

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

**FRANCO PICOLI**

**INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE E PROPORÇÃO DE MASSA NO  
PROCESSO DE FUSÃO DE PCM EM TROCADORES DE CALOR DE MÚLTIPLOS  
ANÉIS**

**São Leopoldo**

**2021**

FRANCO PICOLI

**INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE E PROPORÇÃO DE MASSA NO  
PROCESSO DE FUSÃO DE PCM EM TROCADORES DE CALOR DE MÚLTIPLOS  
ANÉIS**

Dissertação apresentada como requisito 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: Profa. Dra. Rejane de César Oliveski

**Banca examinadora:**

Prof. Dr. Eduardo J. Cidade Cavalcanti (UFRN)

Profa. Dra. Flávia S. Franceschini Zinani (UNISINOS)

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander (UNISINOS)

São Leopoldo

2021

P598i

Picoli, Franco.

Influência da excentricidade e proporção de massa no processo de fusão de PCM em trocadores de calor de múltiplos anéis / Franco Picoli. – 2021.

80 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.

“Orientadora: Profa. Dra. Rejane de César Oliveski.”

1. Armazenadores térmicos. 2. Materiais de mudança de fase. 3. Redução do tempo de fusão. 4. Múltiplos anéis. 5. Proporção de massa. 6. Excentricidade. I. Título.

CDU 621

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

## **Agradecimentos**

Expresso meus sinceros agradecimentos:

À Deus, pela maior graça que destes: a vida;

À minha orientadora, professora Dra. Rejane de César Oliveski, pela enorme ajuda, conhecimento e dedicação, não só na orientação deste trabalho, mas ao longo de todo o curso;

Aos bolsistas de iniciação científica do Laboratório de Simulação numérica da UNISINOS, em especial ao Rodrigo Menezes Kerber pelo enorme apoio prestado no desenvolvimento do trabalho;

Aos meus pais, Lucas Picoli e Helena Corteze Picoli, pelo amor imensurável e pela educação que me deram;

À minha esposa, Márcia Maria Sulzbach, pelo amor, companheirismo e carinho, prestados ao longo desse período;

À minha irmã, Viviane Corteze Picoli, pela amizade e companheirismo;

À CAPES pela bolsa de estudos concedida a qual me permitiu realizar o curso e este trabalho;

Ao PPG em Engenharia Mecânica da UNISINOS por todo o atendimento e infraestrutura disponibilizados para a realização do trabalho;

Aos professores do curso, que souberam transmitir de forma distinta o conhecimento sobre as mais diversas áreas da engenharia;

Ao SENAI, em especial ao Diretor Rafael Rogério Brunelli e as Coordenadoras Simone Sonza Basso, Aline Daniela Dutra e Marlene Da Ré, por todo apoio prestado durante a realização do curso e do trabalho;

Aos meus amigos, por sempre estarem presentes nas horas boas e ruins.

## AGRADECIMENTOS A CAPES

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

Dedico este trabalho:  
Aos meus pais, Lucas e Helena  
À minha esposa Márcia  
À minha irmã Viviane

## RESUMO

Armazenadores térmicos constituem um importante sistema para armazenamento de energia, possuindo ampla faixa de utilização dentro da engenharia. Dentre os tipos existentes, os de calor latente oferecem vantagens em relação aos demais, contudo, ainda possuem algumas limitações para sua aplicação, sendo uma das principais a baixa condutividade térmica dos materiais utilizados para o armazenamento da energia. Neste estudo, é investigada a influência da combinação de diferentes geometrias, excentricidades e proporções de massa entre anéis no processo de fusão de material de mudança de fase (PCM) em um armazenador de energia térmica de múltiplos anéis. O estudo foi realizado por fluidodinâmica computacional considerando um domínio bidimensional. O PCM analisado foi o RT82. Para todos os arranjos analisados foram mantidas constantes a área de troca térmica e a massa de PCM do sistema. O modelo numérico utilizado é composto pelas equações da quantidade de movimento, conservação de massa e energia, acrescidas do modelo de mudança de fase. A validação numérica foi realizada utilizando resultados experimentais retirados da literatura. Os resultados do estudo revelam que a geometria de seção quadrada horizontal proporcionou os menores tempos de fusão do PCM comparando proporção de massa entre anéis e excentricidades equivalentes. O aumento da razão de proporção de massa entre os anéis contendo PCM contribuiu para a redução do tempo total de fusão no sistema ocasionada principalmente pela redução da quantidade de massa no anel externo, aumentando, conseqüentemente, a taxa de fusão nele. A excentricidade dos tubos contribuiu para reduzir o tempo total de fusão, distribuindo a massa da região inferior para a região superior dos anéis onde ocorrem as maiores taxas de fusão, contudo há uma limitação, pois, valores elevados de excentricidade elevam demasiadamente a quantidade de massa na região superior reduzindo a taxa de fusão. A combinação entre o aumento da razão de proporção de massa entre os anéis e da excentricidade auxiliaram na redução do tempo de fusão do PCM, sendo que a combinação ótima foi a do arranjo com geometria quadrada horizontal,  $\psi = 26/74$  e  $\theta = 10$  mm, obtendo um tempo total de 54,5 min.

**Palavras-chave:** Armazenadores térmicos, Materiais de mudança de fase, Redução do tempo de fusão, Múltiplos anéis, Proporção de massa, Excentricidade.

## ABSTRACT

Thermal energy storages are an important system for energy storage, having a wide range of use within engineering. Among the existing types, the latent heat ones offer advantages over the others, however, they still have limitations for their application, one of the main ones being the low thermal conductivity of the materials used for energy storage. In this study, the influence of the combination of different geometries, eccentricities and mass proportion between rings on the phase change material (PCM) fusion process in a multi-ring thermal energy store is investigated. The study was carried out by computational fluid dynamics considering a two-dimensional domain. The analyzed PCM was the RT82. For all the analyzed arrangements, the thermal exchange area and the system's PCM mass were kept constant. The numerical model used is composed by the equations of momentum, mass and energy conservation, plus the phase change model. Numerical validation was performed using experimental results taken from the literature. The results of the study reveal that the horizontal square section geometry provided the shortest melting times of the PCM comparing mass proportion between rings and equivalent eccentricities. The increase in the mass ratio between the rings containing PCM contributed to the reduction of the total fusion time in the system, mainly caused by the reduction in the amount of mass in the outer ring, consequently increasing the fusion rate in it. The eccentricity of the tubes contributed to reduce the total melting time, distributing the mass from the lower region to the upper region of the rings where the highest melting rates occur, however there is a limitation, since high eccentricity values excessively increase the amount of mass in the upper region reducing the melt rate. The combination between the increase in the ratio of mass ratio between the rings and the eccentricity helped to reduce the melting time of the PCM, and the optimal combination was the arrangement with horizontal square geometry,  $\psi = 26/74 \text{ \%/\%}$  and  $\theta = 10 \text{ mm}$ , obtaining a total time of 54.5 min.

**Keywords:** Thermal energy storages, Phase change materials, Melting time reduction, Multiple rings, Mass proportion, Eccentricity.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Comparação da capacidade de armazenamento e temperatura de operação de sistemas que operam por meio de calor latente, sensível e químico ...	24
Figura 2.2 – Classificação dos materiais de mudança de fase.....	25
Figura 2.3 – Vista de um armazenador térmico de calor latente de múltiplos tubos concêntricos (triplex). ....	30
Figura 2.4 - Evolução microestrutural transitória durante a fusão da parafina .....	32
Figura 3.1 – Trocadores de calor com diferentes formas de aletas. (a) aleta anelar; (b) aleta helicoidal dupla; (c) aleta helicoidal quádrupla; (d) aleta longitudinal. ....	35
Figura 3.2 - Fração líquida de PCM em geometrias de seção anelar excêntrica e concêntrica em diferentes instantes. (a) excentricidade vertical descendente; (b) concentricidade (c); excentricidade vertical ascendente. ....	36
Figura 3.3 - Contornos de fração líquida nos arranjos analisados em diferentes instantes de tempo. ....	37
Figura 4.1 – Seção transversal das geometrias estudadas, sendo $\psi = 20/80$ %/% e $\theta = 15$ mm. (a) circular, (b) quadrada horizontal e (c) quadrada inclinada $45^\circ$ .....	38
Figura 5.1 – Temperatura média vs. tempo: experimental de Al-Abidi et al. (2013) e numérico do presente trabalho.....	43
Figura 5.2 – Campos de temperatura para $t = 30$ min. (a) (AL-ABIDI et al., 2013a), (b) presente trabalho. ....	44
Figura 5.3 – Malhas computacionais com detalhes do refinamento: (a) geometria circular; (b) geometria quadrada horizontal e (c) geometria quadrada inclinada $45^\circ$ .45	
Figura 6.1 – Campos de fração de líquido $\gamma$ , com $\psi = 20/80$ e $\theta = 0$ : (a) geometria circular; (b) geometria quadrada horizontal; (c) geometria quadradas inclinada $45^\circ$ .48	
Figura 6.2 – Perfil de fração de líquido $\gamma$ , $\psi = 14/86, 20/80$ e $26/74$ %/%; $\theta = 0, 5, 10$ e $15$ mm: (a-d) geometria circular, (e-h) geometria quadrada horizontal e (i-l) geometria quadrada inclinada $45^\circ$ .....	50
Figura 6.3 – Perfil de $\gamma_{int}$ e $\gamma_{ext}$ , para $\psi = 14/86, 20/80$ e $26/74$ %/%; $\theta = 0, 5, 10$ e $15$ mm: (a-d) geometria circular,; (e-h) geometria quadrada horizontal e (i-l) geometria quadrada inclinada $45^\circ$ .....	52
Figura 6.4 – Perfil de fração de líquido $\gamma$ , para $\theta = 0, 5, 10$ e $15$ mm; $\psi = 14/86, 20/80$ e $26/74$ %/%: (a-d) geometria circular, (e-h) geometria quadrada na horizontal e (i-l) geometria quadrada inclinada $45^\circ$ .....	54

Figura 6.5 – Tempo total de fusão para as geometrias circular, quadrada horizontal e quadrada inclinada 45°.  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15\text{mm}$ ;  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74$ . .....55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Propriedades termofísicas do PCM RT82. ....	39
Tabela 4.2 – Dimensões dos tubos de geometria circular, em contato com o PCM. ....	40
Tabela 4.3 – Dimensões dos tubos de geometria quadrada horizontal e inclinada 45°, em contato com o PCM. ....	40
Tabela 5.1 – GCI das geometrias utilizadas no presente trabalho. ....	46

## LISTA DE SIGLAS

CFD	Fluidodinâmica Computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> )
FT	Fluido Térmico
GCI	Índice de Convergência de Malha (Grid Convergence Index)
LHTES	Armazenador de Energia Térmica de Calor Latente ( <i>Latent Heat Thermal Energy Storage</i> )
PCM	Materiais de Mudança de Fase ( <i>Phase Change Material</i> )
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SHTES	Armazenador de Energia Térmica de Calor Sensível ( <i>Sensible Heat Thermal Energy Storage</i> )
TES	Armazenador de Energia Térmica ( <i>Thermal Energy Storage</i> )

## LISTA DE SIMBOLOS

### Nomenclatura

$b$	comprimento	[mm]
$C$	constante da zona porosa ( <i>Mushy Zone</i> )	[kg m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$C_p$	calor específico	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$dt$	intervalo de tempo	[s]
$g$	aceleração da gravidade	[m s <sup>-1</sup> ]
$k$	condutividade térmica	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$L$	calor latente	[J kg <sup>-1</sup> ]
$m$	massa	[kg]
$p$	pressão	[Pa]
$S$	termo fonte	[Pa m <sup>-1</sup> ; W m <sup>-3</sup> ]
$T$	temperatura	[K]
$t$	tempo	[s]
$\vec{V}$	vetor velocidade	[m s <sup>-1</sup> ]
$x$	eixo de coordenada x	[-]
$y$	eixo de coordenada y	[-]

### Símbolos Gregos

$\Delta$	variação	[-]
$\beta$	coeficiente de expansão térmica	[1/K]
$\gamma$	fração de líquido	[-]
$\varepsilon$	constante numérica	[-]
$\theta$	excentricidade	[mm]
$\lambda$	entalpia	[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> ]
$\psi$	proporção de massa	[%/%]

### Subíndices

1	unidade 1
2	unidade 2
3	unidade 3

4	unidade 4
ext	externo
int	interno
<i>l</i>	líquido
<i>L</i>	variação na mudança de fase
ref	referência
s	sólido
<i>sen</i>	sensível

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1. TEMA .....	19
1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	19
1.3. OBJETIVOS .....	19
<b>1.3.1. Objetivo Geral</b> .....	<b>19</b>
<b>1.3.2. Objetivos Específicos</b> .....	<b>20</b>
1.4. JUSTIFICATIVA .....	20
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
2.1. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO .....	22
<b>2.1.1. Sistemas de armazenamento de calor latente</b> .....	<b>23</b>
2.2. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE .....	24
<b>2.2.1. Classificação dos PCM</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.2. Características dos PCM</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.3. Parâmetros para Escolha de PCM</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.4. Aplicações de PCM</b> .....	<b>27</b>
<b>2.2.5. Formas de confinamento de PCM</b> .....	<b>29</b>
2.3. ARMAZENADORES DE CALOR LATENTE TIPO CASCO E TUBO .....	30
2.4. PROCESSOS DE MUDANÇA DE FASE.....	31
2.5. ESTUDO ATRAVÉS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL .....	32
<b>2.5.1. Erros e incertezas em fluidodinâmica computacional</b> .....	<b>33</b>
<b>3. PESQUISAS RELACIONADAS AO TEMA DO TRABALHO</b> .....	<b>34</b>
<b>4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA</b> .....	<b>38</b>
4.1. QUANTIDADE DE MASSA E ÁREA DE TROCA TÉRMICA .....	39
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
5.1. MODELO MATEMÁTICO .....	41
5.2. CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO.....	42
5.3. ABORDAGEM NUMÉRICA .....	42
5.4. VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE MALHA .....	43
<b>5.4.1. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>43</b>
<b>5.4.2. VALIDAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	<b>44</b>
<b>5.4.3. ANÁLISE DE MALHA</b> .....	<b>44</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>47</b>

6.1. INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO DE MASSA ENTRE ANÉIS.....	49
6.2. INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE.....	53
6.3. INFLUÊNCIA COMBINADA DA EXCENTRICIDADE E DA PROPORÇÃO DE MASSA.....	54
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>56</b>
<b>8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>67</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda mundial por energia nos últimos anos, impulsionado pelo crescimento populacional e econômico não é novidade. Só o consumo de combustível fóssil aumentou 134,2% entre 1971 e 2018. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020a). Esse aumento do consumo gerou também problemas ambientais graves, como o aumento da emissão, na atmosfera, de gases nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), aumentando 235,5% no mesmo período. (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020b). Buscando minimizar estes impactos negativos vem crescendo também a busca por produção de energias renováveis, como a solar, eólica, geotérmica, hidroelétrica e bioenergia. (MAHMOUD et al., 2020).

As energias renováveis possuem inúmeras vantagens, quando comparadas as não renováveis, entre elas estão a disponibilidade a longo prazo, acessibilidade e o benefício ambiental. (HUSSAIN; ARIF; ASLAM, 2017). No entanto, a intermitência na geração de energia nestes tipos de sistemas, juntamente com a oscilação na demanda por energia, têm sido os principais problemas encontrados em suas aplicações. (NAZIR et al., 2019).

Uma das formas encontradas para minimizar os problemas citados anteriormente está na integração da produção de energias renováveis com sistemas de armazenamentos. (ELBAHJAOU; EL QARNIA; NAIMI, 2018). Armazenadores de energia térmica são um exemplo dessa integração onde, instalados juntamente com fontes geradoras de energias térmicas, como coletores solares, podem armazenar o excedente de energia gerada em um período e liberá-la em outro, conforme a demanda.

Entre os armazenadores de energia térmica, os que armazenam energia por calor latente vem ganhando maior atenção devido as vantagens que oferecem, em relação aos armazenadores por calor sensível, que são a maior capacidade de armazenamento para um mesmo volume e a propriedade de armazenar calor a uma temperatura quase constante. (SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, 2009). Em comparação aos sistemas termoquímicos de armazenamento de energia os sistemas que utilizam calor latente possuem a vantagem de possuírem maior faixa de temperaturas de operação. (NAZIR et al., 2019).

Apesar das vantagens, os sistemas de armazenamento por calor latente ainda possuem limitações para sua aplicação, sendo uma das principais a baixa condutividade térmica dos materiais utilizados para o armazenamento da energia (AL-ABIDI et al., 2013a). Muitos estudos vêm sendo realizados visando encontrar formas de minimizar o problema, porém algumas propostas, como o micro encapsulamento ou a inserções de “espuma” de metal, acabam se tornando muito caras e / ou complexas. (KADIVAR et al., 2019).

Desta forma, armazenadores de energia térmica de calor latente que utilizam múltiplos tubos, com configuração anelar, podem ser alternativas altamente viáveis por possuírem relativa eficiência (em termos de carga e descarga térmica) com baixo custo e complexidade de fabricação. Alguns pesquisadores já realizaram estudos nesta área como Darzi; Farhadi; Sedighi (2012), Jourabian (2013); Kadivar et al., (2019), Pahamli et al. (2016), (2018); Yusuf Yazici et al. (2014), Zheng; Xu; Li (2018), Dhaidan et al. (2013), Dutta; Atta; Dutta, (2008) realizaram experimentos e simulações em armazenadores de calor latente e múltiplos tubos analisando a influência da excentricidade de tubos de seção circular no processo de fusão de PCM. Em todos os arranjos verificou-se que a excentricidade dos tubos reduz o tempo de fusão do PCM. Gorzin et al. (2018, 2019), analisou o processo de fusão e solidificação de PCM em tubos e anéis de seção circular, variando a distribuição de massa entre o anel externo e o tubo central (interno). O pesquisador constatou que a proporção de massa entre os anéis contribuiu para a redução do tempo de fusão e solidificação do PCM, porém a proporção foi diferente para cada arranjo.

O presente trabalho procura contribuir ampliando os estudos nesta direção, investigando o processo de fusão de PCM contidos em múltiplos anéis de geometrias de seções circular e quadrada de um armazenador de energia térmica, bem como analisar a influência de diferentes excentricidade e proporções de massa entre os anéis, mantendo a mesma quantidade massa de PCM e mesma área total de troca térmica entre os arranjos estudados.

## 1.1. TEMA

No presente trabalho é explorado o processo de fusão de um PCM em anéis de geometrias de seções anelares circular e quadrada, tendo essa última geometria duas posições distintas, sendo uma horizontal e outra inclinada 45°. Esses arranjos formam um armazenador de energia térmica de calor latente e múltiplos anéis.

## 1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA

Foi analisado o processo de fusão do PCM de nome comercial RT82 no interior de anéis que constituem um armazenador de energia térmica de múltiplos anéis, considerando a combinação de diferentes geometrias, sendo elas circular e quadrada, como também diferentes posições da geometria quadrada sendo elas horizontal e inclinada 45°. Foi analisado também variações de excentricidades dos tubos que formam os anéis contendo PCM, e diferentes proporções de massa de PCM entre os anéis. O estudo foi realizado de forma bidimensional com o auxílio da fluidodinâmica computacional.

Não foram analisadas as influências dos processos de troca térmica que extrapolam a camada limite e as condições de contorno. Também não foram analisados os aspectos relacionados a compatibilidade química do PCM com o material do invólucro (anéis), processos construtivos do armazenador de calor e os custos associados.

## 1.3. OBJETIVOS

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

### 1.3.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a variação de diferentes geometrias, excentricidades e proporções de massa de anéis tubulares na redução do tempo total de fusão do PCM RT82 em um armazenador de energia térmica de múltiplos anéis.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) analisar o comportamento do perfil de fração líquida, para diferentes arranjos geométricos, de proporção de massa e de excentricidade;
- b) analisar o tempo de fusão total do PCM para diferentes configurações geométricas, de proporção de massa e de excentricidade;
- c) Identificar o arranjo com a geometria, proporção de massa e excentricidade que estabeleça o menor tempo de fusão do PCM.

### 1.4. JUSTIFICATIVA

Sistemas de armazenamento de energia térmica de múltiplos tubos, que utilizam materiais de mudança de fase, podem ser uma boa alternativa para armazenamento térmico, contudo a baixa condutividade térmica dos PCM tem sido um empecilho para seu uso. Inúmeros estudos têm sido realizados com o objetivo de aprimorar a troca térmica, contudo, muitas alternativas se mostraram complexas e custosas financeiramente, tanto de materiais como de processos de fabricação.

O emprego de PCM em geometrias anelares de seção circular ou quadrada podem ser alternativas viáveis tanto do ponto de vista de eficiência de troca térmica como do econômico, já que a simplificação das formas geométricas facilita o processo de fabricação destes armazenadores. Na literatura os estudos que tratam sobre o assunto abordam, principalmente, a utilização de um único anel para o enclausuramento do PCM ou a combinação de um anel com um tubo. Outra questão pouco abordada na literatura é a geometria dos tubos, sendo que a grande maioria se limita a geometrias circulares. Deste modo, este trabalho visa contribuir aos estudos na área analisando o processo de fusão de PCM contidos em múltiplos anéis de geometrias circular e quadrada, bem como analisar a influência de diferentes excentricidades e proporções de massa entre os anéis, mantendo constante a quantidade total de massa de PCM e a área total de troca térmica, independentemente do arranjo estudado.

