. Percebeu-se também que, para todos os  $\phi$  analisados, os casos com menor  $Nu$  foram aqueles que apresentaram processo de fusão mais rápido.

Figura 14 - Número de  $Nu$  em função do número de  $Fo$ , de diferentes  $RA_f$ , para:

(a)  $\phi = 0,01$ ; (b)  $\phi = 0,03$ ; (c)  $\phi = 0,05$ ; (d)  $\phi = 0,1$ ; (e)  $\phi = 0,2$ ; (f)  $\phi = 0,3$



#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma análise da influência da razão de aspecto de aletas em uma cavidade retangular, durante o processo de fusão do PCM ácido láurico. Os resultados foram obtidos através de simulação numérica por CFD. Com o método *Design Constructal* foram obtidas as razões de aspecto ótimas das aletas, as quais minimizaram o tempo máximo do processo de fusão.

Os resultados revelaram que, no processo de fusão do PCM em cavidade aletada, para qualquer fração de área analisada, quanto maior a razão de aspecto da aleta, maior é o tempo necessário para o processo atingir fusão completa, devido à redução da área e consequente redução da quantidade de calor transferido.

Também foi possível verificar que, quanto maior a fração de área, para um mesmo valor de razão de aspecto, menor é o tempo total do processo de fusão. Além disso, foi observado que, para cada fração de área, a redução dos valores da razão de aspecto também reduz o tempo necessário para o processo atingir fusão completa.