

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Túlio Rafael Nascimento Porto

**FUSÃO-SOLIDIFICAÇÃO DE UM MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE
APLICADO EM UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA:
MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Campina Grande, PB

2020

Túlio Rafael Nascimento Porto

**FUSÃO-SOLIDIFICAÇÃO DE UM MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE
APLICADO EM UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA:
MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Fenômenos de Transporte e Energia.

Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima, Dr;

Orientador: Tony Herbert Freire de Andrade, Dr;

Campina Grande, PB.

2020

P658f

Porto, Túlio Rafael Nascimento.

Fusão-solificação de um material de mudança de fase aplicado em um sistema de armazenamento de energia térmica: modelagem e simulação / Túlio Rafael Nascimento Porto. – Campina Grande, 2020.
151 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2020.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr. Tony Herbert Freire de Andrade".

Referências.

1. Armazenamento de Energia Térmica. 2. Demanda Energética. 3. Materiais de Mudança de Fase. \$. Estudo Numérico. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Andrade, Tony Herbert Freire de. II. Título.

CDU 621.31(043)

FUSÃO-SOLIDIFICAÇÃO DE UM MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE APLICADO EM UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA: MODELAGEM E SIMULAÇÃO.

TÚLIO RAFAEL NASCIMENTO PORTO

Dissertação Aprovada em 28/02/2020 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Dr. ANTONIO GILSON BARBOSA DE LIMA

CPF: 436.676.604-30

(ORIENTADOR)



Dr. TONY HEBERT FREIRE DE ANDRADE

CPF: 027.051.864-92

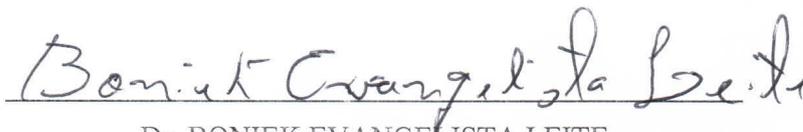
(ORIENTADOR)



Dr. SEVERINO RODRIGUES DE FARIAS NETO

CPF: 228.490.864-15

(EXAMINADOR INTERNO)



Dr. BONIEK EVANGELISTA LEITE

CPF: 054.104.714-07

(EXAMINADOR EXTERNO)

AGRADECIMENTOS

Ao **Senhor Jesus Cristo** em primeiro lugar, por me fazer nascer para um mundo de desafios, os quais são vividos exclusivamente por sua infinita graça e misericórdia, incondicionais.

A minha família, que me sustenta e consola nos momentos de aflição e se alegra com as vitórias por meio destas alcançadas, em especial a minha esposa **Nathalia Sant'Anna Porto**, por compreender a falta de tempo, me incentivar e acreditar nos meus sonhos, como sendo seus. Ao meu pai **José Wilson**, por sempre se empenhar em me permitir estudar, à custa de muito esforço, acreditando em uma capacidade que, muitas vezes, não vejo em mim e a minha mãe **Christiane de Fátima**, pelas noites em claro que passou, ensinando-me o “dever de casa”, com paciência e dedicação incomparáveis, as quais, refletem diretamente no estudante que me tornei.

Ao professor **Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**, por trabalhar com tamanho empenho, dedicação e paciência, de modo que transmite confiança e encoraja seus alunos a persistirem na busca de ser um profissional que faça a diferença, naquilo que se dedica a fazer. Tornando-se, ao longo dos anos, uma referência e um amigo.

Aos professores **Tony Herbert** e **Severino Rodrigues** que me ajudaram a compreender um pouco mais sobre a difícil tarefa de trabalhar com simulação numérica, sempre com dedicação e conhecimentos, fundamentais ao andamento deste trabalho.

A todos os companheiros, estudantes da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Mestrandos em Engenharia Mecânica, pesquisadores do Laboratório Computacional de Térmicas e Fluidos (LCTF), em especial aos Amigos **Ricardo Soares Gomez** e **Carlos de Araújo Motta**, por me dedicarem tempo, discutindo questões, que implicaram diretamente na execução deste trabalho.

A CAPES, CNPq e FINEP, pelo incentivo financeiro.

A todos os funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PPGEM, do Centro de Ciências e Tecnologia – CCT, na UFCG, que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

PORTO, T. R. N. **FUSÃO-SOLIDIFICAÇÃO DE UM MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE APLICADO EM UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA: MODELAGEM E SIMULAÇÃO**. 2020. 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Estado da Paraíba, 2020.

RESUMO

O desenvolvimento de meios de armazenar energia, na sua forma térmica, apresenta-se como uma possível solução na busca por reduções entre a oferta e a demanda energética mundial. Neste âmbito observa-se a característica de determinados materiais de absorver ou liberar grandes montantes de energia, em determinados períodos de tempo e sob condições específicas de operação. Estes são denominados Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials-PCMs*), capazes de armazenar de 5 a 14 vezes mais energia por unidade de volume, que os materiais que armazenam energia via calor sensível. Ademais, estes materiais possuem limitações quanto a sua aplicação, como a baixa condutividade térmica e, portanto, faz-se necessária à sua composição com materiais de elevada condutividade, como os metais, para que seja possível controlar os tempos de absorção e liberação de energia. Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo numérico dos processos de fusão e solidificação de um PCM, composto em um sistema de troca térmica, com tubos de cobre aletados, os quais possibilitam a transferência de calor entre um fluido de aquecimento ou resfriamento e o material de mudança de fase. A influência da geometria das aletas e de parâmetros de processamento é analisada através de campos de temperatura e frações de líquido ao longo das transformações de fase. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que o modelo proposto foi capaz de reproduzir, com riqueza de detalhes e coerência física, os processos de fusão e solidificação do PCM; os resultados foram comparados com dados experimentais, disponíveis em literatura especializada e apresentaram erros médios inferiores a 10%. Para a configuração geométrica proposta, com 24 aletas, distribuídas simetricamente nas superfícies dos tubos em contato com o PCM, o tempo total para o ciclo de carga e descarga do material foi de cerca de 240 min, sendo 72 min necessários para a fusão completa do PCM, sob condições de aquecimento a 90°C e 168 min para a solidificação completa, sob condições de resfriamento a 68°C. Com essa configuração foi possível obter um tempo de fusão completa do PCM cerca de 32% mais rápido que a configuração com 8 aletas, usada para validar o modelo numérico, e apresentando uma redução de cerca de 4,3 % na energia total absorvida.

Palavras-chave: Demanda energética. Materiais de mudança de fase. Armazenamento de energia térmica. Estudo numérico.

PORTO, T. R. N. **MELTING-SOLIDIFICATION OF A PHASE CHANGE MATERIAL APLAID TO A THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM: MODELING AND SIMULATION**. 2020. 151p. Dissertation (Master's degree in mechanical engineering) – Federal University of Campina Grande, Campina Grande, State of Paraiba, 2020.

ABSTRACT

The development of thermal energy storing systems, presents as a possible solution in the search for reductions between supply and the world energy demand. In this context it is observed the characteristic of certain materials to absorb or release large amounts of energy, in certain periods of time and under specific operate conditions. These are called Phase Change Materials (PCMs) capable of storing 5 to 14 times more energy per unit volume than the materials that store energy via sensible heat. In addition, these materials have limitations on their application, such as low thermal conductivity and, therefore, it is necessary to connect them with high conductivity materials, such as metals, to control the times of energy absorption and release. This work aims to perform a numerical study of the PCM melting and solidification processes, composed in a heat transfer system, with finned copper tubes, which allow the thermal energy exchange between a heat transfer fluid and the PCM. The influence of fin geometry and processing parameters are analysed through temperature fields and liquid fractions along the phase transformations. From the obtained results, it was possible to conclude that the proposed model was able to reproduce, with richness of detail and physical coherence, the PCM processes of fusion and solidification, the results were compared with experimental data, available in specialized literature, with average errors less than 10%. For the proposed geometric configuration, with 24 fins, symmetrically distributed on the surfaces of the pipes in contact with the PCM, the total time for the material charge and discharge cycle was about 240min, with 72 min required for the complete melting, under heating conditions at 90 °C and 168min for complete solidification, under cooling conditions at 68 °C. With this configuration it was possible to obtain the complete melting time of the PCM about 32% faster than the configuration with 8 fins, used to validate the numerical model, and presents a reduction of 4.3% in total absorbed energy.