## 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em 8 Capítulos, sendo este primeiro Capítulo relativo as motivações e objetivos. O Capítulo 2 contempla a fundamentação teórica sobre sistemas de armazenamento de calor latente e suas características. No Capítulo 3 são apresentadas pesquisas relacionadas ao tema do presente trabalho. Os Capítulos 4 e 5 englobam a apresentação do problema a ser investigado e a metodologia proposta para isto. Os Capítulos 6 e 7 apresenta aos resultados obtidos e as conclusões a respeito. Por último, o Capítulo 8 apresenta sugestões para futuros trabalhos envolvendo o mesmo tema. Há também o Apêndice onde é apresentado o artigo submetido para publicação e apresentação no XXIV Encontro Nacional de Modelagem Computacional e XII Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais ocorrido em 2021.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Buscando minimizar os impactos negativos gerados pela crescente demanda energética no planeta, há uma busca crescente por sistemas de produção de energias renováveis, como a solar, eólica, geotérmica, hidroelétrica e bioenergia (MAHMOUD et al., 2020), como também, formas eficientes de armazenar essa energia gerada.

Uma das formas de aumentar a eficiência da produção e armazenamento de energia é através da integração da produção de energias renováveis com sistemas de armazenamentos eficientes. Entre os tipos de sistemas de armazenamentos eficientes pode-se citar os sistemas de armazenamento de calor latente. Estes sistemas possuem maior eficiência no armazenamento de energia (75 a 90%) quando comparados aos sistemas de armazenamento de calor sensível (50 a 90%). (SARBU; SEBARCHIEVICI, 2018).

### 2.1. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Os sistemas de armazenamento térmico, conhecidos pela abreviação TES (do inglês: *Thermal Energy Storage*), têm como principal objetivo armazenar energia na forma de calor para ser usado posteriormente em algum tipo de processo. Há três tipos de sistemas e são classificados quanto a forma de transferência e armazenamento do calor, sendo eles: químico, calor sensível e calor latente. (NAZIR et al., 2019).

Sistemas de armazenamento de calor por processo químico, operam através de reações químicas reversíveis do composto utilizado para armazenamento. O calor é armazenado quando ocorre a dissociação ou rompimento da estrutura química do composto e é liberado quando ocorre a reação de síntese. (CÁRDENAS; LEÓN, 2013). O calor armazenado depende da quantidade de material de armazenamento, o calor de reação e a extensão da conversão. (SHARMA et al., 2009).

Já, os sistemas de armazenamento de calor sensível, também conhecidos pela sigla SHTES (do inglês: *Sensible Heat Thermal Energy Storage*), são caracterizados pelo processo de absorção ou liberação de energia térmica induzida pela variação da temperatura do material armazenador. (NAZIR et al., 2019). O material aumenta gradativamente sua temperatura durante a absorção e diminui, também de forma gradativa, durante a liberação. A quantidade de calor armazenado depende da

quantidade de material, do calor específico deste e da mudança de temperatura. (KUMAR; SHUKLA, 2015).

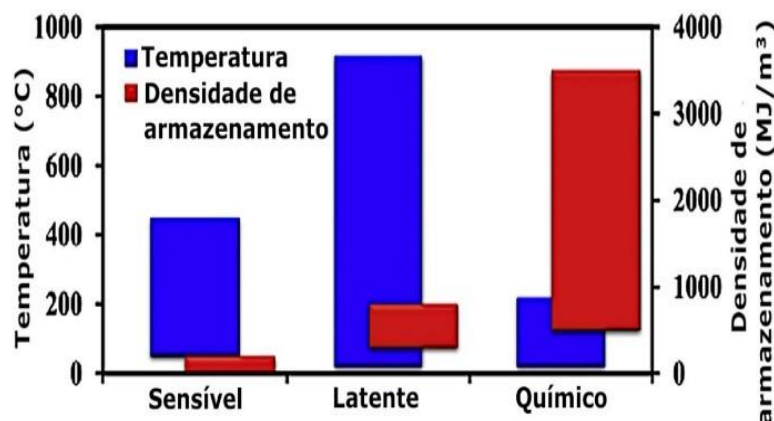
Em sistemas de armazenamento de calor latente, LHTES (do inglês: *Latent Heat Thermal Energy Storage*), o processo de absorção ou liberação de energia térmica ocorre quando há uma mudança de fase do material armazenador. A temperatura neste caso permanece praticamente constante. A quantidade de calor armazenado depende da quantidade de material e do calor latente de fusão do material armazenador. (PIELICHOWSKA, K.; PIELICHOWSKI, 2014). Os LHTES possuem a vantagem de terem maior densidade de armazenamento de energia do que os sistemas que utilizam calor sensível e trabalham em uma faixa de temperatura maior do que os sistemas que operam por reações químicas. (NAZIR et al., 2019).

### **2.1.1. Sistemas de armazenamento de calor latente**

Estes modelos de sistemas de armazenamento de calor possuem, como característica principal, o uso de materiais que armazenam a energia térmica na forma de calor latente. Isto confere uma capacidade de armazenamento superior aos materiais que absorvem energia na forma de calor sensível. (FARID et al., 2004). Esta característica pode ser observada de forma mais clara na Fig. 2.1, a qual mostra os diferentes níveis de temperatura e de densidade térmica para diferentes tipos de armazenagem térmica. Nela é possível observar, também, que os sistemas de armazenamento de calor latente possuem capacidade de armazenamento inferior aos sistemas de armazenamento por meio químico, mas isso é compensado por uma maior variação de temperatura de operação, aumentando assim, sua área de aplicação. (NAZIR et al., 2019).

Os materiais armazenadores de energia empregados em sistemas de armazenamento de calor latente são chamados de matérias de mudança de fase, também conhecidos pela sigla PCM (do inglês: *Phase Change Material*).

Figura 2.1 – Comparação da capacidade de armazenamento e temperatura de operação de sistemas que operam por meio de calor latente, sensível e químico



Fonte: Adaptado de Nazir et al., (2019).

## 2.2. MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Materiais de mudança de fase, conhecidos também pela sigla PCM, são materiais que possuem, como principal característica absorver ou liberar energia térmica a uma determinada temperatura sem variação considerável. Essa energia é absorvida na forma de calor latente durante mudança de fase do material. Outras características importantes são a alta capacidade de armazenamento e menor variação de volume quando comparado a materiais que armazenam energia na forma de calor sensível. Essas características fazem com que estes materiais tenham aplicações em inúmeras áreas.

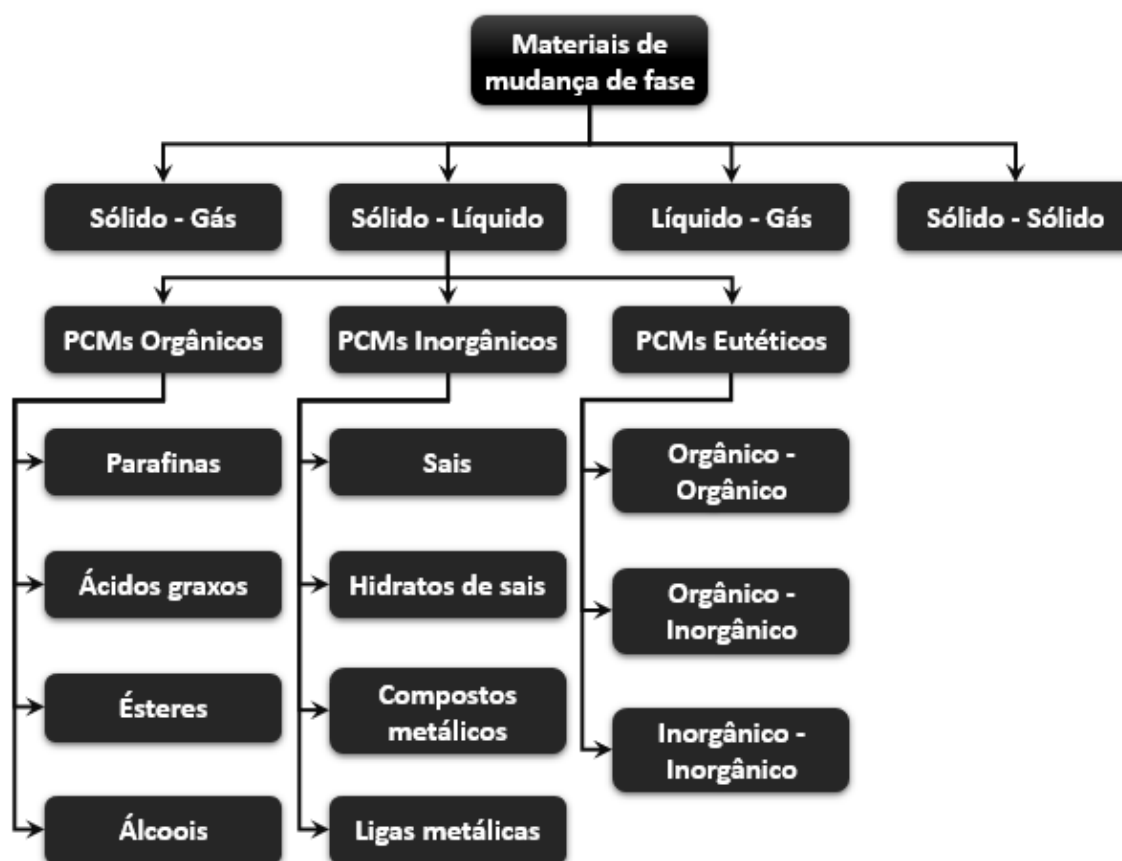
Estudos relacionados a PCM ocorrem a várias décadas. A NASA, iniciou estudos nesta área em 1964 com o objetivo de otimizar o gerenciamento térmico de suas aeronaves. (HALE et al., 1971). No final da década de 80 Solomon (1979) e Güçeri; Faunce (1979), realizaram estudos de incorporação de PCM em materiais de construção visando otimizar o conforto térmico em residências. Em 1983 Bhargava (1983), estudava o uso de PCM em sistemas de armazenamento de energia térmica. Hoje além das áreas já citadas, são desenvolvidos estudos para o uso de PCM em sistemas de recuperação de calor residual (NARDIN et al., 2014), tecidos termorreguladores (KAZEMI; MORTAZAVI, 2014), gerenciamento térmico de baterias (PAN; ZHONG, 2018), gerenciamento de temperatura em microeletrônica (GARIMELLA, 2006), aplicações térmicas fotovoltaicas (HACHEM et al., 2017) e na gestão da temperatura de ambientes. (ALEHOSSEINI; JAFARI, 2020).



### 2.2.1. Classificação dos PCM

A maioria dos PCM são classificados conforme a natureza dos materiais, sendo divididos em orgânicos, inorgânicos e eutéticos. (SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, 2009). Os PCM orgânicos, por sua vez, são divididos em parafinas, ácidos graxos, ésteres e álcoois. Os inorgânicos em sais, sal-hidratos e metais. Por fim, os PCM eutéticos, que são uniões de materiais orgânicos e inorgânicos, são subdivididos em orgânicos-orgânicos, inorgânicos-inorgânicos e orgânicos-inorgânicos. (NAZIR et al., 2019). As classificações citadas podem ser visualizadas na Fig. 2.2.

Figura 2.2 – Classificação dos materiais de mudança de fase



Fonte: Adaptado de Nazir et al., (2019).

Outra classificação pode ser adotada quando se refere ao mecanismo de mudança de fase, que está ligado a fase inicial e final do PCM. Essa classificação é dividida em líquido-gás, sólido-gás, sólido-sólido, e sólido-líquido (PIELICHOWSKA,

K.; PIELICHOWSKI, 2014), sendo que esta direção de mudança de fase pode ser invertida.

### **2.2.2. Características dos PCM**

Dentre os PCM classificados conforme a natureza dos materiais, os orgânicos apresentam inúmeras características positivas, tais como: solidificação sem muito super resfriamento ou sub resfriamento, capacidade de serem incorporados diretamente a outros materiais, compatibilidade com materiais convencionais de construção, disponibilidade em ampla faixa de temperatura, sem segregação, quimicamente estáveis, possuem alto calor de fusão, seguros (atóxicos), não reativos e recicláveis. (KUZNIK et al., 2011; ZHAO; ZHANG, 2011). Como desvantagens possuem baixa condutividade térmica (entre 0,13 a 0,33 W/mK), alta expansão volumétrica e são inflamáveis (dependendo da contenção). (KUZNIK et al., 2011; ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012).

Os PCM inorgânicos possuem como características condutividade térmica entre 0,5 e 5 W/mK, grande capacidade de armazenamento térmico, baixa expansão volumétrica, alto calor de fusão, são menos dispendiosos, não inflamáveis, elevada entalpia de mudança de fase e são recicláveis. (EANEST JEBASINGH; VALAN ARASU, 2020; KUZNIK et al., 2011; ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012). Como características negativas pode-se citar o alto grau de super resfriamento, falta de estabilidade térmica, segregação de fase e desidratação durante o ciclo térmico, peso elevado em alguns casos, corrosivos, propensos à degradação, instabilidade química e problemas de compatibilidade com alguns materiais de construção. (EANEST JEBASINGH; VALAN ARASU, 2020; KUZNIK et al., 2011; RATHOD; BANERJEE, 2013; SU; DARKWA; KOKOGIANNAKIS, 2015).

Os PCM eutéticos são misturas de um ou mais materiais. Possuem como características positivas altas temperaturas de fusão, alta densidade de armazenamento térmico, alta condutividade térmica (pode chegar a 180 W/mK), não há segregação de fase e a mudança de fase é congruente. (FARAJ et al., 2020; ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012). Já as características negativas são a falta de dados sobre os PCM (propriedades termo físicas), baixa capacidade total de calor latente, são dispendiosos e alguns materiais sofrem de efeito de super resfriamento. (RATHOD;

BANERJEE, 2013; SU; DARKWA; KOKOGIANNAKIS, 2015; ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012).

### **2.2.3. Parâmetros para Escolha de PCM**

Os parâmetros utilizados para a escolha de um PCM dependem, sobretudo da aplicação, que vão desde o conforto térmico de residências até o armazenamento de energia térmica na indústria. Nazir et al. (2019) descreve que as propriedades, para a escolha dos materiais de mudança de fase, são basicamente as físicas, térmicas, químicas e cinéticas, contudo, itens como custo, disponibilidade, adaptabilidade e confiabilidade também estão sendo utilizados como parâmetros importantes de seleção, bem como o atendimento a legislações referentes a riscos ambientais e a saúde humana.

Quanto as propriedades físicas desejadas para PCM, estas incluem a mudança volumétrica mínima, baixa pressão de vapor, equilíbrio de fase e alta densidade de armazenamento de energia. (SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, 2009). Entre as propriedades térmicas, a temperatura de transição de fase do PCM é o principal requisito de seleção. Outras propriedades térmicas também são desejáveis e incluem elevados valores de calor latente, condutividade térmica e capacidade térmica. (MOHAMED et al., 2017). As propriedades cinéticas desejáveis dos PCM incluem a eliminação do fenômeno do super resfriamento e uma taxa de cristalização adequada (SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, 2009), enquanto as propriedades químicas adequadas incluem alta estabilidade química, ciclo reversível de solidificação e fusão, corrosividade nula, natureza atóxica, não explosiva e não inflamável. (PIELICHOWSKA, K.; PIELICHOWSKI, 2014).

### **2.2.4. Aplicações de PCM**

Os PCM possuem uma ampla gama de aplicações que vão desde a construção e otimização de sistemas de armazenamento de energia (WANG et al., 2014), passando por sistemas de recuperação de calor residual (NARDIN et al., 2014), fibras termorreguladoras, materiais têxteis inteligentes (KAZEMI; MORTAZAVI, 2014), gerenciamento térmico de baterias (ZHAO; LV; RAO, 2017), gerenciamento de temperatura na microeletrônica (ALEHOSSEINI; JAFARI, 2020), aplicações térmicas

fotovoltaicas (HACHEM et al., 2017), aplicações em sistemas espaciais de armazenamento de energia térmica (LAFDI; MESALHY; ELGAFY, 2008) e na gestão da temperatura de estufas. (LLORACH-MASSANA et al., 2017).

Em sistemas de armazenamento de energia, um exemplo do uso de PCM está no uso em conjunto com concentradores de energia solar, para o armazenamento de energia térmica na forma de calor latente devido a sua alta capacidade de armazenamento e repetibilidade. (NOMURA; AKIYAMA, 2017).

PCM encontram utilidade também no gerenciamento térmico de baterias, principalmente baterias recarregáveis de íon-lítio que são cada vez mais utilizadas em eletrônicos portáteis, ferramentas e veículos. A vida útil e o desempenho destas baterias estão diretamente associadas aos efeitos térmicos (NAZIR et al., 2019) e o uso de PCM ajuda a suavizar o aumento de temperatura que ocorre durante a carga e descarga destas baterias, diminuindo assim a degradação do desempenho durante sua vida útil (LING et al., 2014).

Outra utilidade dos PCM, para o gerenciamento térmico, está em sistemas fotovoltaicos. O PCM é acoplado aos módulos fotovoltaicos com o objetivo de diminuir sua temperatura e conseqüentemente aumentar a eficiência. Um estudo realizado por HASAN; SAYIGH, (1994), utilizando PCM em módulos fotovoltaicos, relatou uma melhoria de 1,3% na eficiência de conversão elétrica e 41% do calor foi recuperado da superfície do módulo e utilizado para aplicações de aquecimento de água.

O conforto térmico em residências é uma das causas de maior consumo de energia no planeta. PCM são utilizados em placas de gesso com o objetivo de reduzir o aumento da temperatura em prédios e casas, reduzindo a necessidade de energia para a manutenção de temperaturas específicas nos ambientes. (SHARIFI; SHAIKH; SAKULICH, 2017).

Os aquecedores solares de água estão se tornando cada vez mais populares como alternativa aos sistemas de água quente a gás ou elétricos. (NAZIR et al., 2019). A integração de sistemas de aquecimento solar com armazenadores de energia térmica que utilizam PCM aumentaria a eficiência dos sistemas de aquecimento solar de água existentes, pois a quantidade de calor que um tanque de água contendo PCM pode absorver é muito maior do que um tanque de água convencional. (NAZIR et al., 2019). Menos flutuações na temperatura da água armazenada é outra vantagem importante destes tipos de sistemas. (MAZMAN et al., 2009).

Além do armazenamento de energia térmica quente, os PCM também oferecem uma solução promissora para armazenamento térmico frio. PCM com temperatura operacional variando de  $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  já são fabricados por empresas como a Rubitherm Technologies GmbH (2020) e PureTemp LLC (2020), contudo, mais pesquisas precisam ser feitas para a melhoria do desempenho pois a eficiência exergética ainda está abaixo de 20%. (RISMANCHI et al., 2012).

Na eletrônica, estudos com PCM tem contribuído para melhorar a eficiência do controle térmico de equipamentos eletrônicos portáteis, como o caso de telefones celulares. O gerenciamento térmico destes dispositivos tem sido um desafio devido ao aumento das funções e redução das dimensões, o que tem provocado um aumento no calor gerado e redução da área para dissipação. (SETOH; TAN; FOK, 2010).

PCM encontram aplicação até mesmo no vestuário. Algumas variedades de tecidos inteligentes utilizam PCM em sua composição visando aumentar o conforto térmico das pessoas que usam roupas feitas com estes materiais. Quando a temperatura ambiente ou corporal aumenta, os PCM incorporados na fibra têxtil tendem a absorver o calor excedente. Assim que a temperatura ambiente ou corporal começa a diminuir, o calor armazenado é liberado, mantendo o corpo em uma temperatura confortável. (IQBAL; SUN, 2014).

PCM podem ser utilizados também em dispositivos ou sistemas de armazenamento de alimentos ou medicamentos. (PIELICHOWSKA, K.; PIELICHOWSKI, 2014).

### **2.2.5. Formas de confinamento de PCM**

Como já mencionado anteriormente, a principal característica dos PCM é absorver e liberar energia térmica mudando de fase, logo, os PCM que mudam para fases líquidas, por exemplo, necessitam serem armazenados em recipientes para que não sejam dispersos e se percam na natureza. Assim é necessário formas de confinar estes materiais. As principais formas de confinar os PCM são: incorporação direta, imersão e encapsulamento. (HAWES; FELDMAN; BANU, 1993).

A incorporação direta é o método mais simples e consiste em adicionar os PCM, no estado líquidos ou em pó, diretamente a materiais que estão sendo produzidos como, por exemplo, o gesso ou o concreto. Este método, porém, pode gerar problemas como vazamentos e incompatibilidade com materiais de construção.

(ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012). A imersão consiste em imergir as peças em PCM, no estado líquido, para que ela absorva o material de mudança de fase através de seus poros. Assim, como na incorporação direta, podem ocorrer problemas como vazamentos e incompatibilidade entre os materiais (ZHOU; ZHAO; TIAN, 2012) e a peça necessita possuir certa porosidade para que o PCM possa ser absorvido. O encapsulamento é outro método de confinamento e divide-se em macro e micro encapsulamento. Nestes processos, porções de PCM são envolvidos por um material de revestimento formando cápsulas, que podem ter formatos regulares (esférica, tubular ou oval) ou irregulares. Este método é usado também para minimizar alguns problemas relacionados a baixa condutividade térmica, instabilidade térmica e o fenômeno de super resfriamento dos PCM. (SHIRIN-ABADI; MAHDAVIAN; KHOEE, 2011).

### 2.3. ARMAZENADORES DE CALOR LATENTE TIPO CASCO E TUBO

Um dos sistemas de armazenamento de energia térmica por calor latente mais utilizados usam como base os trocadores de calor do tipo casco e tubo. Segundo Agyenim et al. (2010), estes sistemas são os mais analisados pelos pesquisadores, respondendo por mais de 70% dos casos e isso se deve, segundo o pesquisador, ao fato de que a maioria dos projetos de engenharia empregam tubos cilíndricos nos projetos e porque a perda de calor nestes tipos de sistemas é mínima. Uma variação deste tipo de armazenador de energia são os de múltiplos tubos concêntricos. A Fig. 2.3 mostra um modelo deste tipo de armazenador, conhecido como triplex.

Figura 2.3 – Vista de um armazenador térmico de calor latente de múltiplos tubos concêntricos (triplex).



Fonte: adaptado de Abdulateef et al. (2019).

Os armazenadores de energia de múltiplos tubos concêntricos ou excêntricos vêm sendo estudados por diversos pesquisadores (AL-ABIDI et al., 2014; JOURABIAN; FARHADI; RABIENATAJ DARZI, 2017; KADIVAR et al., 2019; MAHDI; NSOFOR, 2017) e mostram-se uma alternativa eficiente e econômica para sistemas de armazenamento de energia por calor latente (KADIVAR et al., 2019).

#### 2.4. PROCESSOS DE MUDANÇA DE FASE

Sarbu; Sebarchievici, (2018) classificam os processos de mudança de fase em três diferentes formas conforme a condição inicial e final do material no processo, sendo elas: sólido-sólido, sólido-líquido e líquido-gás. Segundo os autores, no primeiro caso, o calor é armazenado por transição entre diferentes formas de estrutura cristalina do material. No segundo e terceiro casos o calor latente de fusão é bastante elevado, mas o segundo caso possui aumento de volume significativamente menor que o terceiro.

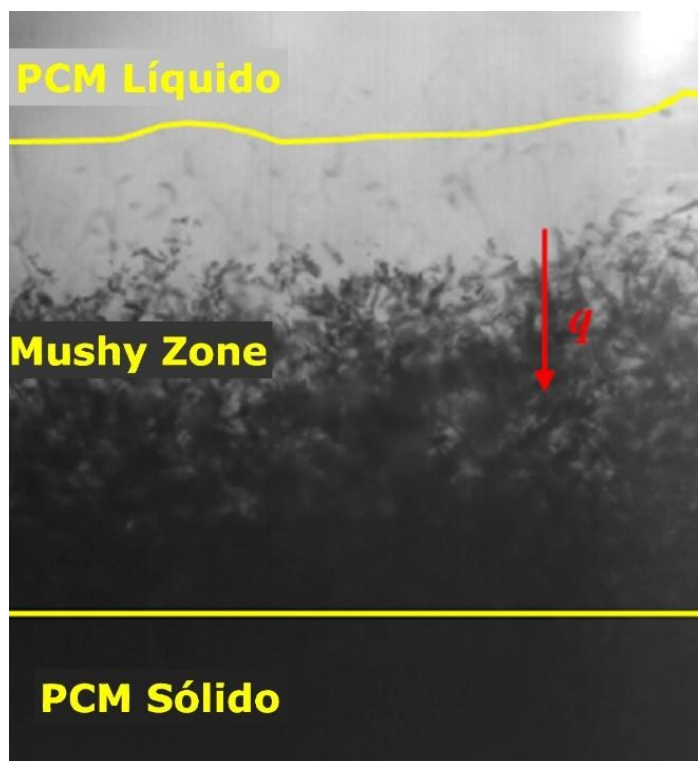
Quanto aos modos de transferência de calor, especificamente em processos sólido-líquido, Agyenim; Eames; Smyth, (2010) estabeleceram etapas para o processo de fusão baseados em seus experimentos com PCM: na primeira etapa ocorre o fornecimento de calor sensível ao material no estado sólido, por condução pura, aumentando sua temperatura. Posteriormente ocorre um segundo regime de condução, no qual o calor é transferido da parede aquecida para uma interface sólido-líquido presente no início do processo de fusão. Na terceira etapa ocorre a transição da condução para a convecção natural devido ao aumento da camada de fusão e do afastamento da interface sólido-líquido da região fornecedora de calor. Essa convecção natural depende da diferença de temperatura e da distância entre a interface sólido-líquido e a região fornecedora de calor. (SARI; KAYGUSUZ, 2002).

A interface sólido-líquido, também conhecida por *mushy zone*, é uma região mista de duas fases que aparece durante o processo de mudança de fase sólido-líquido do material. A Fig. 2.4 mostra uma visão microscópica da interface sólido-líquido durante a fusão de cera de parafina que é um tipo de material de mudança de fase. (YANG et al., 2019).

É nesta região que ocorre a mudança de fase do material, acompanhada pela absorção ou liberação do calor latente (YANG et al., 2019) e influencia significativamente as características de transferência de calor durante a fusão ou

solidificação de um material (CHEROM KHEIRABADI; GROULX, 2015), por isso, tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. (YANG et al., 2019; CHEROM KHEIRABADI; GROULX, 2015; FADL, EAMES 2019).

Figura 2.4 - Evolução microestrutural transitória durante a fusão da parafina



Fonte: adaptado de YANG et al., (2019).

## 2.5. ESTUDO ATRAVÉS DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional, conhecida pela abreviatura CFD (do inglês: *Computational Fluid Dynamics*), é uma ferramenta computacional utilizada para simular eventos físicos que ocorrem na natureza a fim de poder prevêê-los. Foi implementada no início da década de 60 em projetos, P&D e fabricação de aeronaves e motores a jato. (VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, 2007). Hoje encontra aplicações em diversas outras áreas da indústria como a automotiva, geração de energia, química, nuclear, marítima entre outras. (MOUKALLED, FADL HASSAN; MANGANI, L.; DARWISH, 2015).

Dentro da fluidodinâmica, um dos métodos de solução numérica mais utilizados é o de volumes finitos, que é uma formulação especial das diferenças finitas que, por sua vez, é uma das três técnicas de solução numéricas utilizadas atualmente.



(VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, 2007). Este método numérico transforma as equações diferenciais parciais, que representam as leis de conservação sobre volumes diferenciais, em equações algébricas discretas sobre volumes finitos (elementos ou células). (MOUKALLED, FADL HASSAN; MANGANI, L.; DARWISH, 2015). As equações algébricas são utilizadas para calcular os valores das variáveis dependentes de cada um dos elementos (volume finito).

### **2.5.1. Erros e incertezas em fluidodinâmica computacional**

A fim de tornar confiáveis os resultados encontrados por meios de simulação numérica por CFD é necessário tratar os erros e as incertezas inerentes ao método. Versteeg, H. K.; Malalasekera, (2007) citam como fontes de erros, em CFD, os erros de arredondamento, erros de convergência iterativa e erros de discretização. Já, como fontes de incertezas, os mesmos autores citam as diferenças entre a geometria virtual e a real, imprecisão das suposições envolvidas no processo de definição das condições de contorno e a incerteza experimental nas relações que descrevem as propriedades do fluido.

Os principais métodos que vêm sendo utilizados para tratar esses erros e incertezas são a verificação e a validação. Basicamente a verificação é a avaliação da precisão da solução de um modelo computacional em relação a soluções conhecidas e está relacionada aos erros, enquanto a validação é a avaliação da precisão de uma simulação computacional em comparação com dados experimentais e está relacionada as incertezas. (OBERKAMPF; TRUCANO, 2002).

### 3. PESQUISAS RELACIONADAS AO TEMA DO TRABALHO

Os sistemas de armazenamento térmico de calor latente vêm ganhando cada vez mais aplicações, principalmente em conjunto com sistemas geradores de energia térmica, como os solares. (ELBAHJAOU; EL QARNIA; NAIMI, 2018). A vantagem destes tipos de armazenadores está no maior armazenamento de energia do que os sistemas que utilizam calor sensível e maior faixa de temperatura do que os sistemas que operam por reações químicas. (NAZIR et al., 2019).

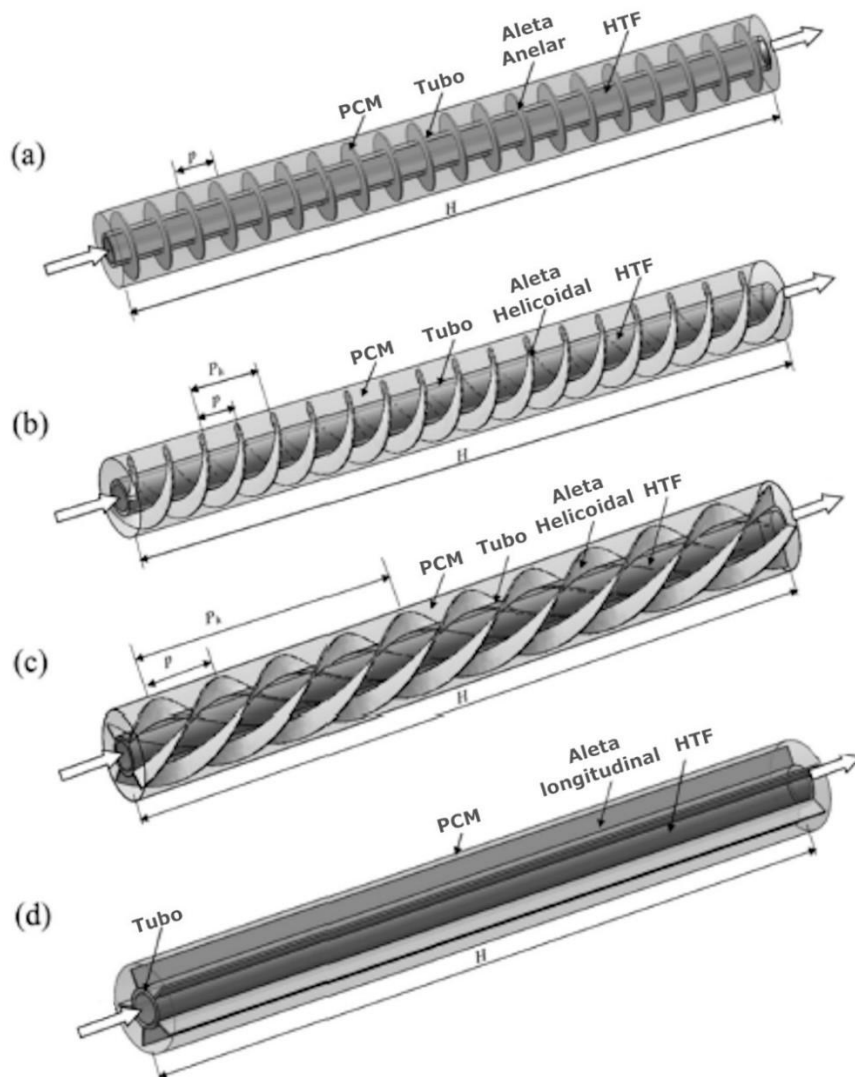
Apesar de todas estas vantagens alguns problemas envolvendo os PCM tem limitado a viabilidade comercial deste tipo de sistema. Dentre eles o principal está na baixa condutividade térmica, que acarreta aumento no tempo de fusão e solidificação do material.(AL-ABIDI et al., 2013a). Assim, muitos pesquisadores vêm realizando estudos visando otimizar a transferência de calor para os PCM, utilizando diferentes métodos, incluindo: tubos com aletas (AL-ABIDI et al., 2013a; JOYBARI et al., 2017), inserção de uma matriz de “espuma” de metal junto ao PCM (MAHDI; NSOFOR, 2018), uso de múltiplos tubos (KOUSHA et al., 2019; PAHAMLI et al., 2018), uso de PCM disperso com partículas de alta condutividade (HOSSEINZADEH et al., 2019), e o emprego de diferentes camadas de PCM. (SEFIDAN et al., 2017).

Quando se trata de armazenamento de calor latente em armazenadores do tipo casco e tubo o esforço é similar. Zhang et al. (2020) e Duan et al. (2020), estudaram o uso de aletas helicoidais fixadas aos tubos em contato com o PCM como método para melhorar a transferência de calor, comparando-as com aletas anelares e paralelas. Os autores investigaram também a influência de diferentes quantidades e passos de hélice das aletas. Os resultados mostraram uma significativa redução no tempo de fusão do material de mudança de fase utilizando aletas helicoidais quando comparadas as aletas convencionais (paralelas e anelares). As Figs. 3.1(a-d) mostram os tipos de aletas analisadas por Zhang et al., (2020), onde (a) são aletas anelares, (b) aletas helicoidais dupla, (c) aletas helicoidais quadrupla e (d) aletas paralelas. A área transluzente de cada armazenador representa o PCM.

Al-Abidi et al. (2013) e Mahdi et al. (2018), estudaram o uso de aletas paralelas em trocadores de calor de tubo triplex, analisando a influência de diferentes arranjos com quantidades, posicionamentos e dimensões das aletas no processo de fusão do PCM. Os autores compararam também arranjos com e sem uso de aletas. As aletas

foram fixadas nos tubos interno e intermediário do trocador de calor, região essa, preenchida por PCM. Os resultados obtidos mostraram que o uso progressivo da quantidade de aletas, bem como determinados posicionamentos das mesmas, contribuíram para a redução do tempo de fusão do PCM.

Figura 3.1 – Trocadores de calor com diferentes formas de aletas. (a) aleta anelar; (b) aleta helicoidal dupla; (c) aleta helicoidal quádrupla; (d) aleta longitudinal.



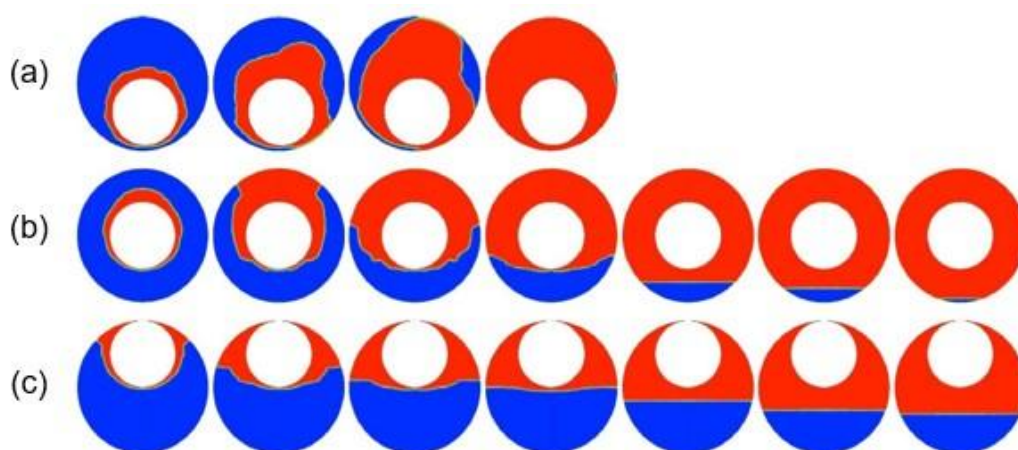
Fonte: adaptado de Zhang et al. (2020).

Estudos foram realizados também em trocadores de calor de múltiplos tubos. Esapour et al. (2016b), (2016a), Jourabian et al. (2017), LENG et al. (2020) estudaram diferentes arranjos de tubos de passagem de fluido térmico (FT) dentro de um recipiente cilíndrico contendo PCM. Foram analisadas a variação de quantidade, dimensão e posicionamento dos tubos visando reduzir o tempo de fusão dos materiais de mudança de fase. Os pesquisadores verificaram influência direta do aumento do

número de tubos e suas disposições na redução do tempo de fusão dos PCM analisados.

Estudos também avaliaram a influência da concentricidade e excentricidade de tubos de passagem de fluido térmico, dentro de um trocador de calor, no processo de fusão de PCM. Darzi; Farhadi; Sedighi (2012), Jourabian (2013); Kadivar et al., (2019), Pahamli et al. (2016), (2018); Yusuf Yazici et al. (2014), Zheng; Xu; Li (2018), Dutta; Atta; Dutta, (2008), realizaram experimentos e simulações analisando diferentes valores de excentricidade de tubos cilíndricos sobre o tempo total de fusão de PCM. Os resultados de todos os estudos, cada qual com suas particularidades, mostraram que arranjos com excentricidade nos tubos internos, especificamente a vertical descendente, tem efeito direto na redução no tempo de fusão do PCM, quando comparados a arranjos com tubos excêntricos. A Fig. 3.2(a-c) mostra o processo de fusão do PCM em geometrias circulares concêntricas e excêntricas estudado por Kadivar et al. (2019), onde é possível observar na primeira fileira (a) o processo de fusão mais rápido fruto da excentricidade vertical descendente do tubo interno, na segunda fileira (b) o processo intermediário com tubos concêntricos e na terceira (c) o mais lento, devido a excentricidade vertical ascendente.

Figura 3.2 - Fração líquida de PCM em geometrias de seção anelar excêntrica e concêntrica em diferentes instantes. (a) excentricidade vertical descendente; (b) concentricidade (c); excentricidade vertical ascendente.



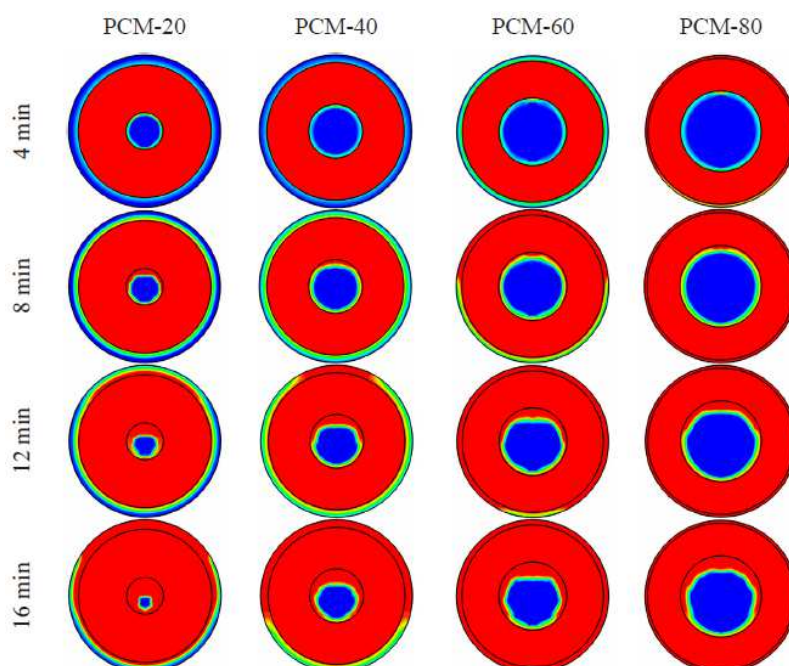
Fonte: adaptado de kadivar et al., (2019).

Os estudos de Kadivar et al. (2019), também concluíram que a condição ideal para a redução do tempo de carga térmica (fusão do PCM) não é necessariamente a condição ideal para a redução do tempo de descarga (solidificação do PCM), o que

pode ser benéfico em algumas utilizações, como no armazenamento térmico passivo em construções civis.

Gorzin et al. (2018, 2019), analisou o processo de fusão e solidificação de PCM em tubos e anéis cilíndricos, variando a distribuição de massa entre o anel externo e o tubo interno. A Fig. 3.3 mostra alguns arranjos investigados pelo pesquisador, onde pode-se ver as etapas do processo de fusão nos instantes 4, 8, 12 e 16 min. O PCM é armazenado no tubo interno e no anel externo, sendo que sua fase sólida é representada pela cor azul e a fase líquida pela cor vermelho. No anel intermediário passa fluido térmico, também representado pela cor vermelho. Verificou-se, pelos resultados, que o processo de fusão se deu em menor tempo na configuração de 40% de massa de PCM no tubo e 60% de massa no anel externo (arranjo descrito pelo autor como PCM-40) e para o processo de solidificação o menor tempo foi alcançado na proporção de 20% de massa no tubo e 80% de massa no anel externo (arranjo descrito pelo autor como PCM-20).

Figura 3.3 - Contornos de fração líquida nos arranjos analisados em diferentes instantes de tempo.