Key words: Energy demand. Phase change materials. Storage of thermal energy. Numerical study.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Classificação dos meios de armazenamento de energia térmica.....	20
Figura 2.1 - Fluxograma das várias etapas estudadas no desenvolvimento de materiais de mudança de fase.....	25
Figura 2.2 - Funcionamento de um material de mudança de fase durante o ciclo de carga e descarga.	26
Figura 2.3 - Classificação dos PCMs.....	28
Figura 2.4 - Técnicas de potencialização dos LHTES.....	32
Figura 2.5 - <i>Container</i> com aletas pineiformes de base quadrada utilizado para resfriar aparelhos eletrônicos.....	34
Figura 2.6 - <i>Container</i> anular com aletas radiais de cobre utilizado para armazenar energia.	34
Figura 2.7 - Esquema ilustrativo de um TTHX	35
Figura 2.8 - TTHX com aletas longitudinais.	35
Figura 2.9 - TTHX com aletas radiais.	36
Figura 2.10 - Duas unidades de LHTES tipo casco e tubo com HPs (a) PCM preenche o volume da casca e HTF escoar no interior dos tubos -Módulo 1 (b) PCM preenche o volume dos tubos e o HTF escoar no volume do casco-Modulo 2 (c) Detalhes do módulo 1 (d) Detalhes do módulo 2	38
Figura 2.11 - Esquema ilustrativo do processo de troca térmica em um LHTES funcionando com múltiplos PCMs.....	39
Figura 2.12 - (a) Meio poroso de Níquel (Ni) (a2) Detalha dos poros (b) Níquel preenchido com PCM (Eritritol) (b2) detalhe dos poros preenchidos.	40
Figura 2.13 - Macro cápsulas de PCM.	41
Figura 2.14 - Micro cápsulas de parafina.	42
Figura 2.15 - Reservatório de aquecimento solar de água.	43
Figura 2.16 - Coletor solar acoplado com uma unidade de armazenamento de calor latente para aquecimento de ambientes.....	44
Figura 2.17 - Caixa contendo um forno solar acoplado a um PCM.....	44
Figura 2.18 - Estufa acoplada com unidades de armazenamento de energia via calor latente.	45
Figura 2.19 - Comparação entre sistemas de controle de temperatura com e sem a aplicação de PCMs.	46
Figura 4.1 - Problema físico	53
Figura 4.2 - Vista frontal do TTXH.....	54
Figura 4.3 - Vista lateral do TTXH	54
Figura 4.4 - Vista frontal e isométrica do domínio fluido (HTF).....	55
Figura 4.5 - Vista frontal e isométrica do tubo intermediário	55
Figura 4.6 - Vista frontal e isométrica do tubo interno	56
Figura 4.7 - Domínio geométrico referente ao material de mudança de fase.....	56

Figura 4.8 - Domínios estudados e esquema de planos analisados	57
Figura 4.9 - Configurações de aletas	58
Figura 4.10 - Vista isométrica da malha utilizada para o TTHX	59
Figura 4.11 - Vista frontal da malha utilizada para o TTHX a) configuração 1 e b) configuração 2	60
Figura 4.12 - Detalhes da malha utilizada para o HTF	61
Figura 4.13 - Malha utilizada para o domínio do tubo intermediário a) configuração 1 e b) configuração 2.....	62
Figura 4.14 - Malha utilizada para o domínio do tubo interno a) configuração 1 e b) configuração 2..	63
Figura 4.15 - Malha utilizada para o domínio do PCM a) configuração 1 e b) configuração 2	64
Figura 4.16 - Fluxogramas dos métodos de solução segregada SIMPLE (a) a acoplada Coupled (b) ..	75
Figura 5.1 - Temperatura média a 100 mm da entrada	80
Figura 5.2 - Temperatura média a 100 mm da entrada do TTHX para diferentes passos de tempo	81
Figura 5.3 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para temperatura média do PCM a 100 mm da face entrada do TTHX- Processo de Fusão	82
Figura 5.4 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para temperatura média do PCM a 100mm da face entrada do TTHX- Processo de Solidificação.....	83
Figura 5.5 - Distribuição de Pressão no HTF	84
Figura 5.6 - Distribuição de velocidades para o HTF.....	85
Figura 5.7 - Linhas de corrente com níveis de velocidades nas vistas a) Isométrica b) Frontal c) Superior e d) Lateral	87
Figura 5.8 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 10% (785 s) do PCM fundido.....	89
Figura 5.9 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 50% (1885 s) do PCM fundido.....	90
Figura 5.10 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 80% (2915 s) do PCM fundido.....	91
Figura 5.11 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 100% (4375 s) do PCM fundido.....	92
Figura 5.12 - Distribuição de fração de líquido do PCM 10% (785 s) do seu volume fundido.....	93
Figura 5.13 - Distribuição de fração de líquido no do PCM para 50% (1885s) do seu volume fundido	95
Figura 5.14 - Distribuição de fração de líquido no do PCM para 80% (2915 s) do seu volume fundido	96
Figura 5.15 - Distribuição de fração de líquido no do PCM para 90% (3375 s) do seu volume fundido	97
Figura 5.16 - Distribuição de pressão no domínio PCM 10% (785 s) do seu volume fundido	99
Figura 5.17 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 50% (1885 s) do seu volume fundido..	100

Figura 5.18 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 80% (2915 s) do seu volume fundido..	101
Figura 5.19 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 100% (4375 s) do seu volume fundido	102
Figura 5.20 - Distribuição de velocidades no domínio PCM 10% (785 s) do seu volume fundido.....	103
Figura 5.21 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 50% (1885 s) do seu volume fundido	104
Figura 5.22 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 80% (2915 s) do seu volume fundido	105
Figura 5.23 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 100% (4375 s) do seu volume fundido	106
Figura 5.24 - Distribuições de temperaturas durante o tempo necessário para repelir o HHTF do TTHX	108
Figura 5.25 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 80% (4942 s) do PCM fundido.....	110
Figura 5.26 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 50% (6522 s) do PCM fundido.....	111
Figura 5.27 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 10% (10293 s) do PCM fundido.....	112
Figura 5.28 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 0% (14343 s) do PCM fundido.....	113
Figura 5.29 - Distribuição de fração de líquido no do PCM 90% (4942s) do seu volume fundido.....	114
Figura 5.30 - Distribuição de fração de líquido no PCM 80% (5272s) do seu volume fundido.....	116
Figura 5.31 - Distribuição de fração de líquido no do PCM 50% (6522s) do seu volume fundido.....	117
Figura 5.32 - Distribuição de fração de líquido no do PCM 10% (10293s) do seu volume fundido...	118
Figura 5.33 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 90 (4942 s), 80 (5272 s), 50 (6522 s) e 40% (7112 s) do seu volume fundido	119
Figura 5.34 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 30% (7852 s) do seu volume fundido..	120
Figura 5.35 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 20% (8862 s) do seu volume fundido..	121
Figura 5. 36 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 10% (10293 s) do seu volume fundido	122
Figura 5.37 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 90% (4942 s) do seu volume fundido	123
Figura 5.38 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 80% (5272 s) do seu volume fundido	124
Figura 5.39 Distribuição de velocidades no domínio PCM para 50% (6522 s) do seu volume fundido	125
Figura 5.40 Distribuição de velocidades no domínio PCM para 10% (10293 s) do seu volume fundido	126

Figura 5.41 - Temperatura média na fusão do PCM.....	127
Figura 5.42 Temperatura média na solidificação do PCM	128
Figura 5.43 Temperatura do fluido de aquecimento na saída do trocador de calor (Média na superfície)	129
Figura 5.44 - Temperatura média do fluido de resfriamento na saída do trocador de calor	130
Figura 5.45 - Fluxo térmico para as superfícies externa do tubo intermediário e interna do tubo interno, ao longo do processo de fusão.....	131
Figura 5.46 - Fluxo térmico para as superfícies externa do tubo intermediário e interna do tubo interno, ao longo do processo de solidificação.	132
Figura 5.47 - Fração média de líquido para diferentes seções do PCM ao longo do processo de fusão.	133
Figura 5.48 - Fração média de líquido para diferentes seções do PCM ao longo do processo de solidificação	134
Figura 5.49 - Energia térmica latente e sensível absorvida pelo PCM ao longo do processo de fusão.	134
Figura 5.50 - Energia térmica latente e sensível liberada pelo PCM ao longo do processo de solidificação.	135
Figura 5.51 - Temperatura média para as configurações 1 e 2.....	136
Figura 5.52 - Temperatura média na Saída do trocador.....	137
Figura 5.53 - Fluxos médios para configurações geométricas 1 e 2.	138
Figura 5.54 - Fração de líquido média ao longo do tempo.	139
Figura 5.55 - Energia acumulada durante processo de fusão	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades termo físicas das principais parafinas.....	29
Tabela 2.2 - Propriedades dos principais materiais utilizados para fabricação de aletas.....	33
Tabela 3.1 - Resumo de trabalhos que aplicam CFD em LHTES.....	52
Tabela 4.1 - Configurações geométricas estudadas.	58
Tabela 4.2 - Malhas construídas e parâmetros de qualidade de malha.....	61
Tabela 4.3 - Fatores de relaxação	78
Tabela 4.4 - Critérios de convergência utilizados.....	78
Tabela 4.5 - Propriedades físicas dos materiais	79
Tabela 4.6 - Casos estudados na pesquisa	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Condições de contorno	74
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras gregas

α	- Fator de amortecimento da viscosidade turbulenta	[-]
α_{∞}^* ,	- Constante do modelo de turbulência	[-]
β	Constante do modelo de turbulência	[-]
γ	- Condutividade térmica	[W/m.K]
γ_{eff}	- Condutividade térmica efetiva	[W/m.K]
γ_t	- Condutividade térmica turbulenta	[W/m.K]
Γ	- Difusividade efetiva	[m ² /s]
ε	- Taxa de dissipação energia cinética turbulenta do modelo k- ε	[W]
η	- Coeficiente de expansão térmica	[K ⁻¹]
θ	- Variável de modelo de turbulência	[-]
λ_x	- Constantes do modelo de turbulência	[-]
μ	- Viscosidade dinâmica	[Pa.s]
μ_t	- Viscosidade dinâmica turbulenta	[Pa.s]
μ_{eff}	- Viscosidade dinâmica efetiva	[Pa.s]
ζ	- Fator de relaxação	[-]
ξ^*	- Variável de modelo de turbulência	[-]
ω	- Taxa de dissipação energia cinética turbulenta do modelo k- ω	[W]
ρ	- Densidade	[kg/m ³]
ρ_s	- Densidade sólidos	[kg/m ³]
ρ_l	- Densidade líquidos	[kg/m ³]
σ	- Número de Prandtl	[-]
τ_{ij}	- Tensor de tensões de cisalhamento	[Pa.m/s ²]
Φ	- Variável de transporte genérica	[-]
φ_{Φ}	- Termo geral relativo as propriedades físicas características de cada equação de conservação.	[-]
ψ	- Fração de líquido	[-]

Letras latinas

\vec{A}_f	- Vetor área correspondente as faces do volume de controle	[m ²]
-------------	--	-------------------

c_p	- Calor específico a pressão constante	[kJ/kg.K]
c_n	- Posição dos centroides das células	[-]
D_ω	- Difusão cruzada	[-]
E	- Variável de energia	[J]
F_1, F_2	- Função de acoplamento entre os modelos k-e e k- ω	[-]
G	- Produção de energia	[J]
h	- Entalpia sensível	[J]
H	- Entalpia total	[J]
I	- Intensidade turbulenta imposta na condição de entrada de fluxo mássico	[%]
i	- Sub índice para componente vetores	[-]
j	- Sub índice para componente de vetores	[-]
k	- Energia cinética turbulenta	[J]
L	- Calor latente de fusão	[J/kg]
m	- Variável correspondente a numeração das células no domínio numérico	[-]
n	- Variável correspondente ao passo de tempo em um dado instante	[-]
P	- Variável para pressão	[Pa]
R	- Constante do modelo de turbulência	[-]
Re	- Número de Reynolds	[-]
Re_t	- Número de Reynolds turbulento	[-]
R_μ	- Razão de viscosidade turbulenta imposta na condição de entrada de fluxo mássico	[-]
S	- Magnitude da taxa e deformação de fluidos	[-]
t	- Variável de tempo	[s]
T	- Temperatura	[K]
T_s	- Temperatura de sólidos	[K]
T_l	- Temperatura de líquidos	[K]
u	- Variável para velocidade	[m/s]
V	- Volume	[m ³]
x	- Variável de posição	[m]
y	- Variável de posição	[m]
Y	- Dissipação de energia	[J]
W	- Termo fonte	[-]
z	- Variável de posição	[m]

Iniciais

HTF	- Fluido de troca térmica
HHTF	- Fluido de troca térmica quente
HP	- Tubo de calor
HX	- Trocador de calor
CFD	- Fluidodinâmica computacional
CHTF	- Fluido de troca térmica frio
PCM	- Material de mudança de fase
TTHX	- Tubo triplex de troca térmica
LHTES	- Sistemas de armazenamento de energia térmica via calor latente
PCMOW	- Material de mudança de fase nas paredes externas
PCMIW	- Material de mudança de fase nas paredes internas

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	19
1.0 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVO GERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.3 JUSTIFICATIVA	22
1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	22
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
CAPÍTULO II.....	24
2.1 LHTES via materiais de mudança de fase.....	24
2.2 Classificação dos materiais de mudança de fase	27
2.2.3 PCMs orgânicos.....	27
2.2.3.1 Parafinas	27
2.2.3.2 Materiais orgânicos não parafínicos	30
2.2.4 PCMs inorgânicos.....	30
2.2.4.1 Hidratos de sal	30
2.2.4.2 Composto inorgânico.....	30
2.2.4.3 Metais	31
2.2.5 PCMs eutéticos.....	31
2.3 Técnicas de melhoramento de sistemas de armazenamento de energia	31
2.3.1 Técnicas de intensificação da transferência de calor.....	32
2.3.1.1 Superfícies aletadas	32
2.3.1.1.1 Tubos triplex de troca térmica.....	34
2.3.1.2 Tubos de calor (<i>Heat pipe- HP</i>)	38
2.3.1.3 Múltiplos PCMs.....	39
2.3.2 Aumento da condutividade térmica.....	39
2.3.2.1 Composição com materiais de alta condutividade térmica.	40
2.3.2.2 Encapsulamento.....	40
2.3.2.2.1 Macroencapsulamento	41
2.3.2.2.1 Microencapsulamento.....	42
2.4 Aplicações	42
2.4.1 Aquecimento solar de água:	42
2.4.2 Aquecimento de ar por energia térmica solar:.....	43

2.4.3 Fornos solares	44
2.4.4 Estufas solares	45
2.4.5 Construções	45
CAPÍTULO III	47
3.1 Aplicações de CFD em sistemas de armazenamento de energia via calor latente	47
CAPÍTULO IV	53
4.1 Problema Físico	53
4.1.1 Configurações propostas.....	57
4.2 Malha numérica	58
4.2.1 Modelagem matemática.....	65
4.2.1.1 Modelagem Fluidodinâmica	65
4.2.1.1.1 Equações de conservação- <i>Reynolds Averaging Navier-Stokes</i> - <i>RANS</i>	65
4.2.1.1.2 Modelo de turbulência: <i>Shear-Stress Transport- k-ω SST</i>	66
4.2.1.2 Modelagem da transferência de calor	69
4.2.1.2.1 Convecção entre o HTF e as tubulações.....	69
4.2.1.2.2 Condução através das tubulações	70
4.2.1.2.2 Transferência de calor latente: Modelagem dos processos de Fusão-solidificação ..	71
4.2.2 Condições de Contorno	72
4.2.2.1 Fluxo mássico	72
4.2.2.2 Outflow	73
4.2.2.3 Condição de parede	73
4.2.3 Métodos de solução numérica	74
4.2.3.1 Acoplamento pressão velocidade	74
4.2.3.2 Discretização espacial.....	75
4.2.3.3 Discretização temporal	76
4.2.3.4 Estratégias de simulação.....	77
4.2.3.5 Fatores de Relaxação	77
4.2.3.6 Critérios de convergência	78
4.2.4 Propriedades Físicas	78
4.2.5 Casos estudados.....	79
CAPÍTULO V.....	80
5.0 Resultados e Discussões	80
5.1 Estudo de malha.....	80
5.2 Estudo de passo de tempo.....	81
5.3 Validação.....	82

5.4 Resultados qualitativos	83
5.4.1.1 Pressão no HTF	83
5.4.1.2 Velocidade no HTF	84
5.4.1.3 Processo de Fusão.....	88
5.4.1.3.1 Distribuição de temperaturas	88
5.4.1.3.2 Distribuição de fração de líquido.....	93
5.4.1.3.3 Distribuição de Pressão no PCM	98
5.4.1.3.4 Distribuição de velocidades no PCM	102
5.4.1.4 Processo de solidificação.....	107
5.4.1.4.1 Distribuição de temperaturas	107
5.4.1.4.1.1 Entrada do fluido frio (CHTF).....	107
5.4.1.4.1.2 Processo de solidificação do PCM	109
5.4.1.4.2 Distribuição de fração de líquido.....	114
5.4.1.4.3 Distribuição de Pressão no PCM	118
5.4.1.4.4 Distribuição de velocidades no PCM	122
5.5 Resultados quantitativos	126
5.5.1. Análise em configuração proposta	127
5.5.1.1 Temperatura.....	127
5.5.1.2 Fluxos	130
5.5.1.3 Fração de líquido média	132
5.5.1.4 Energia.....	134
5.5.2 Comparação entre as configurações analisadas.....	136
5.5.2.1 Temperatura média.....	136
5.5.2.2 Fluxos	138
5.5.2.3 Fração de líquido	139
5.5.2.4 Energia.....	140
CAPÍTULO VI	142
6.0 Conclusões.....	142
6.1 Considerações finais	143
6.2 Sugestões para pesquisas futuras	145
REFERÊNCIAS	146

CAPÍTULO I

Nesta seção, os objetivos a serem atingidos e os temas a serem abordados no decorrer da pesquisa foram introduzidos. Na sequência, uma justificativa para realização deste trabalho é apresentada junto com sua delimitação. Ao final, a estruturação do texto é descrita.

1.0 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país está intrinsecamente conectado com a demanda energética do mesmo e conseqüentemente, no decorrer do tempo, a escassez de fontes de energia, tem demandado estudos que viabilizem uma melhor utilização das fontes, ainda disponíveis ao ser humano.