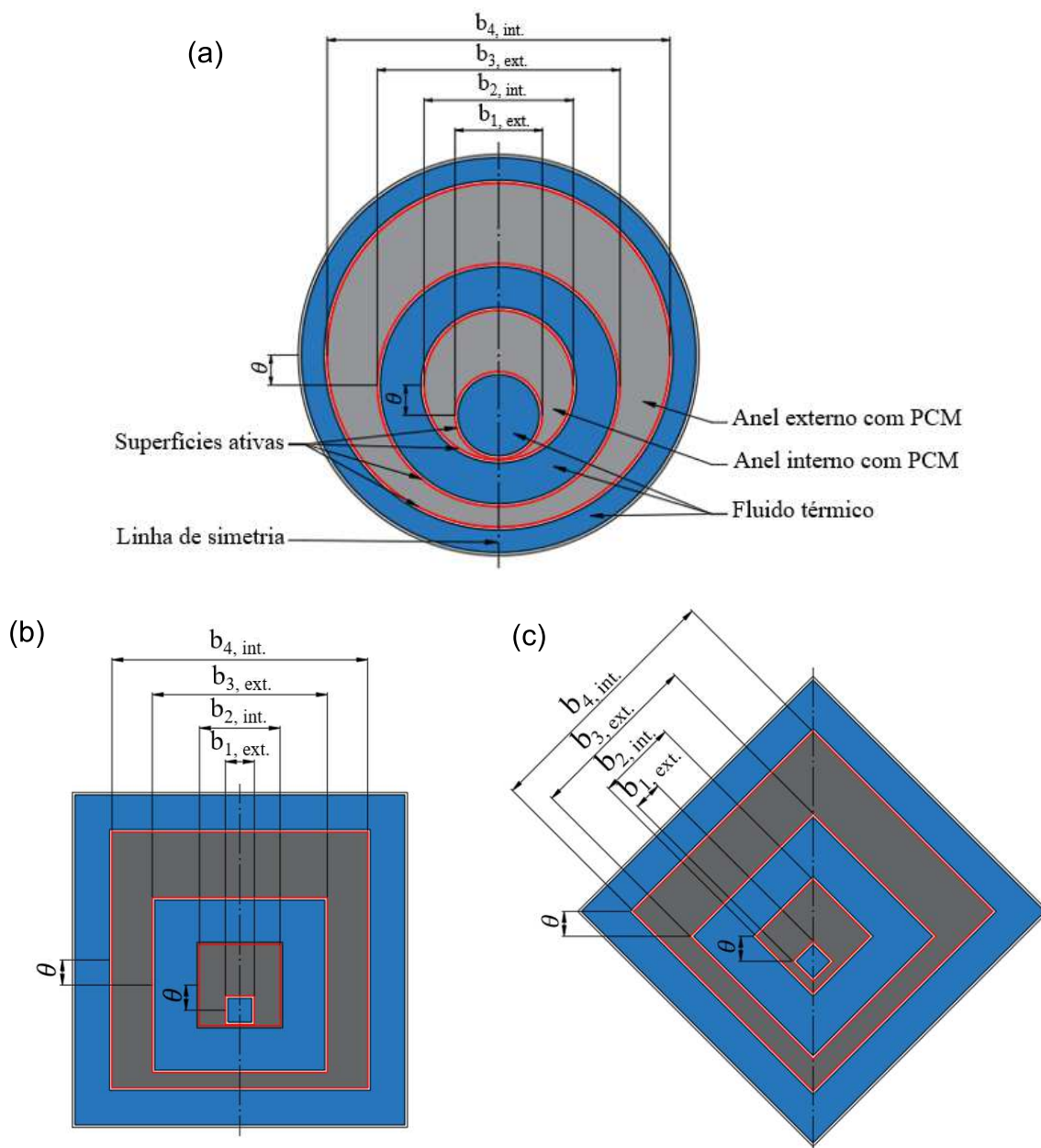


Fonte: adaptado de Gorzin et al., (2018).

#### 4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste em encontrar formas de reduzir o tempo do processo de fusão do PCM RT82 contido em anéis tubulares de armazenador térmico, utilizando diferentes arranjos geométricos, de proporção de massa entre anéis e de excentricidades. As Figs. 4.1(a-c) mostram as vistas das seções transversais das geometrias analisadas: circular (Fig. 4.1a), quadrada horizontal (Fig. 4.1b) e quadrada inclinada 45° (Fig. 4.1c). Cada geometria consiste em 5 tubos, os quais formam quatro anéis, intercalando PCM, na cor cinza, e fluido térmico, na cor azul.

Figura 4.1 – Seção transversal das geometrias estudadas, sendo  $\psi = 20/80 \text{ \%/\%}$  e  $\theta = 15 \text{ mm}$ . (a) circular, (b) quadrada horizontal e (c) quadrada inclinada 45°.



As dimensões dos tubos, cujas superfícies estão em contato com o material de mudança de fase, são representados por  $b_{1,ext}$ ,  $b_{2,int}$ ,  $b_{3,ext}$  e  $b_{4,int}$ , sendo que, para a geometria de seção circular, representam o diâmetro e para as geometrias de seção quadrada representam o comprimento da lateral do tubo. As subscrições *int* e *ext*, representam a parede interna e externa do tubo, respectivamente.

O PCM utilizado no estudo é o RT82 que, devido a sua elevada temperatura de fusão (entre 350 e 358K), se torna ideal para processos industriais como os de recuperação de calor residual. Os valores da massa específica ( $\rho$ ), calor específico ( $c_p$ ), calor latente ( $L$ ), temperatura de sólido ( $T_s$ ), temperatura de líquido ( $T_l$ ), condutividade térmica ( $k$ ), coeficiente de expansão térmica ( $\beta$ ) e viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) são apresentadas na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades termofísicas do PCM RT82.

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kg.K]	$L$ [J/kg]	$T_s$ e $T_l$ [K]	$k$ [W/m.K]	$\beta$ [1/K]	$\mu$ [kg/m.s]
950 (s)	2000	176000	350,15 (s)	0,2	0,001	0,03499
770 (l)			358,15 (l)			

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

#### 4.1. QUANTIDADE DE MASSA E ÁREA DE TROCA TÉRMICA

Uma vez que este trabalho pretende analisar a influência da variação de parâmetros geométricos no processo de fusão, é importante ressaltar que todos os arranjos estudados possuem igual área total de troca térmica (superfície ativa) e igual quantidade total de massa de PCM. As superfícies ativas, representada pelo perímetro total da superfície dos tubos em contato com o PCM são representadas nas Figs. 4.1(a-c) pela cor vermelha e possuem valor de 1290,3 mm. A quantidade de massa total de cada sistema é representada pela área transversal total das regiões com PCM, cujo valor é de 14378,8 mm<sup>2</sup>. O estudo foi tratado desta forma por ser bidimensional.

A proporção de massa de PCM entre os anéis é dada por:  $\psi = m_i / m_e$ , sendo  $m_i$  o percentual de massa do anel interno e  $m_e$  o percentual de massa do anel externo, ambos em relação ao total de massa presente no sistema. Os valores de  $\psi$  testados são: 14/86, 20/80 e 26/74 %/%. Foram testados também quatro valores de excentricidade vertical descendente  $\theta$  entre os tubos dos anéis contendo PCM, sendo

os valores: 0, 5, 10 e 15 mm. A combinação das variações citadas resultou em 36 diferentes arranjos, as quais são sumarizados nas Tab. 4.2 e Tab. 4.3.

Tabela 4.2 – Dimensões dos tubos de geometria circular, em contato com o PCM.

$\psi$ (%/%)	$\theta$ (mm)	Dimensões (mm)			
		$b_{1, \text{ext.}}$	$b_{2, \text{int.}}$	$b_{3, \text{ext.}}$	$b_{4, \text{int.}}$
14/86	0				
	5	25,8	56,8	140	188
	10				
	15				
0					
20/80	5	43,6	74,6	121,3	171,3
	10				
	15				
	0				
26/74	5	43,2	81,4	119,4	166,7
	10				
	15				
	0				

Tabela 4.3 – Dimensões dos tubos de geometria quadrada horizontal e inclinada 45°, em contato com o PCM.

$\psi$ (%/%)	$\theta$ (mm)	Dimensões (mm)			
		$b_{1, \text{ext.}}$	$b_{2, \text{int.}}$	$b_{3, \text{ext.}}$	$b_{4, \text{int.}}$
14/86	0				
	5	17,3	48,1	104,6	152,6
	10				
	15				
0					
20/80	5	23,3	58,5	96,5	144,3
	10				
	15				
	0				
26/74	5	14,6	62,9	100,9	144,3
	10				
	15				
	0				

As dimensões dos tubos foram calculadas pelo software EES, mantendo as menores dimensões dos tubos sem alterar área e perímetro totais e evitando dimensões que promovessem colisões entre os tubos nos arranjos excêntricos. A influência do material, raios de canto ( $R=0$ ) e espessura das paredes dos tubos, bem como as características, comportamentos e influência do FT no processo, não foram investigadas.



## 5. METODOLOGIA

Na sequência é apresentada a metodologia utilizada para a realização deste trabalho sendo composta pelo modelo matemático, condições iniciais e de contorno, abordagem, validação numérica e análise de malha.

### 5.1. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático utilizado é composto pelas equações da conservação da massa, Eq. (5.1), quantidade de movimento, Eq. (5.2), e energia, Eq. (5.3):

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \beta \vec{g}(T - T_{ref})] + \vec{S} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + \nabla(\vec{V} \lambda) = \nabla(k \nabla T) \quad (5.3)$$

onde  $\vec{V}$  é o vetor velocidade,  $\rho$  é a massa específica,  $t$  é o tempo,  $p$  é a pressão,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica,  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade,  $\vec{S}$  é o termo fonte,  $\lambda$  é a entalpia total, obtida pela soma da entalpia sensível ( $\lambda_{sen}$ ) e a variação da entalpia na mudança de fase ( $\lambda_L$ ),  $k$  é a condutividade térmica e  $T$  é a temperatura. O termo fonte é obtido com a Eq. (5.4).

$$\vec{S} = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} C \vec{V} \quad (5.4)$$

onde  $\gamma$  é a fração líquida durante a mudança de fase,  $\varepsilon$  é uma constante de valor 0,001 usada para evitar divisão por zero e  $C$  é a constante da zona porosa, que é dependente da morfologia desta zona. (VOLLER; PRAKASH, 1987). A fração líquida durante a mudança de fase é obtida através da Eq. (5.5):

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (5.5)$$

onde  $T_s$  é a temperatura do sólido e  $T_l$  a temperatura do líquido. A entalpia sensível é obtida através da Eq. (5.6).

$$\lambda_{sen} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5.6)$$

onde  $\lambda_{ref}$  é a entalpia na temperatura de referência ( $T_{ref} = 293,15$  K) e  $c_p$  é o calor específico a pressão constante. A variação da entalpia na mudança de fase é em função da temperatura, que está associada à fração líquida na zona porosa, obtida através da Eq. (5.7) ou então pela Eq. (5.8).

$$\lambda_L = \gamma L \quad (5.7)$$

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

em que  $L$  é o calor latente do material.

## 5.2. CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Inicialmente o PCM RT82 se encontra como sólido, na temperatura de 300,15 K. Como condição de contorno das superfícies ativas foi considerado temperatura constante e uniforme de 363,15 K, bem como a condição de não deslizamento.

## 5.3. ABORDAGEM NUMÉRICA

O estudo foi efetuado por fluidodinâmica computacional (CFD), com o auxílio dos softwares Design Modeler, Meshing, Fluent e CFD-Post, da empresa Ansys. O sistema foi analisado de forma bidimensional e o domínio computacional considerado foi simétrico em relação ao eixo vertical, também indicado nas Figs. 4.1(a-c). Para o acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o método SIMPLE. O gradiente e a pressão foram definidos como *Least Squares Cell Based* e PRESTO!, respectivamente. Para a quantidade de movimento e a energia foi utilizado *Second Order Upwind*. Os fatores de relaxamento para a pressão, massa específica, forças de campo, quantidade de movimento, fração de líquido e energia foram,

respectivamente: 0,2; 0,2; 0,2; 0,2; 0,5 e 0,9. O intervalo de tempo utilizado foi de 0,5 s, com limitação de mil iterações por intervalo. Como critério de convergência foram adotados os valores de  $10^{-4}$  para continuidade e velocidade e  $10^{-5}$  para a energia. Foi utilizado dupla precisão em todas as simulações e foi assumido ainda: escoamento laminar, regime transiente, propriedades constantes e dissipação viscosa desprezível. Foi ainda utilizada a aproximação de Boussinesq para a variação da massa específica.

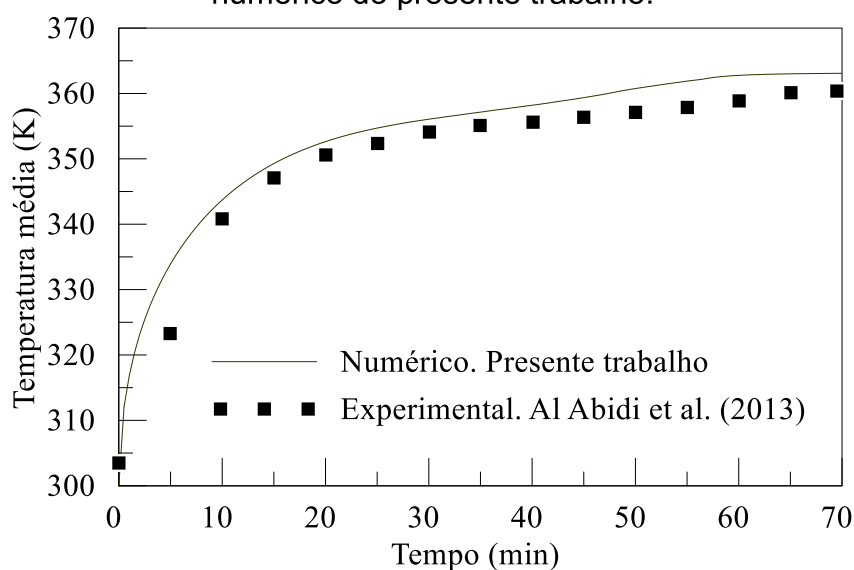
#### 5.4. VALIDAÇÃO E ANÁLISE DE MALHA

Para a validação numérica utilizaram-se os resultados experimentais de Al-Abidi et al.(2013). Estes autores estudaram o processo de fusão do PCM RT82 em um armazenador de energia térmica de tubos tipo triplex, variando quantidades e formas geométricas de aletas.

##### 5.4.1. Validação Experimental

A Fig. 5.1 mostra o perfil de temperatura média transiente, obtido experimentalmente por Al-Abidi et al.(2013) e numericamente pelo presente trabalho. Percebe-se uma boa proximidade entre os resultados experimentais e numéricos em todo o tempo do processo, sendo que a diferença percentual média, entre eles, foi de 1%.

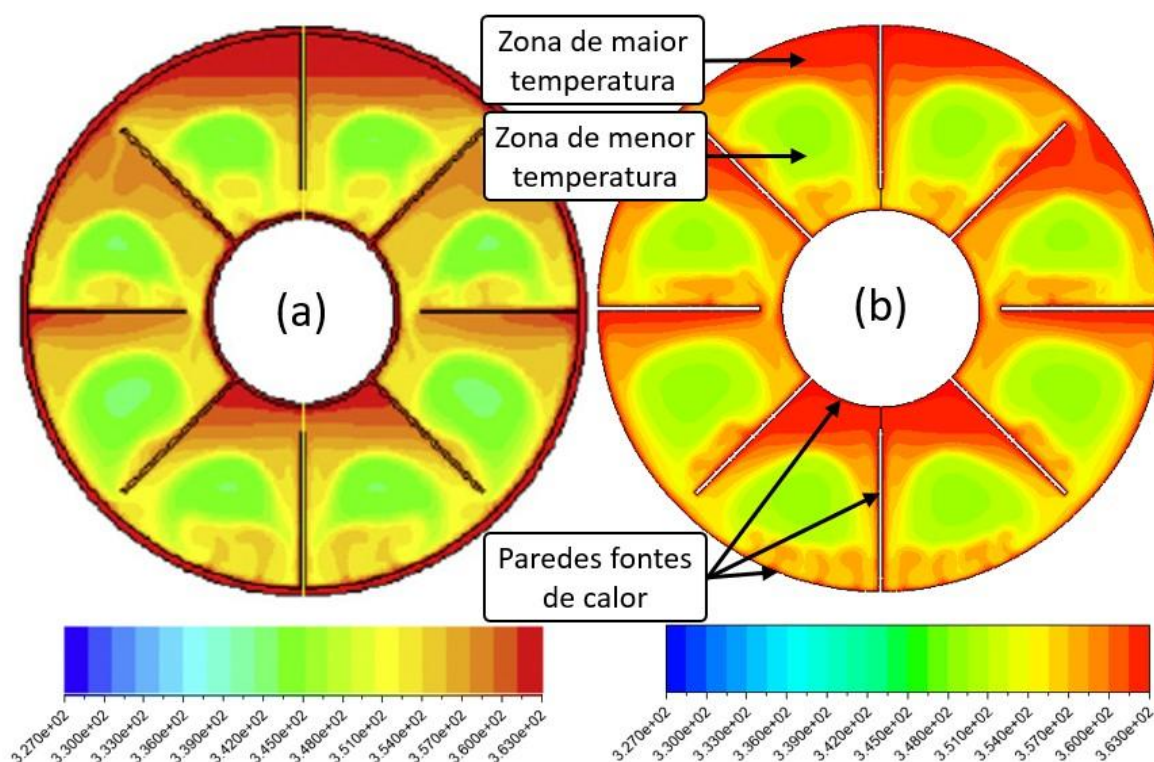
Figura 5.1 – Temperatura média vs. tempo: experimental de Al-Abidi et al. (2013) e numérico do presente trabalho.



### 5.4.2. Validação Numérica

As Figs. 5.2(a, b) apresentam campos de temperatura para  $t = 30$  min, obtidos por Al-Abidi et al. (2013) e pelo presente trabalho, respectivamente. Nestas figuras, a cor azul representa a temperatura mais baixa do PCM e a vermelha a temperatura mais elevada. Verifica-se semelhança entre resultados dos gradientes de cor (fase intermediária do processo de fusão), provenientes da distribuição de temperatura neste instante de tempo. Observa-se também temperaturas mais elevadas próximo as paredes condutoras de calor (tubos e aletas) e mais baixas onde o PCM ainda se encontra na fase sólida. Zonas de maior temperatura podem ser observadas também na região superior do tubo externo e na região logo abaixo do tubo interno, devido ao acúmulo de PCM líquido naquelas regiões.

Figura 5.2 – Campos de temperatura para  $t = 30$  min. (a) (AL-ABIDI et al., 2013a), (b) presente trabalho.



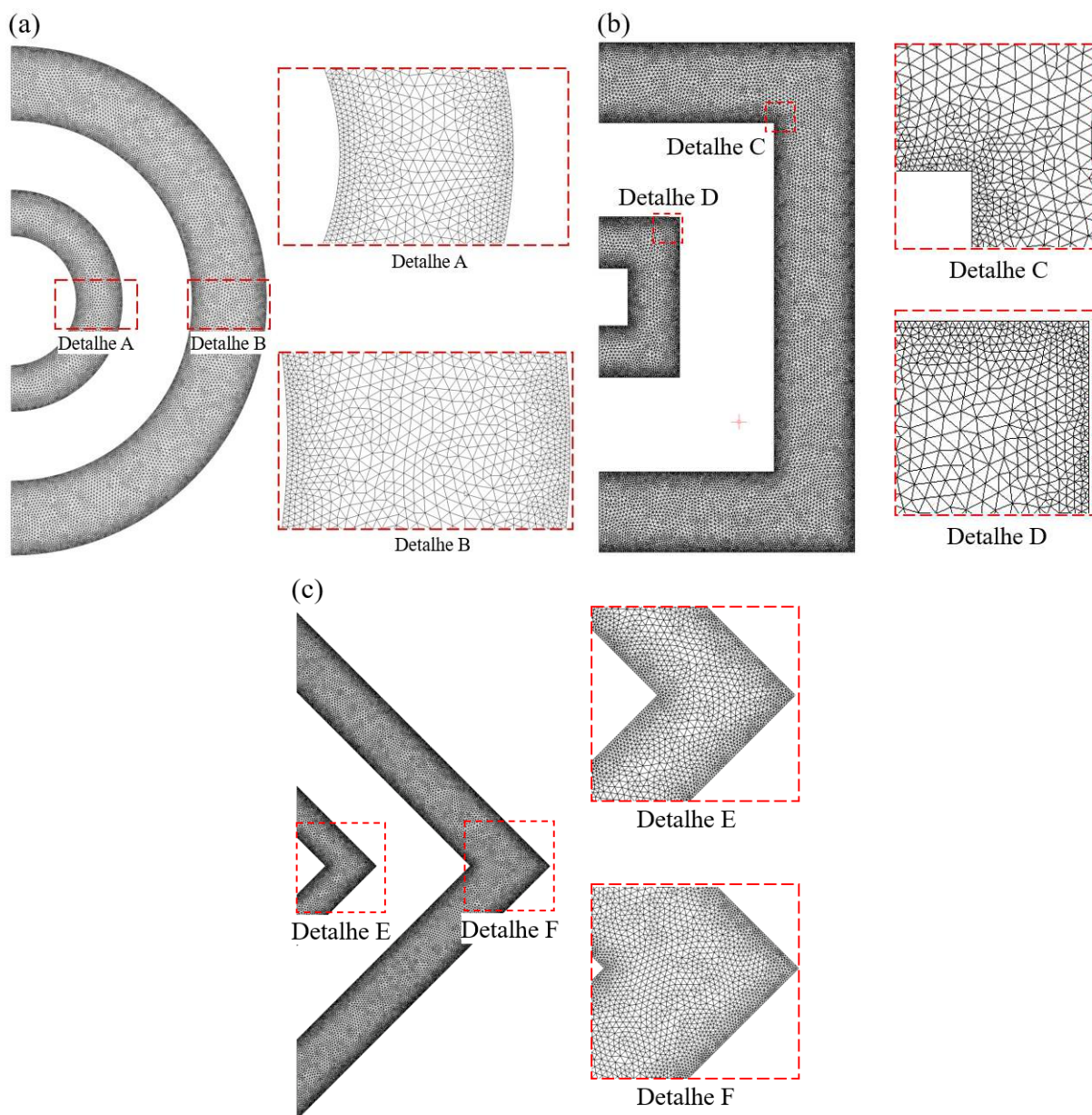
### 5.4.3. Análise de Malha

A análise de malha foi realizada através do método GCI (*Grid Convergence Index*), utilizando três malhas: M1, M2 e M3, para cada uma das três geometrias: circular, quadrada horizontal e quadrada inclinada 45°. Em virtude do tamanho fixo

dos elementos da malha ( $1 \cdot 10^{-3}$  m para a malha principal e  $4 \cdot 10^{-4}$  m para a malha na região de refino), houve uma variação do número de elementos entre as geometrias, os quais podem ser verificadas na Tab. 5.1. A variável considerada na análise foi a fração de líquido.