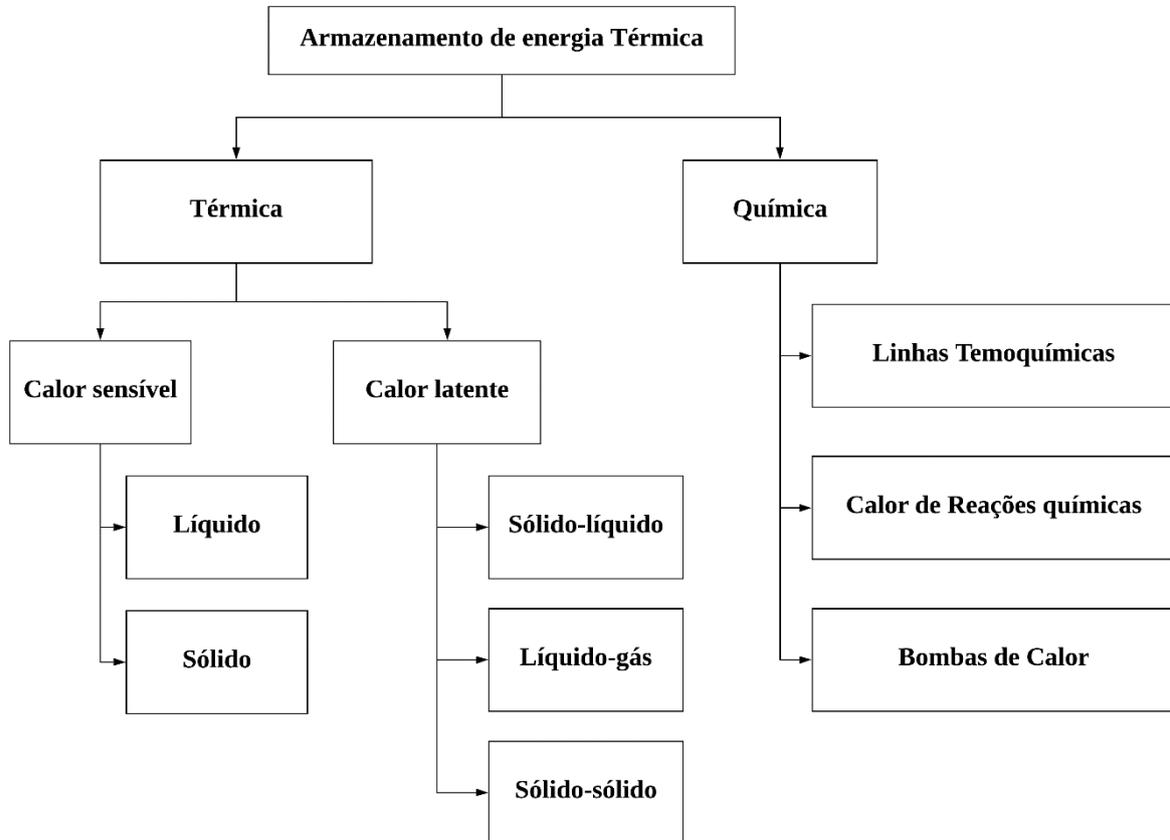
Do total da energia gerada nas plantas de potência, 70% é liberada para o meio ambiente na forma de calor (BAHRANI et al., 2017). Nas residências, a utilização de sistemas de aquecimento e resfriamento elevam o consumo de eletricidade, provocando picos que variam, consideravelmente, durante o dia e a noite. A escassez e a intermitência de fontes de energia renováveis, como a eólica e a solar, e a poluição produzida pela utilização de combustíveis, como petróleo, base fundamental da matriz energética mundial, exige uma busca por meios de otimização dos processos energéticos.

Neste sentido, o desenvolvimento de meios de armazenar energia, na sua forma térmica, apresenta-se como uma importante contribuição na busca por reduções entre a oferta e a demanda energética mundial, bem como, na busca por maior eficiência nos processos termodinâmicos. De acordo com a Figura 1.1, este armazenamento pode ocorrer das seguintes formas: Por meio do calor proveniente de reações químicas reversíveis, do calor sensível, que permite meios líquidos ou sólidos aumentarem sua energia interna, elevando a sua temperatura e do calor latente, característico da mudança de fase de alguns materiais, que quando submetidos a trocas térmicas, modificam o estado da matéria que os compõe, aumentando sua energia interna e mantendo sua temperatura, praticamente, constante.

O armazenamento de calor sensível possui facilidade de implementação por aquecimento ou resfriamento de substâncias, no entanto, a baixa capacidade de armazenamento térmico e o elevado peso ou volume necessários a este tipo de armazenamento, limitam as suas aplicações; O armazenamento de energia química, não tem sido constantemente aplicado na prática devido, tanto a questões técnicas, necessárias para sua aplicação, quanto a questões econômicas (ZHANG et al.,

2016). Portanto, destaca-se entre estas, o armazenamento na forma de calor latente, devido às elevadas taxas de transferência de calor associadas à volumes relativamente baixos, que este tipo de armazenamento é capaz de promover.

Figura 1.1 - Classificação dos meios de armazenamento de energia térmica.



Fonte: SHARMA et al. (2009).

Neste âmbito, observa-se a característica de determinados materiais de absorver ou liberar grandes montantes de energia, em determinados períodos de tempo e sob condições específicas de operação. Estes são denominados Materiais de Mudança de Fase (*Phase Change Materials-PCMs*), capazes de armazenar de 5 a 14 vezes mais energia por unidade de volume, que os materiais que armazenam energia via calor sensível, como água, concreto ou rochas, e apresentar temperaturas específicas de mudança de fase que tendem a permanecer constantes, durante a transformação da matéria (SHARMA & CHEN, 2009).

Dependendo do tipo de PCM, o processo de armazenamento pode ser descrito por uma mudança entre as fases sólido-sólido (mudanças na estrutura cristalina de um material, que caracteriza o armazenamento ou liberação de energia), sólido-líquido, líquido-gás ou sólido-gás. No entanto, as transformações líquido-gás e sólido-gás não são aplicadas em materiais de construção,

devido a suas elevadas variações de volume e pressão, durante os processos de mudança de fase. Transformações do tipo sólido-sólido, são limitadas devido à dificuldade de mistura com outros materiais de construção, como cimento e gesso. Assim sendo, os PCMs de transformação sólido-líquido são mais empregados em sistemas de armazenamento térmico latente (SU et al., 2015).

Desta forma, existem vários fatores que influenciam a aplicabilidade de PCMs do tipo sólido-líquido. No lado energético, os PCMs devem ter temperaturas de transição de fase adequadas, elevados valores de calor latente por unidade de peso, elevadas condutividade e capacidade térmica. No lado físico, devem possuir uma fase de equilíbrio favorável à sua aplicação, elevada densidade, mínima variação de volume durante a transição de fase, e baixa pressão de vapor na temperatura de operação. No aspecto químico, devem possuir pouco ou nenhum sub-resfriamento durante a solidificação, taxa de cristalização suficiente, fusão e solidificação na mesma temperatura e separação de fases. Também devem possuir propriedades químicas capazes de completar os ciclos de fusão/solidificação, elevada estabilidade química, compatibilidade com outros materiais, não apresentar degradação após um longo período de ciclos térmicos, não devem ser corrosivos, tóxicos ou inflamáveis (SU et al., 2015).

Dentre as dificuldades mencionadas, destacam-se a baixa condutividade térmica, a qual dificulta a transferência de calor, fundamental à utilização destes materiais. Para solucionar este problema duas medidas principais tem sido propostas: A construção de sistemas de intensificação do fluxo térmico (trocadores de calor com superfícies aletadas, aplicação de tubos de calor e utilização de múltiplos PCMs, com diferentes pontos de fusão) e as técnicas de aumento de condutividade térmica dos PCM (manufatura de materiais compósitos, entre PCMs e materiais de elevada condutividade térmica e encapsulamento).

Neste sentido, observa-se a necessidade de estudos que possibilitem o correto entendimento do comportamento desses materiais, nas mais diversas aplicações. Sistemas de armazenamento de energia solar para aquecimento de água ou de ar, para manutenção de temperaturas em estufas ou em construções civis, além de sistemas que reaproveitam o calor derivado de ciclos de potência ou do funcionamento de aparelhos elétricos, são alguns casos em que os materiais de mudança de fase podem ser utilizados como capacitores de energia térmica. Dada as condições de operação de um sistema termodinâmico, o armazenamento de energia, via material de mudança de fase, deve ser projetado para operar com máxima eficiência durante os ciclos térmicos do sistema referido.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estudar os processos de fusão e solidificação de um PCM, aplicado em um sistema de armazenamento de energia térmica via Fluidodinâmica Computacional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para que o objetivo geral seja alcançado, faz-se necessários que os seguintes objetivos específicos sejam atendidos:

- Apresentar uma modelagem matemática tridimensional, capaz de prever o comportamento do PCM nas transições de fase sólido-líquido;
- Avaliar as distribuições de temperatura, fração de líquido e quantidade de energia, absorvida ou liberada pelo PCM, sob condições fixas de operação.
- Analisar a influência de variáveis geométricas do sistema de armazenamento, na performance térmica do material;

1.3 JUSTIFICATIVA

Dada as limitações apresentadas para aplicação dos PCMs de transição sólido-líquido, observa-se a necessidade de um correto entendimento, quanto ao comportamento desses materiais, quando empregados em sistemas de armazenamento de energia térmica, que funcionam através da interação dos mesmos, com estruturas metálicas de elevada condutividade térmica. Os trabalhos numéricos apresentados na literatura, estão em grande parte limitados a geometrias 1 e 2d, o que restringem a sua comparação com resultados experimentais, que tratam o problema em três dimensões. A análise dos modelos numéricos de mudança de fase, associado a modelos de transferência de calor e modelos de turbulência, necessários para descrever o sistema de armazenamento de energia térmica, ainda é escassa, dada a elevada complexidade dos mesmos. Desta forma, os resultados apresentados neste trabalho, podem nortear a construção de sistemas de armazenamento de energia utilizando PCMs e, de acordo com os parâmetros de operação variados nesta pesquisa, é possível estabelecer critérios para aplicação do mesmo, sob condições de operação específicas.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa estuda os ciclos de transição sólido-líquido de um PCM, tendo em vista o armazenamento e a liberação de energia térmica que ocorrem durante esses ciclos. A mesma foi realizada em âmbito numérico, usando o pacote ANSYS release 15.07. Modelos matemáticos e métodos numéricos são aplicados para descrição dos aspectos fluidodinâmicos e térmicos associados ao armazenamento de energia via calor latente. Os resultados apresentados são

comparados com resultados experimentais reportados na literatura e as condições de operação são propostas de acordo com os mesmos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos:

No Capítulo I o problema é abordado de forma introdutória, definindo-se os objetivos: geral e específico, a justificativa, delimitações para o desenvolvimento da pesquisa e a estruturação do trabalho, de uma forma geral.