A malha escolhida para a simulação foi a M2 de cada uma das três geometrias, as quais podem ser verificadas nas Figs. 5.3(a-c), onde é possível observar a geometria triangular do elemento da malha bem como os detalhes do refinamento próximos às superfícies ativas, tanto na malha do anel interno quanto a do externo.

Figura 5.3 – Malhas computacionais com detalhes do refinamento: (a) geometria circular; (b) geometria quadrada horizontal e (c) geometria quadrada inclinada  $45^\circ$ .



Foi realizada também a análise temporal, utilizando-se três diferentes passos de tempo ( $dt$ ): 0,25; 0,5 e 0,75 s. A diferença percentual média entre eles foi de 0,06% entre  $dt$  0,25 e 0,5 s e 0,02% entre  $dt$  0,5 e 0,75 s. O  $dt$  utilizado foi de 0,5 s.

Tabela 5.1 – GCI das geometrias utilizadas no presente trabalho.

Geometria	Malha	Num. de Elementos	GCI entre M3 e M2	GCI entre M2 e M1
Circular	M1	54914	1,24	1,5
	M2 (escolhida)	30313		
	M3	16527		
Quadrada horizontal	M1	54919	3,24	2,5
	M2 (escolhida)	29624		
	M3	16091		
Quadrada inclinada 45°	M1	54074	2,24	0,87
	M2 (escolhida)	29590		
	M3	16390		

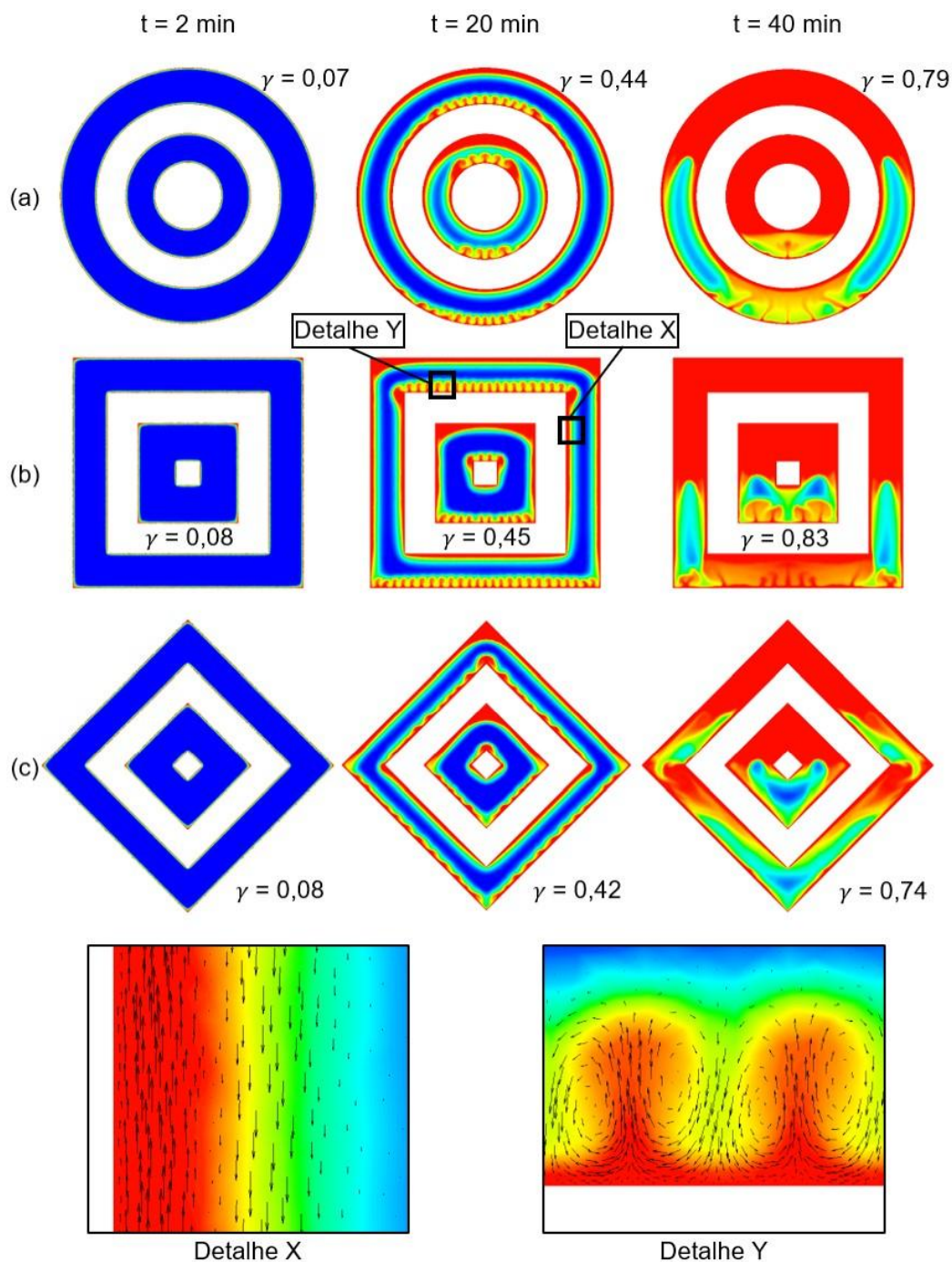
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figs. 6.1(a-c) mostram campos de fração de líquido  $\gamma$  em  $t = 2, 20$  e  $40$  min, para as geometrias circular, quadrada horizontal e quadrada inclinada  $45^\circ$ , respectivamente, todas com  $\psi = 20/80$  %/%, e  $\theta = 0$ . Nestas figuras também estão indicados os valores de fração de líquido no respectivo instante de tempo. Em  $t = 2$  min, observa-se a predominância da fase sólida do PCM nos anéis e a presença de uma fina camada da fase líquida junto às paredes ativas dos tubos das três geometrias. É a etapa inicial do processo de fusão, que ocorre predominantemente por condução em virtude da proximidade da fase sólida do PCM com as superfícies aquecidas. Nota-se uma simetria na camada líquida do PCM em relação às paredes ativas que é ocasionada pela uniformidade na taxa de transferência de calor nessa etapa inicial. No instante  $t = 20$  min, a quantidade de massa líquida de PCM é significativamente maior do que em  $t = 2$  min, dando lugar ao processo de transferência de calor por convecção natural. O evento pode ser melhor observado no detalhe X da Fig. 6.1, que mostra os vetores de velocidade das correntes convectivas ascendentes e descendentes da fase líquida próxima a parede lateral do tubo da geometria quadrada horizontal (Fig. 6.1b). Vale ressaltar que o evento ocorre também para as geometrias quadrada inclinada  $45^\circ$  (Fig. 6.1c) e circular (Fig. 6.1a). Essas correntes são resultado do gradiente de temperatura da fase líquida, ocasionada pela variação de temperatura  $\Delta T$  entre o PCM sólido e as superfícies ativas. A temperatura mais elevada do PCM líquido próximos as paredes ativas ocasionam uma redução da sua massa específica, formando forças de empuxo e conseqüentemente correntes convectivas ascendentes. Próximo as paredes do PCM sólido o efeito é contrário, pois as menores temperatura do PCM líquido próximas a sua fase sólida ocasionam um aumento da massa específica, somadas as forças gravitacionais, formam correntes convectivas descendentes. Pode-se observar também diferentes padrões de convecção, como o de Rayleigh-Bénard, cujos detalhes podem ser observados no detalhe Y da Fig. 6.1, que mostra as células de recirculação de líquido características deste padrão. O padrão aparece em destaque na geometria quadrada horizontal (Fig. 6.1b), visto que é um padrão característico de regiões superiores de superfícies planas, mas também é possível encontrá-lo na geometria circular (Fig. 6.1a) e quadrada inclinada  $45^\circ$  (Fig. 6.1c), porém com menor intensidade. Padrões convectivos, como o de Rayleigh-Bénard, colaboram para acelerar a dinâmica do



processo de fusão. Vale ressaltar que os detalhes dos vetores de velocidade puderam ser capturados devido a boa qualidade da malha computacional.

Figura 6.1 – Campos de fração de líquido  $\gamma$ , com  $\psi = 20/80$  e  $\theta = 0$ : (a) geometria circular; (b) geometria quadrada horizontal; (c) geometria quadrada inclinada  $45^\circ$ .



No instante  $t = 40$  min, nota-se a fusão quase completa na região superior dos dois anéis, enquanto a região inferior ainda possui fase sólida de PCM. Isso ocorre devido ao gradiente térmico do PCM líquido, mencionado anteriormente, que proporciona maiores taxas de transferência de calor na região superior, acelerando o



processo de fusão nessa área. Para as geometrias circular e quadrada horizontal a fase sólida do PCM se concentra mais nas regiões inferiores laterais pois nessas regiões as correntes convectivas verticais não favorecem a troca térmica visto que, o PCM líquido com as maiores temperaturas próximos as paredes ativas se movimentam para a região superior prejudicando a troca térmica com a fase sólida do PCM. Já, a região inferior central das duas geometrias citadas é favorecida em relação a região lateral devido as recirculações locais como as do padrão de Rayleigh-Bénard, obtendo uma melhor taxa de fusão. Na geometria quadrada inclinada  $45^\circ$  (Fig. 6.1c), o PCM sólido também se concentra na região lateral inferior ocasionado pelas razões mencionadas anteriormente, porém houve uma concentração de PCM sólido também na região inferior central, produzido neste caso, pela ausência de recirculações naquela região.

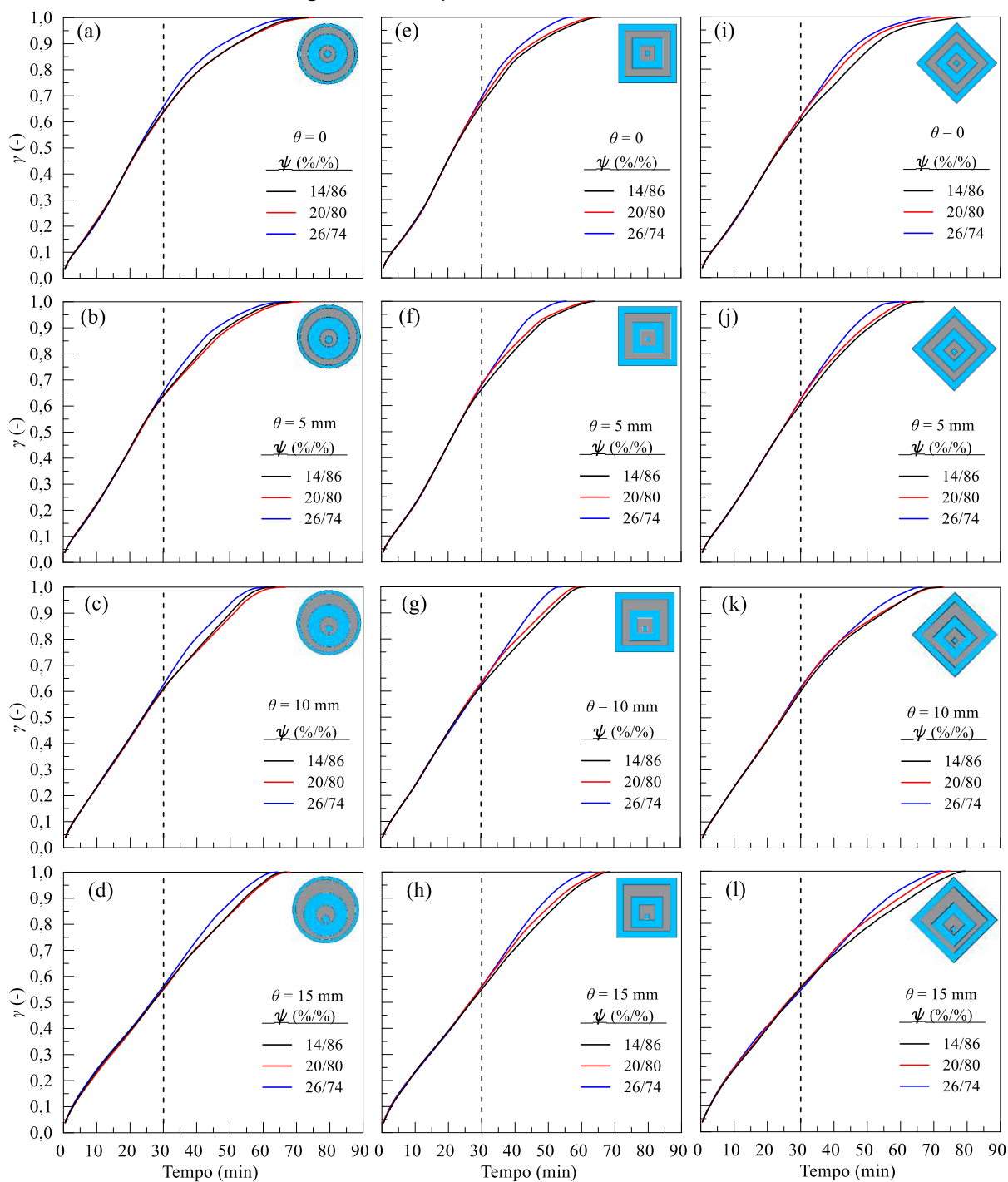
### 6.1. INFLUÊNCIA DA PROPORÇÃO DE MASSA ENTRE ANÉIS

As Figs. 6.2(a-l) mostram os perfis transientes de  $\gamma$ , para  $\psi = 14/86$ ,  $20/80$  e  $26/74$  %/%, com  $\theta = 0$ ,  $5$ ,  $10$  e  $15$  mm. Resultados para a geometria circular, quadrada horizontal e quadrada inclinada  $45^\circ$  são mostrados nas Figs. 6.2(a-d), Figs. 6.2(e-h) e Figs. 6.2(i-l), respectivamente. Nestas figuras pode-se observar que, independentemente do arranjo, até 30 min iniciais os valores de  $\gamma$  permanecem praticamente iguais, indicando taxas de fusão similares, com exceção do arranjo com geometria circular e  $\theta = 15$  mm (Fig. 6.2d), onde percebe-se uma aclividade no perfil de  $\gamma$  para  $\psi = 14/86$  %/%, indicando um aumento na taxa de fusão.

A partir de  $t = 30$  min, ocorre uma declividade dos perfis de  $\gamma$  para a maior parte dos arranjos, com exceção das geometrias circular com  $\theta = 15$  mm (Fig. 6.2d), quadrada inclinada  $45^\circ$  com  $\theta = 10$  mm (Fig. 6.2k) e  $\theta = 15$  mm (Fig. 6.2l), cujas declividades iniciam próximas a  $t = 40$  min. Essas declividades são explicadas pela redução da taxa de fusão nos estágios mais avançados do processo, onde há predominância da fase líquida de PCM. Vale ressaltar que as menores declividades nos valores de  $\gamma$  são ocasionadas pela maior taxa de fusão. Deste modo, verifica-se que, para a geometria circular (Figs. 6.2a-d), a maior taxa de fusão ocorre para o arranjo com  $\psi = 26/74$  %/%, seguido do arranjo com  $\psi = 14/86$  %/% e por último, com a menor taxa, o arranjo com  $\psi = 20/80$  %/%. Isso indica que o aumento da razão de

proporção de massa ( $m_i/m_e$ ) de 14/86 %/% para 20/80 %/% ocasiona uma redução na taxa de fusão aumentando o tempo total de fusão do PCM. Já, o aumento da razão de  $\psi$  de 20/80 %/% para 26/74 %/% acarreta aumento da taxa de fusão, reduzindo o tempo.

Figura 6.2 – Perfil de fração de líquido  $\gamma$ ,  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74$  %/%;  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm: (a-d) geometria circular, (e-h) geometria quadrada horizontal e (i-l) geometria quadrada inclinada  $45^\circ$ .



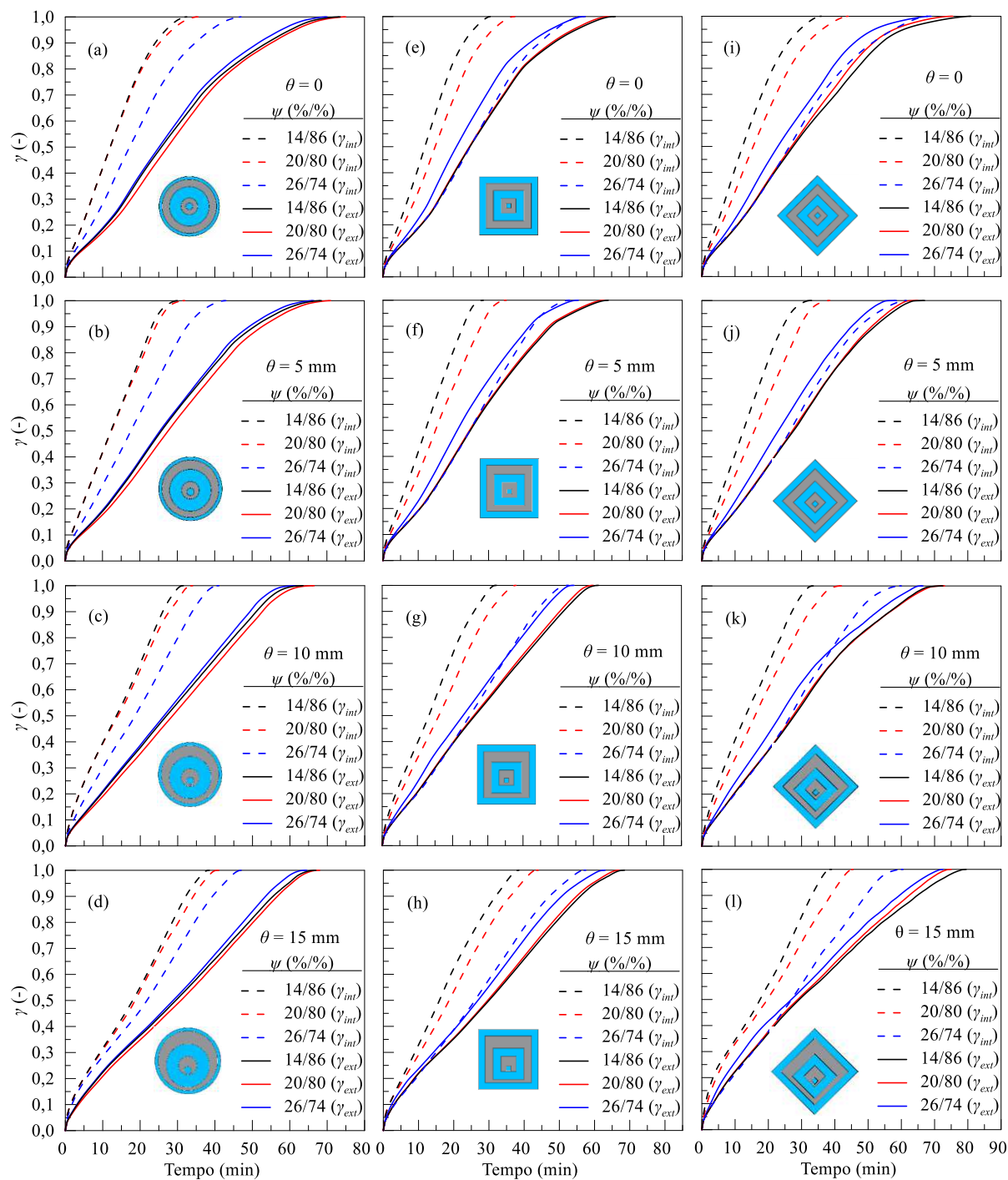
Para as geometrias quadrada horizontal (Figs. 6.2e-h) e quadrada inclinada 45° (Figs. 6.2i-l), a maior taxa de fusão ocorre para os arranjos com  $\psi = 26/74$  %/%, seguido dos arranjos com  $\psi = 20/80$  %/% e por último, com a menor taxa, o arranjo com  $\psi = 14/86$  %/%, indicando que a taxa de fusão do sistema aumenta em função do aumento da razão de proporção de massa.

As Figs. 6.3(a-l) mostram o perfil da fração de líquido do anel interno ( $\gamma_{int}$ ) e do anel externo ( $\gamma_{ext}$ ), para  $\psi = 14/86$ ,  $20/80$  e  $26/74$  %/%, com  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm, para as geometrias circular, quadrada horizontal e quadrada inclinada 45°. Pode-se observar nas Figs. 6.3(a-d) que, na geometria de seção circular, há uma redução de  $\gamma_{int}$  para  $\psi = 20/80$  %/% em relação a  $\psi = 14/86$  %/% e o mesmo ocorre para  $\psi = 26/74$  %/% em relação a  $\psi = 20/80$  %/%. Nota-se que a redução de  $\gamma_{int}$  ocorre em função do aumento da razão de  $\psi$ , evidenciando que uma maior quantidade de massa no anel interno provoca uma redução na taxa de fusão e conseqüentemente, aumento no tempo para fundir do PCM nesse anel. Para o anel externo, o arranjo com  $\psi = 20/80$  %/%, mostra uma redução nos valores de  $\gamma_{ext}$  em relação ao arranjo com  $\psi = 14/86$  %/%, porém o  $\psi = 26/74$  %/% revela um aumento nos valores de  $\gamma_{ext}$  em relação a  $\psi = 20/80$  %/%, indicando haver um ponto de inflexão em  $\psi = 20/80$  %/%, pois os valores inferiores e superiores de razão de  $\psi$  provocam aumento na taxa de fusão. Pode-se observar também que os eventos mencionados ocorreram de forma similar, independentemente da excentricidade. Ainda nas mesmas Figs. 6.3(a-l), pode-se observar que os valores de  $\gamma_{ext}$  são notadamente inferiores aos valores de  $\gamma_{int}$  fazendo com que a taxa de fusão do PCM no anel externo seja menor, levando mais tempo para fundir o PCM em relação ao anel interno, fazendo com que o tempo de fusão no anel externo seja predominante no tempo total de fusão no sistema.

Com relação a geometria quadrada horizontal (Figs. 6.3e-h) observa-se que há uma redução nos valores de  $\gamma_{int}$  para  $\psi = 20/80$  %/% em relação a  $\psi = 14/86$  %/% e outra de  $\psi = 26/74$  %/% em relação a  $\psi = 20/80$  %/%. Isso se deve ao aumento da quantidade de massa no anel interno reduzindo a taxa de fusão do PCM neste anel. Com relação a  $\gamma_{ext}$  observa-se um efeito contrário, isto é, houve um aumento nos valores de  $\gamma_{ext}$  para  $\psi = 20/80$  %/% em relação a  $\psi = 14/86$  %/% e de  $\psi = 26/74$  %/% em relação a  $\psi = 20/80$  %/%, explicado pela redução da quantidade de massa no anel externo que fez com que aumentasse a taxa de fusão. Nota-se que, para esta

geometria, o aumento da taxa de fusão no anel externo e a redução no anel interno são funções do aumento da razão de  $\psi$ . Para a geometria quadrada inclinada  $45^\circ$  (Figs. 6.3i-l), observa-se comportamento similar a da geometria quadrada horizontal, diferenciando-se por taxas de fusão inferiores devido as características já mencionadas anteriormente.

Figura 6.3 – Perfil de  $\gamma_{int}$  e  $\gamma_{ext}$ , para  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74\%/%$ ;  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm: (a-d) geometria circular,; (e-h) geometria quadrada horizontal e (i-l) geometria quadrada inclinada  $45^\circ$ .

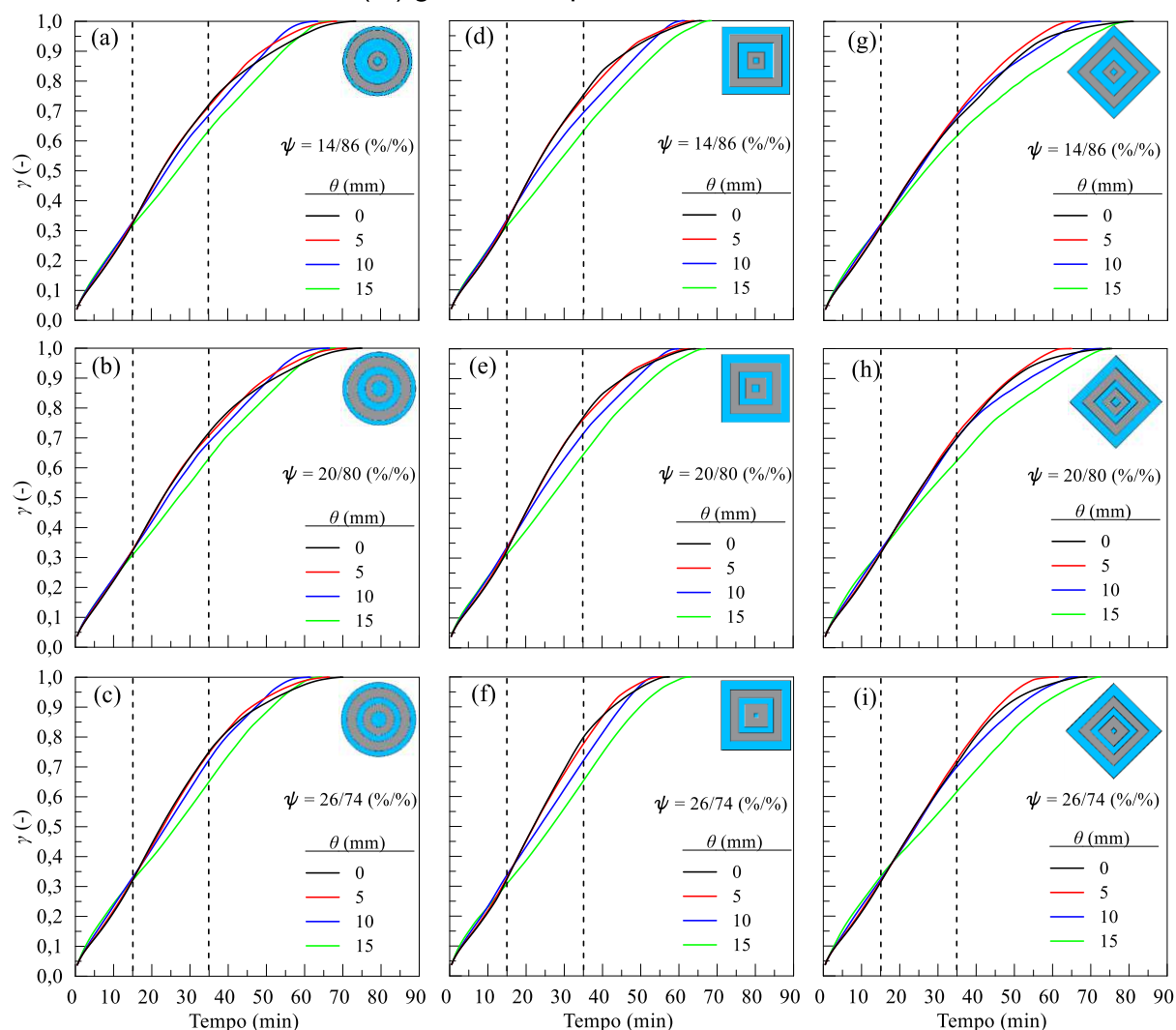


## 6.2. INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE

As Figs. 6.4(a-i) mostram o perfil de  $\gamma$  para  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm, para as geometrias circular, quadrada horizontal e quadrada inclinada  $45^\circ$ ,  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74$  %/%. Nestas figuras pode-se observar que os perfis de  $\gamma$  são muito semelhantes entre si até, aproximadamente,  $t = 15$  min, indicando taxas de fusão similares, independentemente da geometria, excentricidade e  $\psi$ . De  $t = 15$  min até aproximadamente  $t = 35$  min, observa-se uma pequena aclividade nos valores de  $\gamma$  para  $\theta = 0, 5$  e  $10$  mm, o que demonstra um pequeno aumento da taxa de fusão. Já, para  $\theta = 15$  mm, o perfil manteve a trajetória linear similar aos primeiros 15 min, isso para as geometrias circular e quadrada horizontal. Na geometria quadrada inclinada  $45^\circ$ , observa-se o início de uma pequena declividade nos valores de  $\gamma$  para  $\theta = 15$  mm, indicando uma redução na taxa de fusão para estes arranjos.

Após  $t = 35$  min, observa-se o início de uma declividade nos perfis de  $\gamma$  para todos as  $\theta$ , porém com valores distintos, sendo que, para as geometrias circular e quadrada horizontal, os maiores valores de  $\gamma$  são para  $\theta = 10$  mm, seguido de  $\theta = 5$  mm,  $\theta = 0$  e por último, com os menores valores, o arranjo com  $\theta = 15$  mm. Isso indica que o aumento nos valores de  $\theta$  até 10 mm proporciona um aumento na taxa de fusão do PCM nos anéis. Isso pode ser explicado devido a aproximação das superfícies ativa na parte inferior dos anéis reduzindo a camada de PCM nessa região onde a taxa de fusão é menor e aumentando a camada de PCM na região superior onde a taxa de fusão é maior ocasionando uma aceleração no processo de fusão. Porém é importante observar que o arranjo com  $\theta = 15$  mm não obteve o mesmo efeito, ao contrário, neste arranjo ocorreu uma redução na taxa de fusão, o que evidencia que há um limite na qual a excentricidade contribui para o aumento nas taxas de fusão, que pode ser explicado devido ao aumento excessivo da camada de PCM na região superior dos anéis reduzindo a taxa de fusão. Para a geometria quadrada inclinada  $45^\circ$  os maiores valores de  $\gamma$  são para  $\theta = 5$  mm, seguido de  $\theta = 0$ ,  $\theta = 10$  mm e  $\theta = 15$ mm com os menores valores.

Figura 6.4 – Perfil de fração de líquido  $\gamma$ , para  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm;  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74\%/%$ : (a-d) geometria circular, (e-h) geometria quadrada na horizontal e (i-l) geometria quadrada inclinada  $45^\circ$ .

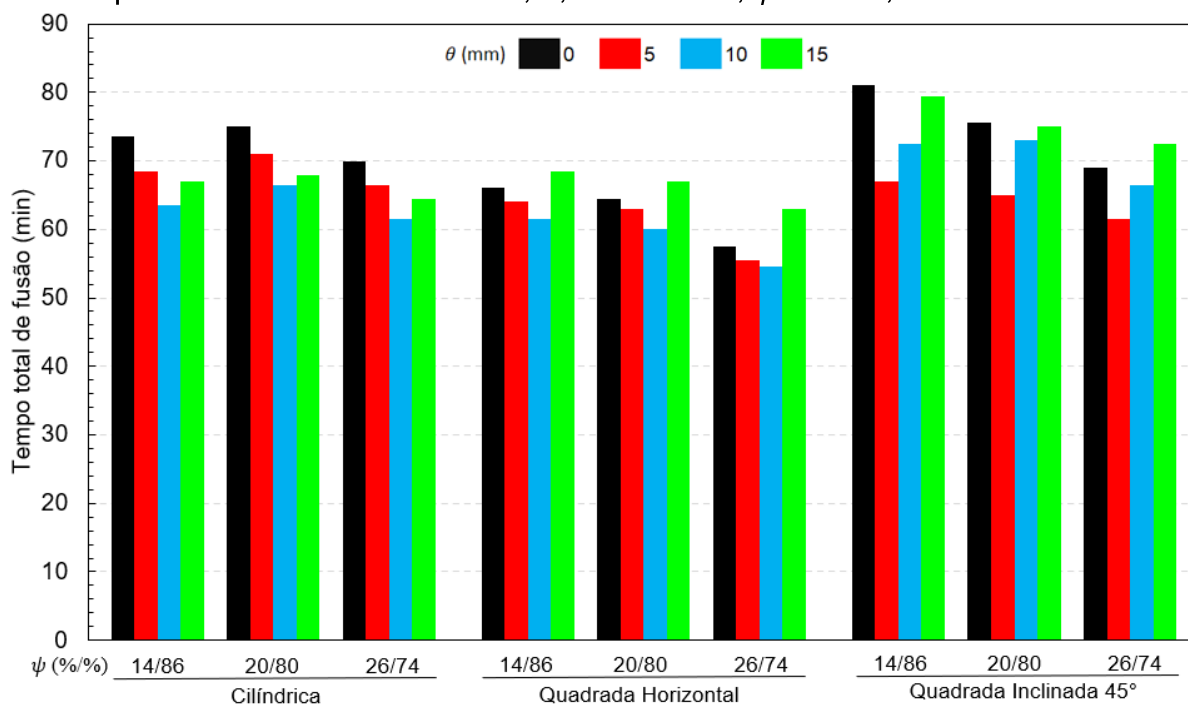


### 6.3. INFLUÊNCIA COMBINADA DA EXCENTRICIDADE E DA PROPORÇÃO DE MASSA

O tempo total de fusão para as três geometrias, juntamente com as variações de proporção de massa e excentricidades são mostrados na Fig. 6.5. Nesta figura pode-se observar que a geometria quadrada horizontal apresenta os menores tempos totais de fusão, considerando comparações equivalentes entre  $\psi$  e  $\theta$ , sendo que o menor tempo foi para o arranjo com  $\psi = 26/74 \%/%$  e  $\theta = 10$  mm, totalizando 54,5 min. A geometria quadrada inclinada  $45^\circ$  possui os maiores tempos de fusão do PCM, sendo o arranjo com maior tempo o de  $\theta = 0$  e  $\psi = 14/86 \%/%$ , totalizando 81 min. A diferença entre o maior e menor tempo total de fusão foi de 32,7 %. Em relação a proporção de massa, para as mesmas  $\theta$ , o menor tempo de fusão foi para  $\psi = 26/74$

%, independentemente da geometria. Em relação ao deslocamento, para o mesmo  $\psi$ , os menores tempos de fusão, para as geometrias circular e quadrada horizontal, foram com  $\theta = 10$  mm. Para a geometria quadrada inclinada  $45^\circ$  os arranjos que obtiveram os menores tempos totais de fusão foram os com  $\theta = 5$  mm, independentemente do valor de  $\psi$ .

Figura 6.5 – Tempo total de fusão para as geometrias circular, quadrada horizontal e quadrada inclinada  $45^\circ$ .  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$ mm;  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74$ .



## 7. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi analisar a influência da geometria, da excentricidade e da proporção de massa no processo de fusão de PCM em armazenadores de energia térmica de múltiplos tubos. Através dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A variação da geometria, da proporção de massa e da excentricidade só influenciaram o processo de fusão após determinado período, quando o processo convectivo é predominante, pois antes desse período o processo de transferência de calor é realizado predominantemente por condução e de maneira uniforme;
- Entre as geometrias estudadas, a quadrada horizontal apresentou os menores tempos de fusão, enquanto que a quadrada inclinada  $45^\circ$  obteve os maiores tempos, para iguais valores de  $\psi$  e  $\theta$ . Isso ocorreu em virtude de padrões convectivos ocorridos com maior intensidade na primeira geometria citada, como o padrão de Rayleigh-Bénard, que deram maior dinamismo ao processo e conseqüentemente aumentaram a taxa de fusão;
- O aumento da razão de proporção de massa influenciou na redução do tempo total de fusão para as geometrias quadradas horizontais e inclinadas  $45^\circ$  devido a redução de massa de PCM no anel externo aumentando a taxa de fusão. Com a redução de massa de PCM no anel externo houve um aumento proporcional no anel interno reduzindo a taxa de fusão neste último, porém, isso não influenciou no tempo total de fusão no sistema visto que o tempo de fusão do PCM no anel interno continuou menor do que a do anel externo;
- O aumento da razão de proporção de massa para a geometria de seção circular, diferentemente das outras geometrias analisadas, provocou inicialmente um aumento no tempo total de fusão do PCM e posteriormente uma redução, contudo os resultados obtidos do trabalho não puderam explicar o comportamento distinto, necessitando um aprofundamento maior nos estudos dessa geometria;
- O aumento da excentricidade dos anéis também contribuíram para a redução do tempo total de fusão para todas as geometrias, ajudando a distribuir a massa da região inferior onde ocorrem as menores taxas de fusão para a região superior onde ocorrem as maiores taxas. Contudo, há uma limitação para estes arranjos, sendo que arranjos com valores elevados de excentricidade, especificamente os com  $\theta =$



15 mm, tiveram efeito negativo, elevando demasiadamente a quantidade de massa na região superior dos anéis, reduzindo a taxa de fusão naquela região;

- A combinação entre o aumento da razão de proporção de massa e da excentricidade auxiliaram na redução do tempo de fusão do PCM, sendo que a combinação ótima foi a do arranjo com geometria quadrada horizontal,  $\psi = 26/74 \text{ \%/\%}$  e  $\theta = 10 \text{ mm}$ , obtendo um tempo total de 54,5 min. Este tempo foi 32,7% menor que o que o obtido com a geometria quadrada inclinada  $45^\circ$ ,  $\psi = 14/86 \text{ \%/\%}$  e  $\theta = 0$ , que obteve o maior tempo, de 81 min.

## 8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, sugere-se, para trabalhos futuros:

- Analisar a influência das geometrias, proporções de massa e excentricidades, analisadas neste trabalho, no processo de solidificação do PCM RT82;
- Analisar a influência de diferentes números de anéis contendo PCM, mantendo-se a mesma área de troca térmica e quantidade de massa;
- Estudar possíveis correlações dos resultados obtidos com números adimensionais;
- Analisar as causas dos comportamentos distintos nos valores de tempo de fusão para as diferentes geometrias estudadas;
- Analisar experimentalmente o processo comparando a eficiência com armazenadores térmicos industriais ou residenciais visando verificar a viabilidade técnica e econômica para comercialização do produto;
- Analisar a combinação de diferentes geometrias no processo de fusão de PCM.

## REFERÊNCIAS

ABDULATEEF, A. M. et al. A combination of fins-nanoparticle for enhancing the discharging of phase-change material used for liquid desiccant air conditioning unite. **Journal of Energy Storage**, v. 24, p. 100784, 2019.

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

AGYENIM, F.; EAMES, P.; SMYTH, M. Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array. **Renewable Energy**, v. 35, n. 1, p. 198–207, jan. 2010.

AL-ABIDI, A. A. et al. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, v. 53, n. 1, p. 147–156, 2013a.

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

AL-ABIDI, A. A. et al. Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins. **Energy and Buildings**, v. 68, n. PARTA, p. 33–41, 2014.

ALEHOSSEINI, E.; JAFARI, S. M. Nanoencapsulation of phase change materials (PCMs) and their applications in various fields for energy storage and management. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 283, p. 102226, 2020.

BHARGAVA, A. K. A solar water heater based on phase-changing material. **Applied Energy**, v. 14, n. 3, p. 197–209, 1983.

CÁRDENAS, B.; LEÓN, N. High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 724–737, 2013.

CHEROM KHEIRABADI, A.; GROULX, D. **The Effect of the Mushy-Zone Constant on Simulated Phase Change Heat Transfer**. [s.l: s.n.].

DARZI, A. R.; FARHADI, M.; SEDIGHI, K. Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, n. 9, p. 4080–4086, 2012.

DHAIDAN, N. S. et al. Experimental and numerical investigation of melting of NePCM inside an annular container under a constant heat flux including the effect of eccentricity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 67, p. 455–468, 2013.

DUAN, J.; XIONG, Y.; YANG, D. Study on the effect of multiple spiral fins for improved phase change process. **Applied Thermal Engineering**, v. 169, p. 114966, 25 mar. 2020.

DUTTA, R.; ATTA, A.; DUTTA, T. K. Experimental and numerical study of heat transfer in horizontal concentric annulus containing phase change material. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 86, n. 4, p. 700–710, 1 ago. 2008.

EANEST JEBASINGH, B.; VALAN ARASU, A. A detailed review on heat transfer rate, supercooling, thermal stability and reliability of nanoparticle dispersed organic phase change material for low-temperature applications. **Materials Today Energy**, v. 16, p. 100408, 2020.

ELBAHJAQUI, R.; EL QARNIA, H.; NAIMI, A. Thermal performance analysis of combined solar collector with triple concentric-tube latent heat storage systems. **Energy and Buildings**, v. 168, p. 438–456, 2018.

ESAPOUR, M. et al. Phase change in multi-tube heat exchangers. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1017–1025, 2016a.

ESAPOUR, M. et al. Numerical study on geometrical specifications and operational parameters of multi-tube heat storage systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 109, p. 351–363, 2016b.

FADL, M.; EAMES, P. C. Numerical investigation of the influence of mushy zone parameter Amush on heat transfer characteristics in vertically and horizontally oriented thermal energy storage systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 151, n. June 2018, p. 90–99, 2019.

FARAJ, K. et al. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109579, 2020.

FARID, M. M. et al. A review on phase change energy storage: materials and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 9, p. 1597–1615, 2004.

GARIMELLA, S. V. Advances in mesoscale thermal management technologies for microelectronics. **Microelectronics Journal**, v. 37, n. 11, p. 1165–1185, 2006.

GORZIN, M. et al. Investigation of PCM charging for the energy saving of

domestic hot water system. **Applied Thermal Engineering**, v. 137, p. 659–668, 2018.