No Capítulo II tem-se a revisão da literatura, onde buscou-se nas obras especializadas informações sobre sistemas de armazenamento de energia térmica via materiais de mudança de fase: conceitos fundamentais, classes, aplicações, limitações e técnicas de operação.

No Capítulo III é realizado um estudo sobre a utilização de simulação numérica computacional (*Computational Fluid Dynamic*- CFD), no estudo dos materiais de mudança de fase.

O Capítulo IV trata da metodologia utilizada quanto a descrição do problema físico a ser estudado, das malhas utilizadas, dos modelos matemáticos e numéricos, das propriedades físicas dos materiais analisados, das condições iniciais e de contorno do problema e, por fim, uma descrição dos casos estudados.

O Capítulo V se destina a apresentar e discutir os resultados obtidos a partir dos procedimentos metodológicos estabelecidos.

No Capítulo VI apresentam-se as conclusões obtidas no presente estudo e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, seguem-se as referências que fundamentaram esta pesquisa.

CAPÍTULO II

O objetivo deste capítulo é realizar uma fundamentação teórica envolvendo o tema: Sistemas de armazenamento de energia térmica via calor latente (*Latent Heating Thermal Energy Storage-LHTES*). Apresenta-se conceitos fundamentais a respeito da caracterização dos PCMs e dos métodos utilizados para melhorar o fluxo de calor através dos mesmos. Além disso, descreve-se algumas aplicações dos LHTES.

2.1 LHTES via materiais de mudança de fase

Ao longo dos últimos 36 anos, o armazenamento de energia térmica através da transformação de fases dos materiais, tem sido um importante tópico, tratado em pesquisas, no âmbito global. Trabalhos como Abhat (1983) e Lane (1983) foram pioneiros em estudar a capacidade de diversos materiais de absorver e liberar grandes montantes de energia em determinados períodos de tempo e sob condições específicas de operação.

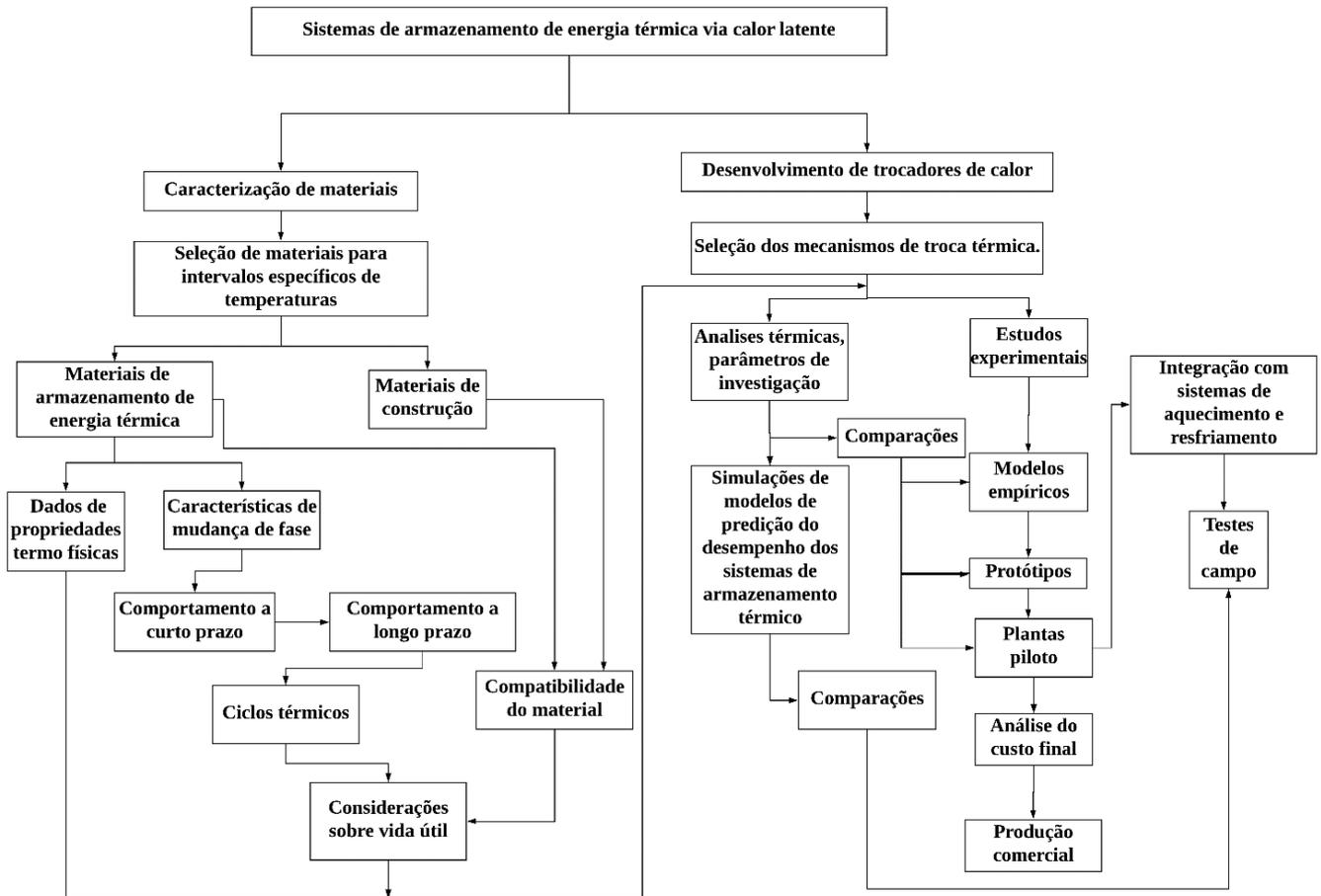
A Figura 2.1, ilustra esquematicamente um fluxograma com as etapas no desenvolvimento dos LHTES construídos com PCM, as quais são temas de pesquisas que se desenvolvem na área de materiais e dos fenômenos dos transportes. Pode-se constatar que, para uma dada aplicação, um LHTES deve ser construído a partir de dois seguimentos fundamentais: (1) A Definição do material que se adequa as condições de operação em que se pretende armazenar energia. Neste sentido, tem-se os estudos voltados a caracterização dos PCMs e dos demais materiais componentes, utilizados na construção do sistema de armazenamento térmico (ABHAT, 1983; LANE, 1983; ZALBA et al., 2003; SHARMA & CHEN, 2009; COSTA, 2014; SHARMA et al., 2015; ZHANG et al., 2016).

Para tanto, são analisadas as propriedades termofísicas, a compatibilidade entre os PCMs e os materiais de construção e o comportamento dos mesmos ao longo dos ciclos de carga e descarga do LHTES, levando em conta questões acerca da vida útil dos componentes do sistema. (2) Partindo dos resultados que caracterizam os materiais envolvidos, o desenvolvimento de trocadores de calor que utilizem, com máxima eficiência, as propriedades dos materiais de mudança de fase (GARCÍA-VALLADARES, 2004; LI et al., 2012; LIU et al., 2012; AL-ABIDI et al., 2013; KARTHIKEYAN et al., 2014; TRISTÃO, 2014; LI & WU, 2015; ESAPOUR et al., 2016; XU et al., 2016; BAHRANI et al., 2017).

Neste âmbito, analisa-se questões acerca dos modos de transferência de calor (difusão, convecção e radiação) que estão envolvidos no sistema de armazenamento, são determinados

parâmetros de investigação que descrevem os aspectos térmicos e fluidodinâmicos, como números de Reynolds (Re) e Nusselt (Nu), realizam-se simulações, determina-se modelos empíricos através de experimentos, desenvolve-se protótipos e plantas piloto, que são testados e tem seus custos avaliados.

Figura 2.1 - Fluxograma das várias etapas estudadas no desenvolvimento de materiais de mudança de fase.

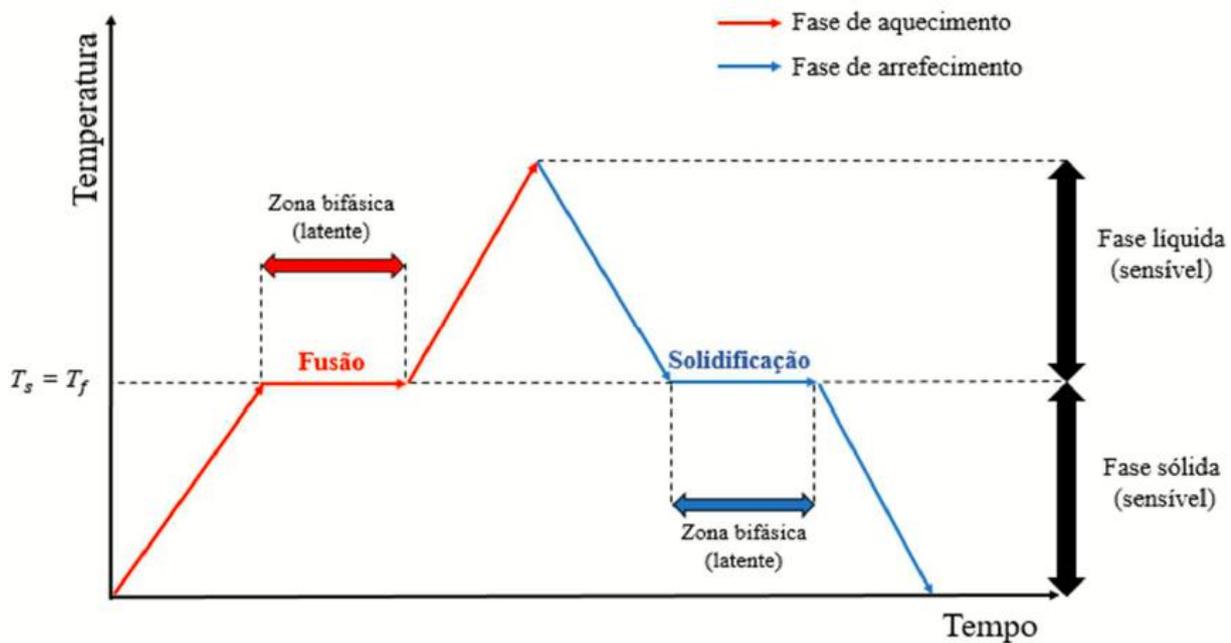


Fonte: Adaptado de Abhat (1983).