GORZIN, M. et al. Nano-enhancement of phase change material in a shell and multi-PCM-tube heat exchanger. **Journal of Energy Storage**, v. 22, n. December 2018, p. 88–97, 2019.

GÜÇERİ, S. İ.; FAUNCE, S. F. Modeling of a thermal wall panel using phase change materials. **Energy**, v. 4, n. 4, p. 695–699, 1979.

HACHEM, F. et al. Improving the performance of photovoltaic cells using pure and combined phase change materials – Experiments and transient energy balance. **Renewable Energy**, v. 107, p. 567–575, 2017.

HALE, D. V et al. **Phase Change Materials Handbook**. [s.l.] National Technical Information Service U.S. Department of Commerce, 1971.

HASAN, A.; SAYIGH, A. A. Some fatty acids as phase-change thermal energy storage materials. **Renewable Energy**, v. 4, n. 1, p. 69–76, 1994.

HAWES, D. W.; FELDMAN, D.; BANU, D. Latent heat storage in building materials. **Energy and Buildings**, v. 20, n. 1, p. 77–86, 1993.

HOSSEINZADEH, K. et al. Investigation of phase change material solidification process in a LHTESS in the presence of fins with variable thickness and hybrid nanoparticles. **Applied Thermal Engineering**, v. 152, p. 706–717, 2019.

HUSSAIN, A.; ARIF, S. M.; ASLAM, M. Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 12–28, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy balances 2020: Overview**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2020. The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>>.

IQBAL, K.; SUN, D. Development of thermo-regulating polypropylene fibre containing microencapsulated phase change materials. **Renewable Energy**, v. 71, p. 473–479, 2014.

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

JOURABIAN, M. Lattice Boltzmann simulation of melting phenomenon with

natural convection from an eccentric annulus. **Thermal Science**, v. 17, 13 abr. 2013.

JOURABIAN, M.; FARHADI, M.; RABIENATAJ DARZI, A. A. Accelerated melting of PCM in a multitube annulus-type thermal storage unit using lattice Boltzmann simulation. **Heat Transfer—Asian Research**, v. 46, n. 8, p. 1499–1525, 1 dez. 2017.

JOYBARI, M. M. et al. Heat transfer enhancement of phase change materials by fins under simultaneous charging and discharging. **Energy Conversion and Management**, v. 152, p. 136–156, 2017.

KADIVAR, M. R. et al. Annulus eccentricity optimisation of a phase-change material (PCM) horizontal double-pipe thermal energy store. **Journal of Energy Storage**, v. 26, p. 101030, 2019.

KAZEMI, Z.; MORTAZAVI, S. M. A new method of application of hydrated salts on textiles to achieve thermoregulating properties. **Thermochimica Acta**, v. 589, p. 56–62, 2014.

KOUSHA, N. et al. Experimental investigation of phase change in a multitube heat exchanger. **Journal of Energy Storage**, v. 23, n. February, p. 292–304, 2019.

KUMAR, A.; SHUKLA, S. K. A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application. **Energy Procedia**, v. 74, p. 462–469, 2015.

KUZNIK, F. et al. A review on phase change materials integrated in building walls. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 379–391, 2011.

LAFDI, K.; MESALHY, O.; ELGAFY, A. Graphite foams infiltrated with phase change materials as alternative materials for space and terrestrial thermal energy storage applications. **Carbon**, v. 46, n. 1, p. 159–168, 2008.

LENG, Z. et al. Melting and solidification performance in two horizontal shell-and-tube heat exchangers with different structures. **International Journal of Energy Research**, v. 44, n. 14, p. 11288–11301, 1 nov. 2020.

LING, Z. et al. Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 427–438, 2014.

LLORACH-MASSANA, P. et al. Analysis of the technical, environmental and economic potential of phase change materials (PCM) for root zone heating in Mediterranean greenhouses. **Renewable Energy**, v. 103, p. 570–581, 2017.

MAHDI, J. M.; NSOFOR, E. C. Melting enhancement in triplex-tube latent thermal energy storage system using nanoparticles-fins combination. **International**

**Journal of Heat and Mass Transfer** **109**, v. 109, p. 417–427, 2017.

MAHDI, J. M.; NSOFOR, E. C. Multiple-segment metal foam application in the shell-and-tube PCM thermal energy storage system. **Journal of Energy Storage**, v. 20, n. September, p. 529–541, 2018.

MAHMOUD, M. et al. Recent advances in district energy systems: A review. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 20, p. 100678, 2020.

MAZMAN, M. et al. Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems. **Renewable Energy**, v. 34, n. 6, p. 1639–1643, 2009.

MOHAMED, S. A. et al. A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1072–1089, 2017.

MOUKALLED, FADL HASSAN; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab®**. Heidelberg: [s.n.].

NARDIN, G. et al. PCM-based energy recovery from electric arc furnaces. **Applied Energy**, v. 136, p. 947–955, 2014.

NAZIR, H. et al. **Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review** *International Journal of Heat and Mass Transfer* Elsevier Ltd, , 1 fev. 2019.

NOMURA, T.; AKIYAMA, T. High-temperature latent heat storage technology to utilize exergy of solar heat and industrial exhaust heat. **International Journal of Energy Research**, v. 41, n. 2, p. 240–251, 1 fev. 2017.

OBERKAMPF, W. L.; TRUCANO, T. G. Verification and validation in computational fluid dynamics. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 38, n. 3, p. 209–272, 2002.

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

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

PAN, M.; ZHONG, Y. Experimental and numerical investigation of a thermal management system for a Li-ion battery pack using cutting copper fiber sintered skeleton/paraffin composite phase change materials. **International Journal of Heat**

**and Mass Transfer**, v. 126, p. 531–543, 2018.

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

PURETEMP LLC. **PURETEMP TECHNICAL DATA SHEETS**. Disponível em: <<https://www.puretemp.com/stories/puretemp-technical-data-sheets>>. Acesso em: 16 out. 2020.

RATHOD, M. K.; BANERJEE, J. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 246–258, 2013.

RISMANCHI, B. et al. Energy, exergy and environmental analysis of cold thermal energy storage (CTES) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5741–5746, 2012.

RUBITHERM TECHNOLOGIES GMBH. **PCM SP-LINE**. Disponível em: <<https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/anorganische-pcm-sp>>. Acesso em: 16 out. 2020.

SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 191, 14 jan. 2018.

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

SEFIDAN, A. M. et al. Multi-layer PCM solidification in a finned triplex tube considering natural convection. **Applied Thermal Engineering**, v. 123, p. 901–916, 2017.

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

SHARIFI, N. P.; SHAIKH, A. A. N.; SAKULICH, A. R. Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 455–467, 2017.

SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 318–345, 2009.

SHARMA, A. et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n.



2, p. 318–345, 2009.

SHIRIN-ABADI, A. R.; MAHDAVIAN, A. R.; KHOEE, S. New Approach for the Elucidation of PCM Nanocapsules through Miniemulsion Polymerization with an Acrylic Shell. **Macromolecules**, v. 44, n. 18, p. 7405–7414, 27 set. 2011.

SOLOMON, A. D. Design criteria in PCM wall thermal storage. **Energy**, v. 4, n. 4, p. 701–709, 1979.

SU, W.; DARKWA, J.; KOKOGIANNAKIS, G. Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 373–391, 2015.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Ed, 2nd ed. Harlow: [s.n.].

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

WANG, Z. et al. Rapid Charging of Thermal Energy Storage Materials through Plasmonic Heating. **Scientific Reports**, v. 4, n. 1, p. 6246, 2014.

YANG, B. et al. Microstructural evolution within mushy zone during paraffin's melting and solidification. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 141, p. 769–778, 2019.

YUSUF YAZICI, M. et al. Effect of eccentricity on melting behavior of paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit: An experimental study. **Solar Energy**, v. 101, p. 291–298, 2014.

ZHANG, S. et al. Melting performance analysis of phase change materials in different finned thermal energy storage. **Applied Thermal Engineering**, v. 176, p. 115425, 2020.

ZHAO, C. Y.; ZHANG, G. H. Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3813–3832, 2011.

ZHAO, J.; LV, P.; RAO, Z. Experimental study on the thermal management performance of phase change material coupled with heat pipe for cylindrical power battery pack. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 82, p. 182–188, 2017.

ZHENG, Z.-J.; XU, Y.; LI, M.-J. Eccentricity optimization of a horizontal shell-and-tube latent-heat thermal energy storage unit based on melting and melting-solidifying performance. **Applied Energy**, v. 220, p. 447–454, 2018.

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

## APÊNDICE A

Artigo submetido ao XXIV Encontro Nacional de Modelagem Computacional e XII Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais ocorrido em 2021.

### INFLUÊNCIA DA EXCENTRICIDADE E PROPORÇÃO DE MASSA NO PROCESSO DE FUSÃO DE PCM EM ARMAZENADORES DE ENERGIA TÉRMICA DE MÚLTIPLOS ANÉIS DE SEÇÃO QUADRADA

**Franco Picoli**<sup>1</sup> – francopicoli@gmail.com

**Rodrigo Menezes Kerber**<sup>1</sup> – rodrigomenkerber@gmail.com

**Rejane De César Oiveski**<sup>1</sup> – decesaroo@gmail.com

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – São Leopoldo, RS, Brasil

**Resumo.** *Armazenadores de energia térmica constituem um importante sistema para várias áreas da engenharia, sendo que, os de calor latente vêm ganhando atenção devido às vantagens que oferecem. Porém, ainda possuem algumas limitações como a baixa condutividade térmica dos materiais utilizados para armazenamento da energia. Este estudo tem como objetivo analisar a influência de diferentes valores de excentricidade e proporção de massa em trocadores de calor de múltiplos tubos quadrados, na redução do tempo total de fusão. O estudo foi realizado por fluidodinâmica computacional considerando domínio bidimensional. O material de mudança de fase (PCM) utilizado foi o RT82. Foram mantidas constantes a área total de troca térmica e a massa total de PCM. O modelo numérico utilizado é composto pelas equações da quantidade de movimento, conservação de massa e energia, acrescidas do modelo de mudança de fase. Os resultados do estudo revelam que a proporção de massa entre os anéis, bem como a excentricidade entre eles, influenciou na redução do tempo total de fusão do PCM, sendo que, nesta última há um ponto de inflexão na relação entre excentricidade e tempo total de fusão.*

**Palavras-chave:** *Armazenadores térmicos, Materiais de mudança de fase, Redução do tempo de fusão, Múltiplos tubos, Excentricidade.*

## 1. INTRODUÇÃO

Armazenadores de energia térmica possuem importante função em diversos processos, tanto na área industrial como residencial. Os modelos que armazenam energia por calor latente vêm ganhando destaque devido às vantagens que oferecem, em relação aos armazenadores por calor sensível e termoquímicos. Em comparação aos sistemas por calor sensível, apresentam maior capacidade de armazenamento para um mesmo volume e a propriedade de armazenar calor a uma temperatura quase constante. (SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, 2009). Contrapondo os sistemas termoquímicos, apresentam maior faixa de temperaturas de operação. (NAZIR et al., 2019). Apesar das vantagens, os sistemas de armazenamento por calor latente ainda possuem limitações para sua aplicação, sendo uma das principais a baixa condutividade térmica dos materiais utilizados para o armazenamento da energia (AL-ABIDI et al., 2013a). Muitos estudos vêm sendo realizados visando encontrar formas de minimizar o problema, porém algumas propostas, como o micro encapsulamento ou a inserção de espumas metálicas, acabam se tornando muito caras e / ou complexas. (KADIVAR et al., 2019). Armazenadores que utilizam múltiplos tubos, especificamente com configuração anelar concêntrica ou excêntrica vêm sendo estudados como alternativas viáveis por possuírem relativa eficiência (em termos de carga e descarga térmica) com baixo custo e baixa complexidade de fabricação.

Alguns pesquisadores já realizaram estudos na área, a exemplo de Darzi; Farhadi; Sedighi (2012) que investigaram, numericamente, o processo de fusão de PCM armazenado entre dois tubos cilíndricos, com diferentes excentricidades. Através deste estudo os autores verificaram que a taxa de fusão aumenta conforme aumenta a excentricidade vertical descendente do tubo interno. Zheng; Xu; Li (2018) realizaram estudo similar, mas observando também o efeito do número de Rayleigh no processo de fusão do PCM. Estes autores verificaram que a excentricidade vertical descendente diminui o tempo total de fusão, porém um valor elevado nem sempre traz um melhor desempenho. Além disso, verificaram que a excentricidade ótima é linearmente dependente do número de Rayleigh. Dutta; Atta; Dutta (2008) e Jourabian (2013) realizaram estudos experimentais e numéricos do processo de fusão de PCM enclausurado entre dois tubos cilíndricos, porém com o diferencial de análise considerando diferentes inclinações do tubo excêntrico. Observaram que tanto a excentricidade quanto a variação do ângulo de inclinação do tubo excêntrico

desempenham papel importante para a circulação líquida da fase fundida, bem como para o fluxo térmico na superfície interna do anel.

Outro estudo importante nesta área diz respeito à análise da influência da proporção de PCM entre tubos e anéis. Gorzin et al. (2018) analisaram o processo de fusão de PCM em um trocador de calor de múltiplos tubos concêntricos, variando a distribuição de massa entre o anel externo e o tubo central. Os pesquisadores constataram que, ao distribuir a massa do PCM em um arranjo no qual 40% da massa do PCM está no tubo interno, consegue-se uma redução de 52% no tempo de fusão.

Os trabalhos citados abordam, principalmente, a utilização de um único anel tubular para o enclausuramento do PCM ou a combinação de um anel e um tubo central. A maioria considera também o tubo interno do anel como parede ativa e o tubo externo como isolado. Outra questão pouco abordada é a geometria dos anéis, que se limitam a geometrias cilíndricas. Deste modo, este trabalho visa contribuir aos estudos na área analisando numericamente o processo de fusão de material de mudança de fase em armazenadores de energia térmica, de modo a formar múltiplos anéis para armazenamento do PCM. As paredes ativas consideradas são as superfícies em contato com o PCM, tanto dos tubos internos como a dos externos que formam os anéis. A geometria dos tubos analisada foi a quadrada. Foi analisada também a influência de diferentes proporções de massa entre os anéis e diferentes valores de excentricidade no tempo total de fusão do PCM.

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste em encontrar formas de otimização do processo de fusão do PCM RT82 contido em anéis tubulares de um armazenador de energia térmica de múltiplos tubos cuja geometria da seção é quadrada. A Figura 1(a) mostra a vista da seção transversal do armazenador investigado. Este consiste em 5 tubos formando quatro anéis, sendo que, em dois destes anéis e no tubo central escoo fluido térmico, representado na cor azul, e dois deles é armazenado o PCM, representado pela cor cinza. As dimensões dos tubos, cuja superfície está em contato com PCM são representados por  $b_{1,ext}$ ,  $b_{2,int}$ ,  $b_{3,ext}$  e  $b_{4,int}$ . A proporção de massa de PCM entre os anéis é dada por:  $\psi = m_i/m_e$ , sendo  $m_i$  a porcentagem de massa do anel interno e  $m_e$  a porcentagem de massa do anel externo, ambos em relação ao total de massa. Os

valores de  $\psi$  testados são: 14/86, 20/80 e 26/74 %/%. Quatro valores de excentricidade vertical descendente ( $\theta$ ) entre os tubos dos anéis de PCM, representado na (b), foram testados: 0, 5, 10 e 15 mm. A combinação das variações citadas resultou em 12 diferentes configurações geométricas, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 1.

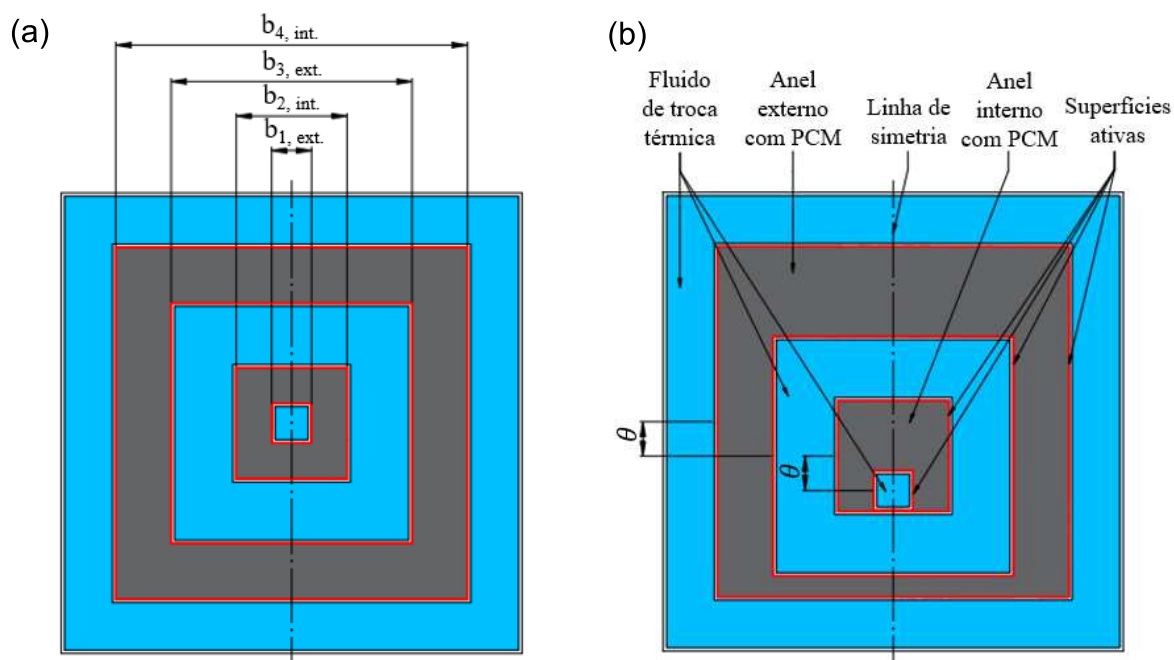


Figura 1 – Seção transversal do armazenador de energia térmica. a) Vista com as cotas das dimensões dos tubos; b) Vista com os principais componentes do sistema.

Para cada caso estudado, a área total de troca térmica (superfície ativa) e a quantidade total de massa de PCM foram mantidas constantes, sendo a primeira representada pelo perímetro total da superfície dos tubos em contato com o PCM (com valor de 1290,3 mm) e a segunda representada pela área total das regiões com PCM (com valor de 14378,8 mm<sup>2</sup>). O estudo foi tratado desta forma por ser bidimensional.

Tabela 1 – Dimensões dos tubos, em contato com o PCM, de cada caso analisado.

$\psi$ (%/%)	$\theta$ (mm)	Dimensões (mm)			
		$b_{1, \text{ext.}}$	$b_{2, \text{int.}}$	$b_{3, \text{ext.}}$	$b_{4, \text{int.}}$
14/86	0	17,3	48,1	104,6	152,6
	5				
	10				
	15				
20/80	0	23,3	58,5	96,5	144,3
	5				
	10				
	15				
26/74	0	14,6	62,9	100,9	144,3
	5				
	10				
	15				

## 2.1. Modelo Matemático

O modelo matemático utilizado é composto pelas equações da conservação da massa, Eq. (1), quantidade de movimento, Eq. (2), e energia, Eq. (3):

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \beta \vec{g}(T - T_{ref})] + \vec{S} \quad (2)$$

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

onde  $\vec{V}$  é o vetor velocidade,  $\rho$  é a massa específica,  $t$  é o tempo,  $p$  é a pressão,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica,  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade,  $\vec{S}$  é o termo fonte,  $\lambda_{to}$  é a entalpia total, obtida pela soma da entalpia sensível ( $\lambda_{sen}$ ) e a variação da entalpia na mudança de fase ( $\lambda_L$ ),  $k$  é a condutividade térmica,  $T$  é a temperatura,  $T_{ref}$  é a temperatura de referência e  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica. O termo fonte é obtido com a Eq. (4).

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

onde  $\gamma$  é a fração líquida durante a mudança de fase,  $\varepsilon$  é uma constante de valor 0,001 usada para evitar divisão por zero e  $C$  é a constante da zona porosa, que é

dependente da morfologia desta zona. (VOLLER; PRAKASH, 1987). A fração líquida durante a mudança de fase é obtida através da Eq. (5):

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

onde  $T_s$  é a temperatura do sólido e  $T_l$  a temperatura do líquido. A entalpia sensível é obtida através da Eq. (6).

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

onde  $\lambda_{ref}$  é a entalpia na temperatura de referência ( $T_{ref} = 293,15$  K) e  $c_p$  é o calor específico a pressão constante. A variação da entalpia na mudança de fase é em função da temperatura, que está associada à fração líquida na zona porosa, obtida através da Eq. (7) ou então pela Eq. (8).

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

$$\lambda_L = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ L & \text{se } T > T_l \\ \gamma L & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (8)$$

em que  $L$  é o calor latente do material.

## 2.2. Condições Iniciais e de Contorno

O sistema analisado é bidimensional e possui quatro superfícies ativas que estão em contato com o PCM, sendo mantidas a temperatura constante e uniforme de 363,15 K e, onde é adotada também, a condição de não-deslizamento. As superfícies citadas podem ser observadas na Figura(a), as quais são representadas pelas linhas na cor vermelho. A temperatura inicial do PCM RT82 é de 300,15 K e suas propriedades estão apresentadas na Tabela 2, onde  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica. A espessura da parede e o raio de canto dos tubos, bem como o fluido térmico, não foram considerados neste trabalho.