O ciclo de funcionamento de um PCM de transição sólido-líquido é ilustrado na Figura 2.2. Observa-se que o mesmo se divide em dois períodos distintos, a fase de aquecimento ou carregamento e a fase de arrefecimento ou descarga. Durante os períodos em que o sistema estiver recebendo calor de uma dada fonte térmica, o material é aquecido e, atingindo a temperatura de fusão, o mesmo é caracterizado por uma zona bifásica sólido-líquido, que é ultrapassada quando, em sua totalidade, o material atinge o estado líquido. A partir de então, o PCM é aquecido via calor sensível. Quando a alimentação de energia do sistema é cortada, inicia-se o processo de descarga do material. Neste período, é o PCM que deve funcionar como a fonte de energia do sistema,

resfriando-se até atingir sua temperatura de fusão, passar pela zona bifásica e, ao final do processo de solidificação, retornar a temperatura inicial do sistema (ANTUNES, 2016).

Figura 2.2 - Funcionamento de um material de mudança de fase durante o ciclo de carga e descarga.



Fonte: Antunes (2016).

De acordo com Zalba et al. (2003), o armazenamento de energia térmica, através dos materiais de mudança de fase, apresenta-se como solução para questões essenciais, na busca pelo aumento de eficiência energética de sistemas termodinâmicos, a saber, o atraso entre a disponibilidade de energia e o seu consumo em sistemas receptores (energia solar e sistemas de cogeração), a garantia de energia em setores essenciais, como hospitais, a inércia e a proteção térmica. No primeiro caso, os PCMs podem ser associados a plantas de absorção de energia solar ou a sistemas de potência, que perdem energia térmica para o ambiente, na forma de calor. Durante os períodos em que a energia solar térmica estiver disponível, o material de mudança de fase passa a ser carregado.

No caso dos sistemas de cogeração, isso ocorreria quando o sistema estivesse liberando calor para o PCM. Nos momentos em que a energia solar não estiver disponível ou estiver abaixo das quantidades desejadas, o PCM passaria a liberar energia para o sistema. O mesmo aconteceria quando, nos sistemas de cogeração, a energia armazenada fosse direcionada ao incremento da potência do mesmo. No segundo caso, os materiais de mudança de fase serviriam como fontes de

reserva de energia térmica, para sistemas que precisam ter sua temperatura controlada e o fazem através de fontes de energia sujeitas a intermitência, como a solar ou a elétrica. Através de interações térmicas com estes sistemas, a energia armazenada nos PCMs pode ser utilizada para garantir o atendimento das suas demandas energéticas. Por fim, os materiais de mudança de fase podem ser utilizados tanto para isolar, quanto para controlar a temperatura de determinados ambientes, como estufas ou residências, que estão sujeitos a variações nas condições térmicas, externas aos mesmos. Durante dias ensolarados, os PCMs podem ser carregados, através de coletores solares e essa energia pode ser liberada para estes ambientes nos períodos de baixas temperaturas, como durante a noite e também podem funcionar como isolantes térmicos, com maior capacidade que os materiais destinados a essa função, que utilizam calor sensível para tal.

2.2 Classificação dos materiais de mudança de fase

Como representado na Figura 2.3, os PCMs são subdivididos em orgânicos, inorgânicos e eutéticos, sendo os orgânicos, subdivididos em parafinas e não-parafinas (ácidos graxos, álcoois e glicóis); os inorgânicos, por sua vez, são separados em hidratos de sal, compostos orgânicos e metais; os eutéticos representam as misturas que podem ocorrer entre os PCMS, sendo estes orgânicos ou inorgânicos.

2.2.3 PCMs orgânicos

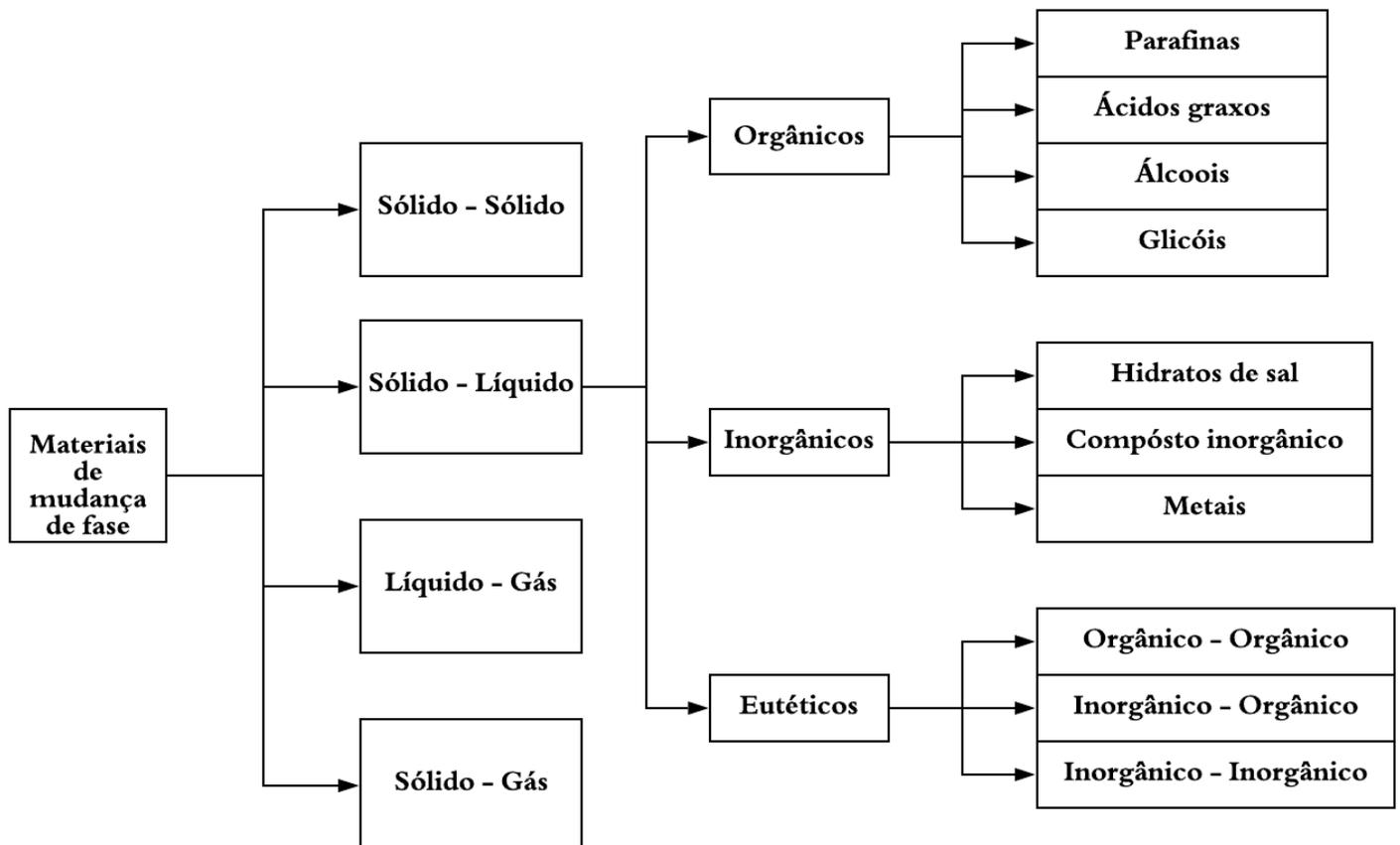
Os materiais orgânicos, subdivididos em parafinas e não parafinas; não são corrosivos, apresentam baixo ou nenhum sub-resfriamento, são quimicamente e termicamente estáveis, ao ponto de sofrer vários ciclos de fusão e solidificação sem apresentarem segregação, o que representa uma degradação do calor latente do material. Por outro lado, estes PCMs apresentam baixa condutividade térmica e são inflamáveis (ZALBA et al., 2003; SHARMA et al., 2009; SHARMA et al., 2015; SU et al., 2015).

2.2.3.1 Parafinas

As parafinas pertencem a família dos hidrocarbonetos saturados (n-alcenos de cadeia linear), que são representados pela fórmula química C_nH_{2n+2} , podendo o número de átomos de carbono variar entre 20 e 40. Dependendo do comprimento da cadeia do alceno, as parafinas podem ser de cadeia igual (n-parafina) ou de cadeia ímpar (iso-parafina). À medida que número de átomos de carbono é acrescido, a temperatura de fusão aumenta e uma maior quantidade de calor latente é

necessária para promover a transição de fase desses materiais, o que ocorre devido a elevada atração dipolar induzida, existente entre as cadeias n-alcenos. As parafinas são capazes de armazenar e liberar uma grande quantidade de calor e suportar um grande número de ciclos de mudança de fase; são excelentes materiais para armazenamento de energia, possuindo calores específicos que variam entre 2,1 - 2,21(kJ/kg.K), condutividade térmica entre 0,132 - 0,346 (W/m.K) e calor latente de fusão entre 147 - 266 kJ/k, como apresentado na Tabela 2.1, que ilustra as principais parafinas, com potencial para aplicação como material de mudança de fase; não apresentam segregação de fase, mesmo após muitos ciclos de transição, são quimicamente inertes, não corrosivas, incolores, duráveis, baratas, disponíveis abundantemente, ecologicamente inofensivas e não tóxicas. No entanto, as parafinas possuem baixa condutividade térmica e são propensas a vazamentos quando no estado líquido (HIMRAN et al., 1994).

Figura 2.3 - Classificação dos PCMs



Fonte: Su et al. (2015)

Tabela 2.1 - Propriedades termo físicas das principais parafinas.

Parafina	Temperatura de Fusão (°C)	H _f (kJ/kg)	C _p (kJ/kg.K)	K (W/m.K)	ρ (kg/m ³)
Decano	-29,65	202	-	-	726 (l)
Uno decano	-25,60	177	-	-	737 (l)
Duo decano	-9,60	216	-	-	745 (l)
Tri decano	-5,40	196	2,21 (l)	-	753 (l)
Parafina C14	4,50	165	-	-	-
Tetro decano	5,50	227	2,07 (s)	0,15	825 (s)
Parafina C15-C16	8,00	153	2,2 (s)	-	-
Parafina C16-C18	20-22	152	-	-	-
Parafina C13-C14	22-24	189	2,1	0,21	790(l) 900(s)
Parafina C18	28,00	244	2,16	0,15	814
Nono decano	32,00	222	-	-	785
Icosano	36,60	247	-	-	788
Heneicosano	40,20	213	-	-	791
Parafina C20-C33	48-50	189	2,1	0,21	769(l) 912(s)
Parafina C22-C45	58-60	189	2,1	0,21	795 (l) 920(s)
1-Tetradecanol	38	205	-	-	825
Parafina C23-C45	62-64	189	2,1	0,21	0,915
Cera de parafina	64	173,6	-	0,167 (l)	790(l)
		266	-	0,346 (s)	916(s)
Parafina C21-C50	66-68	189	-	0,21	830(l) 930(s)
Bifenilo	71	119,2	-	-	994(l) 1166(s)
Propionamida	79	168,2	-	-	-
Naftaleno	80	147,7	2,8	0,132 (l) 0,341(s) 0,310(s)	976(l) 1145(s)
Tetradecano + octano	-4,02-2,1	227,52	-	-	-
91,67 % de tetro decano + 8,33% de hexa decano	1,70	156,2	-	-	-
Tetradecano + Docosano	1,5-5,6	234,33	-	-	-
Misturas de parafinas (n=14-16)	5-6	152	-	-	783(s)
Misturas de parafinas (n=15-16)	8	147-153	-	-	751,6
Misturas de parafinas (n=16-18)	20 - 22	152	-	-	-
Octadecano + heneicosano	25,8 -26	193,93	-	-	-
Octadecano + docosano	25,5 - 27	203,8	-	-	-

Fonte: Sharma et al. (2015)

2.2.3.2 Materiais orgânicos não parafínicos

Materiais como ésteres, ácidos graxos, álcoois e glicóis, também podem ser utilizados para armazenamento de energia via calor latente, especialmente os ácidos graxos. No entanto, são materiais inflamáveis e, não devendo ser expostos a temperaturas excessivamente altas, chamas ou agentes oxidantes, possuem alto calor latente de fusão e inflamabilidade, apresentam baixa condutividade térmica e ponto de inflamação, variação no nível de toxicidade e instabilidade em altas temperaturas (SU et al., 2015).

2.2.4 PCMs inorgânicos

Os materiais inorgânicos de mudança de fase são classificados em hidratos de sal, metais e compostos inorgânicos. Estes PCMs, cobrem uma ampla faixa de temperaturas de operação e, devido a sua alta densidade, as entalpias de fusão, para um dado volume, são maiores, em comparação com os materiais orgânicos. Sua principal desvantagem é a reatividade com metais, podendo ter níveis severos de corrosão sendo desenvolvidos, em algumas combinações de metal com PCM.

2.2.4.1 Hidratos de sal

Os hidratos de sal, caracterizados pela fórmula química M_nH_2O , onde M é um composto inorgânico, formam uma classe importante de substâncias armazenadoras de calor, devido à sua alta densidade volumétrica de calor latente de fusão. O maior problema no uso de hidratos de sal como PCMs é que a maioria deles se fundem incongruentemente, isto é, fundem-se uma fase aquosa saturada e a uma fase sólida que é geralmente um hidrato inferior do mesmo sal. Devido às diferenças de densidade, a fase sólida se deposita no fundo do recipiente, um fenômeno chamado de decomposição. A menos que sejam tomadas medidas especiais, este fenômeno é irreversível, isto é, durante a solidificação, a fase sólida não se combina com a solução saturada para formar o hidrato de sal original (ABHAT, 1983).

2.2.4.2 Composto inorgânico

Os compostos inorgânicos de mudança de fase são combinações dos materiais inorgânicos que podem ser utilizados como PCMs. Entre eles pode-se citar a água (H_2O), o oxiclreto de fósforo ($POCl_3$), o ácido fosfórico (H_3PO_4) e o nitrato de potássio (KNO_3). Tratando-se da sua aplicação em materiais de construção civil, vários destes materiais são desconsiderados quanto a aplicação como PCMs devido à sua capacidade térmica de calor latente ser relativamente pequena. Além disso,

muitos dos compostos inorgânicos de PCMs são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana (SU et al., 2015)

2.2.4.3 Metais

Os metais com baixo ponto de fusão e suas ligas, podem ser usados como materiais de armazenamento de energia térmica. Esses metais têm alta condutividade térmica, boa condutividade elétrica, baixa pressão de vapor, baixo calor de fusão por unidade de peso, mas alto calor de fusão por unidade de volume e apresentam pequena alteração de volume, durante a transição de fase. Assim, se certo metal ou liga de metal é usado como um PCM, a capacidade de transferência de calor do sistema, será melhorada significativamente, em comparação com as demais classes desses materiais (GE et al., 2013). Esses materiais ainda não são utilizados intensivamente para a tecnologia PCM, devido aos seus elevados pesos. No entanto, quando o volume ocupado pelo PCM é uma limitação de projeto, eles são candidatos prováveis devido ao alto calor de fusão por unidade de volume que os mesmos apresentam.

2.2.5 PCMs eutéticos

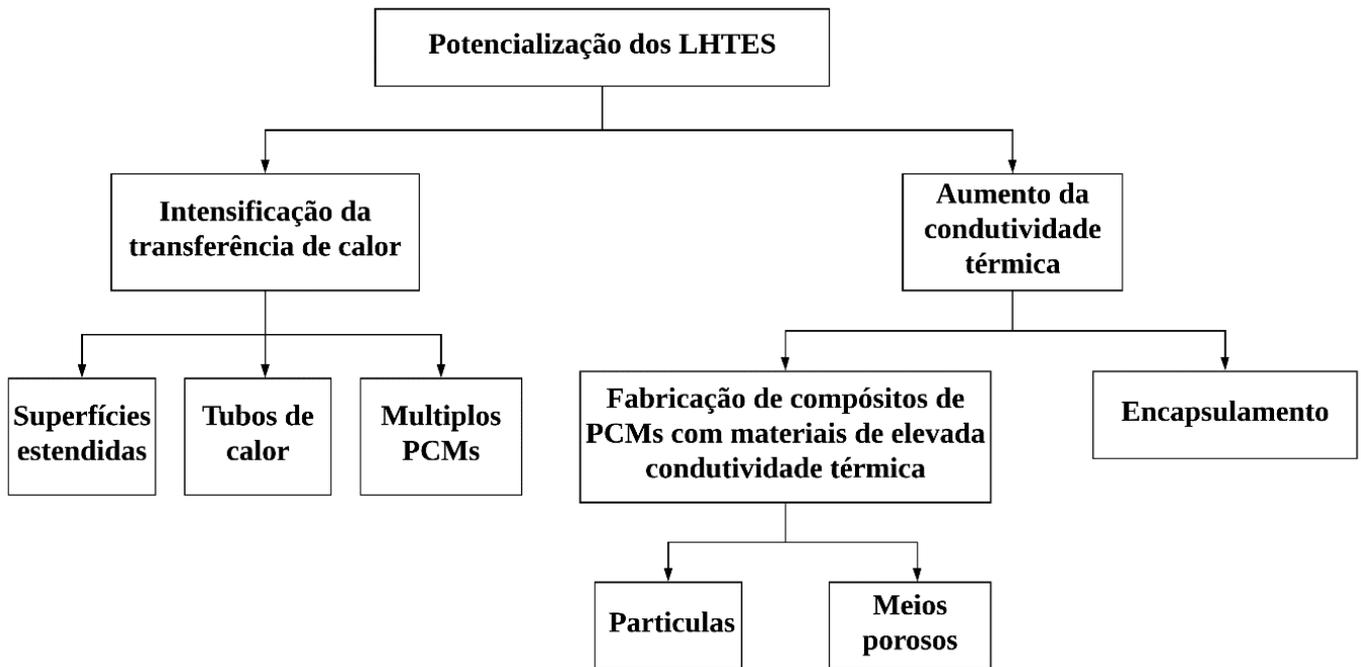
Um eutético é uma composição de fusão mínima de dois ou mais componentes, cada um dos quais, derrete e congela congruentemente formando uma mistura dos cristais componentes durante a solidificação. Materiais eutéticos, quase sempre derretem e congelam sem segregação, uma vez que eles possuem uma íntima mistura de cristais, deixando pouca oportunidade para os componentes se separarem. Ao fundir, ambos os componentes liquefazem simultaneamente, novamente com a separação improvável (SHARMA et al., 2009). A principal vantagem dos eutéticos, em relação a outros tipos de PCMs é que seus pontos de fusão podem ser ajustados, pela combinação de diferentes porcentagens dos PCMs componentes. Por exemplo, o tetradecano pode ser combinado com octadecano, docosano e hexadecano para atingir uma faixa de temperatura de fusão de 1,5 a 5,61 °C. Os eutéticos também possuem alta condutividade térmica e densidade e não experimentam super-resfriamento. No entanto, as capacidades de calor latente e específico, são muito menores do que os hidratos de sal e as parafinas (SU et al., 2015).