Tais condições foram baseadas nos experimentos e simulações realizados por Al-Abidi et al.(2013), em um armazenador de energia térmica de calor latente do tipo triplex, para a fusão do mesmo PCM. O domínio computacional considerado é simétrico em torno do eixo vertical, conforme também indicado na Figura 1(a).

Tabela 2 – Propriedades termofísicas do PCM RT82.

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kg.K]	$L$ [J/kg]	$T_s$ e $T_l$ [K]	$k$ [W/m.K]	$\beta$ [1/K]	$\mu$ [kg/m.s]
950 (s)	2000	176000	350,15 (s)	0,2	0,001	0,03499
770 (l)			358,15 (l)			

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

### 2.3. Abordagem Numérica

O estudo foi efetuado por fluidodinâmica computacional (CFD). Para o acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o método SIMPLE. O gradiente e a pressão foram definidos como Least Squares Cell Based e PRESTO!, respectivamente. Para a quantidade de movimento e a energia foi utilizado Second Order Upwind. Os fatores de relaxamento para a pressão, massa específica, forças de campo, quantidade de movimento, fração de líquido e energia foram, respectivamente: 0,2; 0,2; 0,2; 0,2; 0,5 e 0,9. O intervalo de tempo utilizado foi de 0,5 s, com limitação de mil iterações por intervalo. Como critério de convergência foram adotados os valores de  $10^{-4}$  para continuidade e velocidade e  $10^{-5}$  para a energia. Foi utilizado dupla precisão em todas as simulações e foi assumido ainda: escoamento laminar, regime transiente, propriedades constantes e dissipação viscosa desprezível. Foi ainda utilizada a aproximação de Boussinesq para a variação da massa específica.

Para validação numérica utilizaram-se os resultados experimentais de Al-Abidi et al.(2013), em estudo sobre o processo de fusão do PCM RT82 em um armazenador de energia térmica de tubos tipo triplex, variando quantidades e formas geométricas de aletas. A Figura 2 mostra o perfil de temperatura média transiente, obtido experimentalmente por Al-Abidi et al.(2013) e numericamente pelo presente trabalho. A diferença percentual média, entre resultados, foi de 1%.

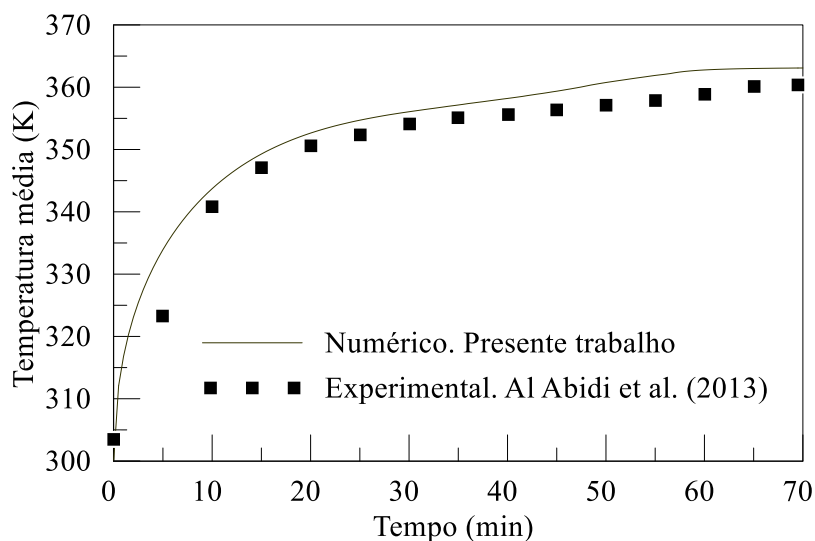


Figura 2 – Temperatura média vs. tempo: experimental de Al-Abidi et al. (2013) e numérico do presente trabalho.

A análise de malha foi realizada através do método GCI (Grid Convergence Index), utilizando três malhas: M1, M2 e M3, cada uma com 54919, 29624 e 16091 elementos triangulares, respectivamente. A variável considerada foi a fração de líquido. Os índices obtidos foram 3,24 % entre M3 e M2 e 2,5 % entre M2 e M1. A malha escolhida para a simulação foi a M2, a qual pode ser verificada na Figura 3, onde é possível observar os detalhes do refinamento próximos às superfícies ativas, tanto do anel interno quanto do externo.

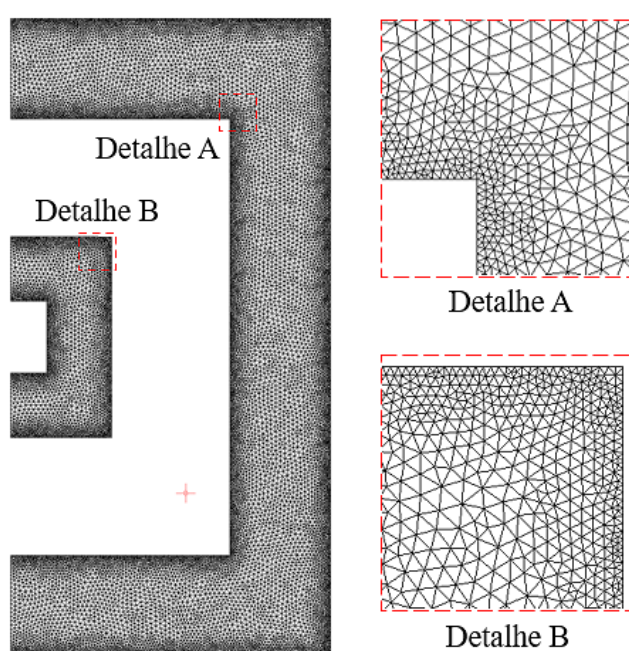


Figura 3 – Malha computacional e detalhes do refinamento.

Foi realizada também a análise temporal, utilizando-se três diferentes passos de tempo  $dt$ , sendo: 0,25; 0,5 e 0,75 s. A diferença percentual média entre eles foi de 0,06% entre  $dt$  0,25 e 0,5 s e 0,02% entre  $dt$  0,5 e 0,75 s. O  $dt$  utilizado nas simulações foi de 0,5 s.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 4(a-c) mostram os campos de fração de líquido  $\gamma$  em  $t = 2, 20$  e  $40$  min, para  $\psi = 26/74$  %/%, e  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm, respectivamente. Na Figuras 4(a) pode-se observar a semelhança entre os campos de  $\gamma$  para todos os valores de  $\theta$ , ou seja, nos instantes iniciais a excentricidade não altera significativamente o processo de fusão. Já na Figura 4(b), com  $t = 20$  min, a quantidade de massa líquida de PCM, representada pela cor vermelho, é significativamente maior nas proximidades das superfícies ativas, dando lugar ao processo de transferência de calor por convecção natural. Nota-se também que, conforme  $\theta$  aumenta, aumenta também a massa sólida na parte superior do anel externo, representada pela cor azul. Na Figuras 4(c), com  $t = 40$  min, nota-se, em  $\theta = 0$ , a fusão completa na região superior do anel externo, enquanto a região inferior ainda possui PCM sólido, tanto no anel interno quanto no anel externo. Isso ocorre devido a estratificação térmica do PCM líquido, propiciando as maiores taxas locais de transferência de calor na região superior, acelerando o processo de fusão nessa área. No entanto a medida em que a excentricidade aumenta, aumenta também a resistência térmica entre as superfícies horizontais superiores, reduzindo assim a taxa de fusão naquelas regiões, o que pode ser verificado pelas quantidades de PCM sólido ainda ali localizados para os demais valores de  $\theta$  (5, 10 e 15 mm).

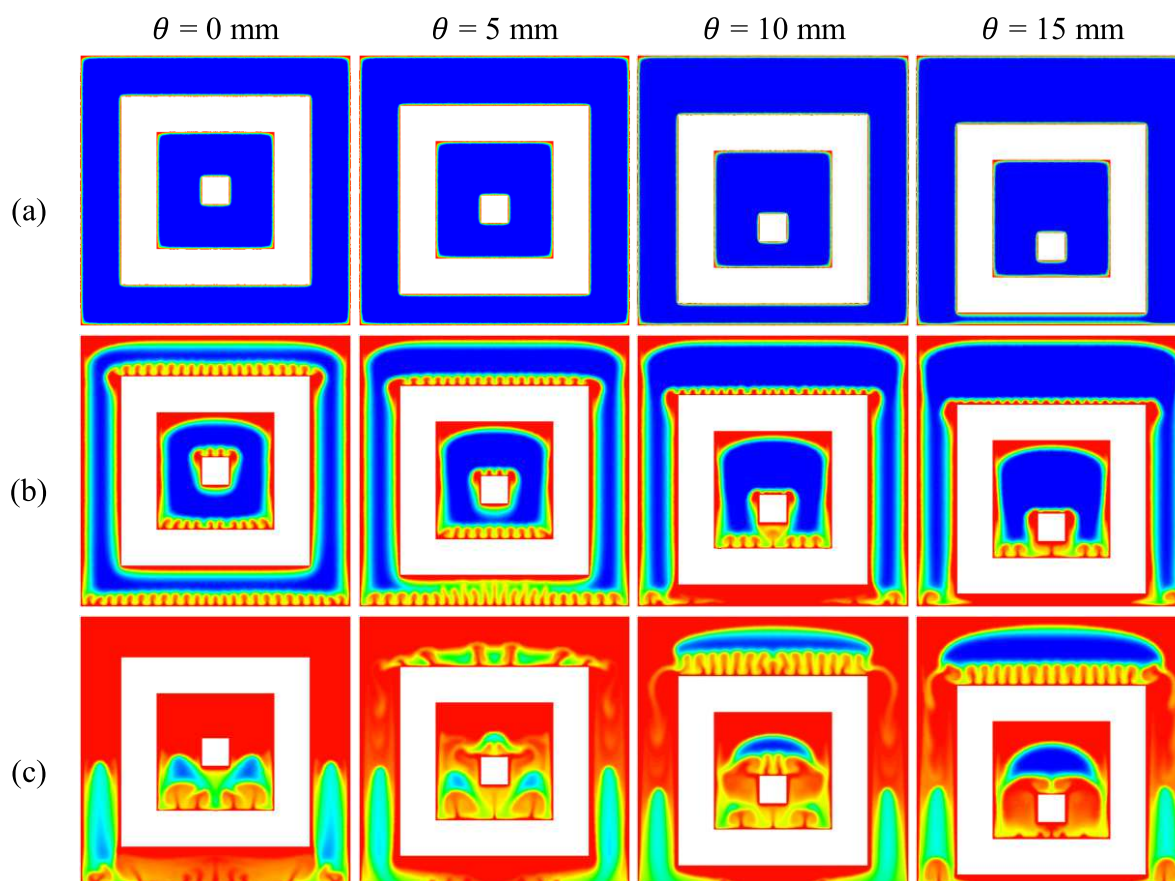


Figura 4 – Campos de  $\gamma$  para  $\psi = 26/74$  %/% e  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm: (a)  $t = 2$  min; (b)  $t = 20$  min ; (c)  $t = 40$  min.

Nas Figuras 5(a-c) são apresentados os perfis de fração de líquido para o anel externo ( $\gamma_{ext}$ ) e interno ( $\gamma_{int}$ ), para  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm, com  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74$  %/%, respectivamente. Inicialmente pode-se observar que a excentricidade dos anéis pouco interfere no tempo total de fusão, independentemente de  $\psi$ . Além disso pode-se observar que a diferença entre o tempo total de fusão entre o anel interno e externo são dependentes da fração de massa,  $\psi$ . Enquanto para  $\psi = 14/86$  (Figura 5a) a diferença média de tempo é de 50%, já para  $\psi = 26/74$  (Figura 5c) a diferença é inexpressiva.

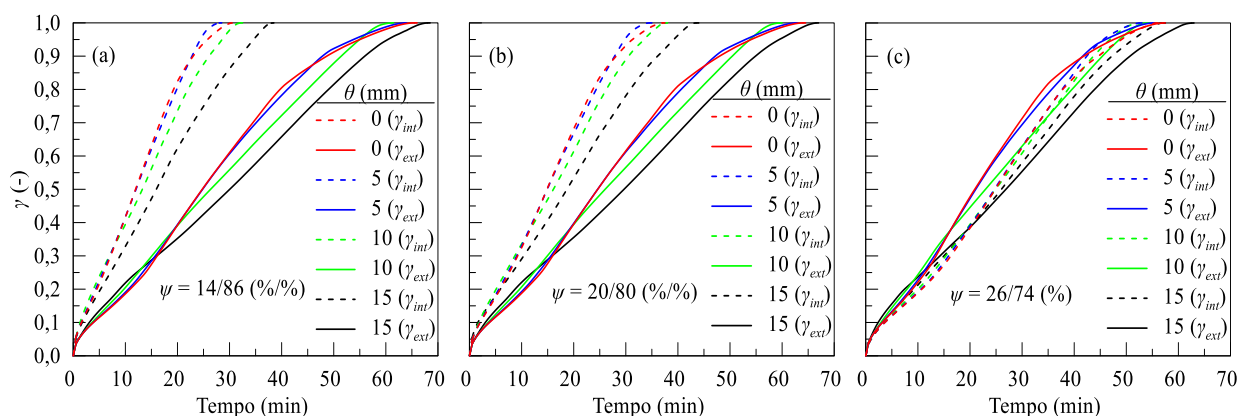


Figura 5 – Fração de líquido vs. tempo no anel interno e anel externo: (a)  $\psi = 14/86$  %/%; (b)  $\psi = 20/80$  %/%) e (c)  $\psi = 26/74$  %/%)

A Figura 6 mostra a variação do tempo total de fusão do PCM em função da proporção de massa ( $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74$  %/%), para diferentes excentricidades ( $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm). Nesta figura pode-se observar que, para todas as excentricidades, o tempo total de fusão está associado à proporção de massa entre os anéis, ou especificamente, conforme aumenta a massa no anel interno ( $m_i$ ), com conseqüente redução da massa do anel externo ( $m_e$ ), reduz o tempo total de fusão do PCM, independentemente do valor da excentricidade.

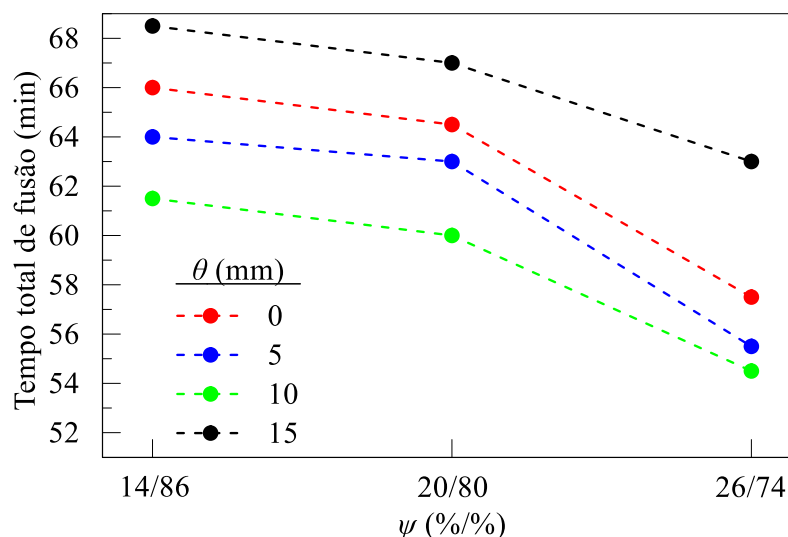


Figura 6 – Tempo total de fusão para  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74$  %/%;  $\theta = 0, 5, 10,$  e  $15$  mm.

A Figura 7 mostra o tempo total de fusão dos dois anéis em função da excentricidade ( $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm), para diferentes proporções de massa ( $\psi =$

14/86, 20/80 e 26/74 %/%) . Inicialmente pode-se observar que o tempo total de fusão varia com a excentricidade. Além disso, pode-se observar que existe um tempo mínimo de fusão e este ocorre quando  $\theta = 10$  mm, independentemente da proporção de massa, sendo este, um ponto de inflexão onde valores maiores ou menores promovem um aumento no tempo total de fusão para os casos estudados.

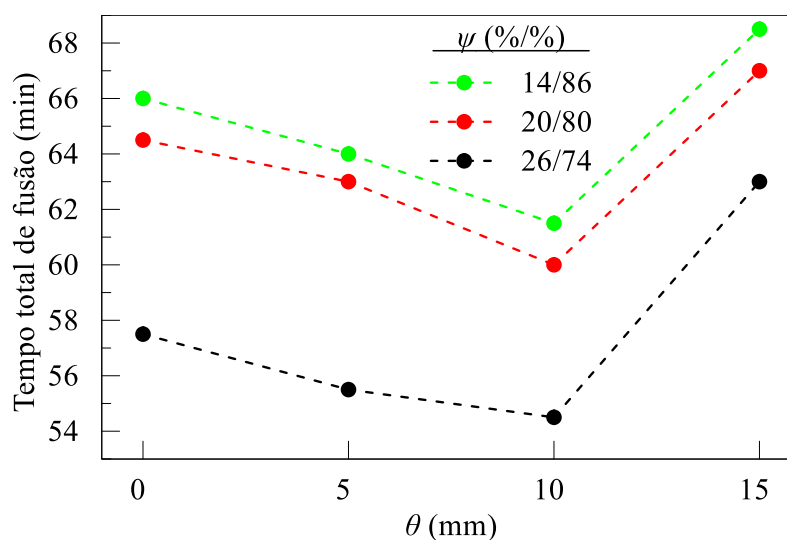


Figura 7 – Tempo total de fusão para  $\theta = 0, 5, 10$  e  $15$  mm;  $\psi = 14/86, 20/80$  e  $26/74$  %/%) .

#### 4. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi analisar a influência da excentricidade e da proporção de massa no processo de fusão de PCM em armazenadores de energia térmica de múltiplos tubos de seção geométrica quadrada. Através dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A variação da proporção de massa entre os anéis contribui para diminuir o tempo de fusão do PCM, sendo que a proporção 26/74 obteve o menor valor entre as proporções estudadas;
- As excentricidades dos anéis contendo PCM também contribuíram para melhorar a eficiência da troca térmica e conseqüentemente reduziram do tempo total de fusão, porém há uma limitação para esta variável, sendo que valores elevados de excentricidade, especificamente o valor de 15 mm, tiveram efeito negativo, aumentando drasticamente o tempo de fusão.

## **Agradecimentos**

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

## **REFERENCES**

AL-ABIDI, A. A. et al. Internal and external fin heat transfer enhancement technique for latent heat thermal energy storage in triplex tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, v. 53, n. 1, p. 147–156, 2013.

DARZI, A. R.; FARHADI, M.; SEDIGHI, K. Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 9, p. 4080–4086, 2012.

DUTTA, R.; ATTA, A.; DUTTA, T. K. Experimental and numerical study of heat transfer in horizontal concentric annulus containing phase change material. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 86, n. 4, p. 700–710, 1 ago. 2008.

GORZIN, M. et al. Investigation of PCM charging for the energy saving of domestic hot water system. *Applied Thermal Engineering*, v. 137, p. 659–668, 2018.

JOURABIAN, M. Lattice Boltzmann simulation of melting phenomenon with natural convection from an eccentric annulus. *Thermal Science*, v. 17, 13 abr. 2013.

KADIVAR, M. R. et al. Annulus eccentricity optimization of a phase-change material (PCM) horizontal double-pipe thermal energy store. *Journal of Energy Storage*, v. 26, p. 101030, 2019.

NAZIR, H. et al. *Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review International Journal of Heat and Mass Transfer*. Elsevier Ltd, 1 fev. 2019.

SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 318–345, 2009.

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

ZHENG, Z.-J.; XU, Y.; LI, M.-J. Eccentricity optimization of a horizontal shell-and-tube latent-heat thermal energy storage unit based on melting and melting-solidifying performance. *Applied Energy*, v. 220, p. 447–454, 2018.

#### INFLUENCE OF EXCENTRICITY AND MASS PROPORTION ON THE PCM MELTING PROCESS IN MULTIPLE SQUARE SECTION RINGS THERMAL STORAGES

**Abstract.** *Thermal energy storages are an important system for several areas of engineering, and latent heat storages have been gaining attention due to the advantages they offer. However, they still have some limitations, such as the low thermal conductivity of the materials used for energy storage. This study aims to analyze the influence of different values of eccentricity and mass proportion in multiple square tube heat exchangers on the reduction of total melting time. The study was carried out by computational fluid dynamics considering a two-dimensional domain. The phase change material (PCM) used was RT82. The total heat exchange area and the total PCM mass were kept constant. The numerical model used is composed by the momentum, mass and energy equations, plus the phase change model. The results of the study reveal that the mass ratio between the rings, as well as the eccentricity between them, influenced the reduction of the total melting time of the PCM, and in the latter there is an inflection point in the relationship between eccentricity and total melting time.*

**Keywords:** *Thermal energy storages, Phase change materials, Melting time reduction, Multiple tubes, Eccentricity*