2.3 Técnicas de melhoramento de sistemas de armazenamento de energia

Para que o processo de armazenamento de energia ocorra, de maneira eficiente, o material de mudança de fase deve ser projetado para absorver ou liberar o máximo de energia, dentro do intervalo de tempo, em que estiver sendo carregado ou descarregado. Desta forma, a menos dos metais, a baixa condutividade térmica dos PCMs se caracteriza como um limitante para aplicação

destes, em sistemas de armazenamento térmico. Neste sentido, várias pesquisas tem sido realizadas com o intuito de desenvolver técnicas para aumentar o fluxo de calor para ou dos PCMs durante os processos de armazenamento e liberação de energia (HASNAIN, 1998; SHARMA et al., 2000; PENG et al., 2004; LIU et al., 2016; IBRAHIM et al., 2017; LIN et al., 2018).

Figura 2.4 - Técnicas de potencialização dos LHTES.



Fonte: Adaptado de Ibrahim et al. (2017) e Lin et al. (2018)

De acordo com a Figura 2.4, as técnicas de melhoria dos LHTES são subdivididas entre as destinadas a aumentar a transferência de calor nestes sistemas e as destinadas a aumentar a condutividade térmica dos PCMs.

2.3.1 Técnicas de intensificação da transferência de calor

A baixa condutividade dos PCMs é caracterizada por pouca transferência de calor, entre estes e o fluido de troca térmica, dos sistemas de armazenamento. Desta forma, técnicas têm sido utilizadas, de modo a promover intensificações, no fluxo térmico destes sistemas.

2.3.1.1 Superfícies aletadas

A utilização de superfícies estendidas, é feita com o intuito de aumentar a área de interação entre os PCMs e a fonte de carga ou descarga, associada ao mesmo. Estruturas delgadas, se

estendem, a partir das paredes que confinam o material de mudança de fase, de modo a aumentar as frentes de troca térmica, intensificando o processo transferência de calor, nos sistemas de armazenamento. Várias pesquisas tem sido desenvolvidas com objetivo de determinar a influência do formato e dos tipos de materiais das aletas, utilizadas para intensificar os processos de fusão-solidificação dos PCMs (AL-ABIDI et al., 2013; JMAL & BACCAR, 2015; PIZZOLATO et al., 2017; ABDULATEEF et al., 2018).

A seleção do material da aleta deve atender as necessidades de condutividade térmica, densidade, custo e potencial de corrosão existentes no projeto do LHTES (LIU et al., 2012). A Tabela 2.2 descreve os principais materiais utilizados como superfícies estendidas. Contata-se que, o cobre é o material com maior potencial condutivo, mas possui as mais altas densidades e custos de produção; o grafite é o material mais leve, fica na quarta posição, em relação a condutividade térmica e na segunda, no quesito custo de produção; o alumínio é material com menor custo de produção, é o segundo mais leve e apresenta a terceira maior condutividade térmica.

Tabela 2.2 - Propriedades dos principais materiais utilizados para fabricação de aletas.

	Grafite	Alumínio	Aço inoxidável	Aço carbono	Cobre
k (W/m.K)	150	200	20	30	350
ρ (kg/m ³)	1000	2700	7800	7800	8800
Custo (\$/m ³)	10000	7000	20000	15000	40000

Fonte: Liu et al. (2012).

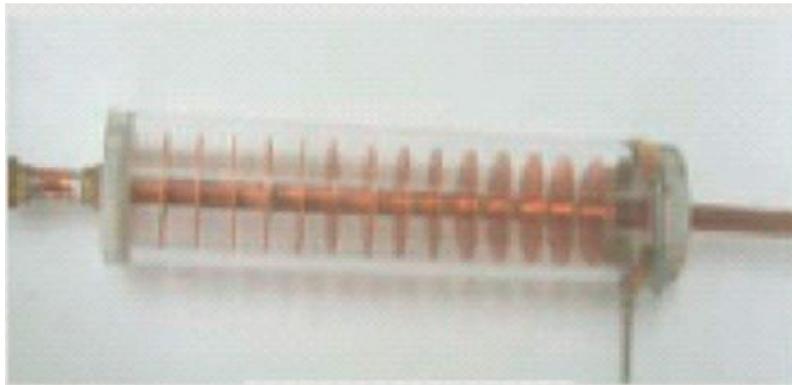
Os problemas que envolvem superfícies estendidas nos LHTES, estão subdivididos em duas áreas: Aqueles que utilizam um fluido de troca térmica (HTF) para aquecer ou resfriar os PCMs, utilizados em aquecedores solares de água ou ar, e aqueles que não utilizam o HTF e os PCMs funcionam como reservatórios dissipadores de calor, utilizados para resfriar sistemas aquecidos, como aparelhos eletrônicos. Nesses casos as aletas estão localizadas dentro da estrutura do PCM como apresentado na Figura 2.5. Esse *container* com aletas piniformes de seção quadrada, é preenchido com PCM e posto em contato com as superfícies aquecidas de equipamentos eletrônicos. Já nos casos em que se utiliza o HTF, as aletas estão no lado do fluido de menor condutividade térmica, que na maioria das vezes é o PCM, como ilustrado na Figura 2.6. Neste caso, aletas radiais estão dispostas na região compreendida por dois tubos concêntricos, o tubo externo de acrílico e o interno de bronze. O restante do volume, compreendido entre os tubos, é preenchido com PCM ficando o mesmo em contato direto com as superfícies aletadas e a superfície externa do tubo interno, por meio do qual passará o fluido de troca térmica.

Figura 2.5 - *Container* com aletas pineiformes de base quadrada utilizado para resfriar aparelhos eletrônicos.



Fonte: Arshad et al. (2017).

Figura 2.6 - *Container* anular com aletas radiais de cobre utilizado para armazenar energia.

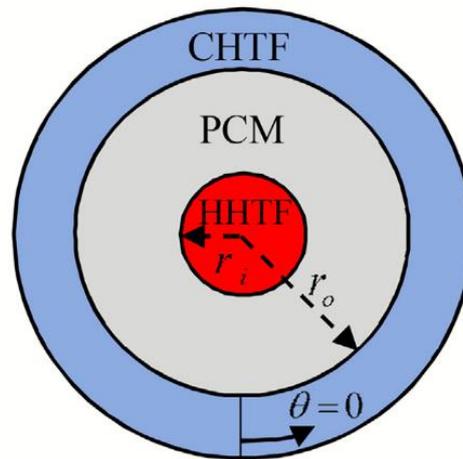


Fonte: Al-Abidi et al. (2012).

2.3.1.1.1 Tubos triplex de troca térmica

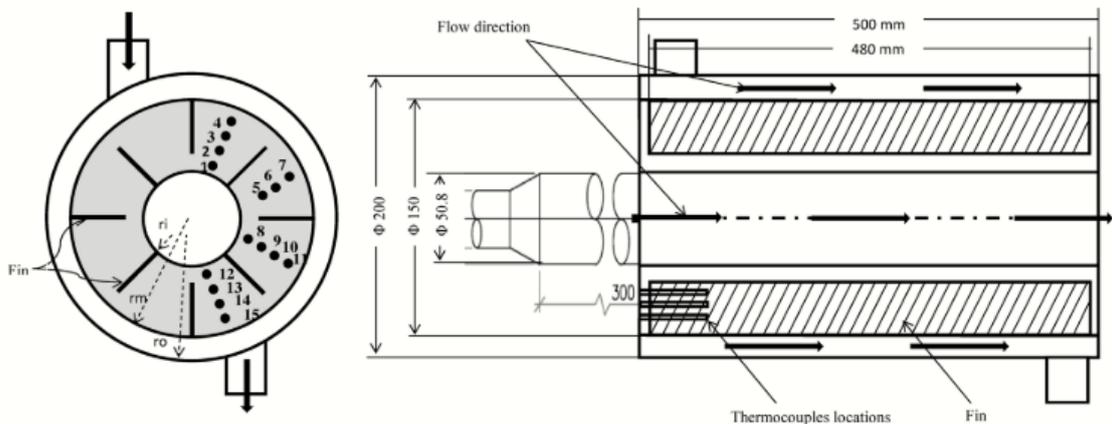
Os trocadores de calor do tipo tubo-triplex (Triplex tube heat exchangers-TTHX) são aplicados nas indústrias farmacêutica, alimentícia e de bebidas (GARCÍA-VALLADARES, 2004). Esses trocadores de calor são construídos com três tubos concêntricos (interno, intermediário e externo).

Figura 2.7 - Esquema ilustrativo de um TTHX



Fonte: Mastani Joybari et al. (2017)

Figura 2.8 - TTHX com aletas longitudinais.

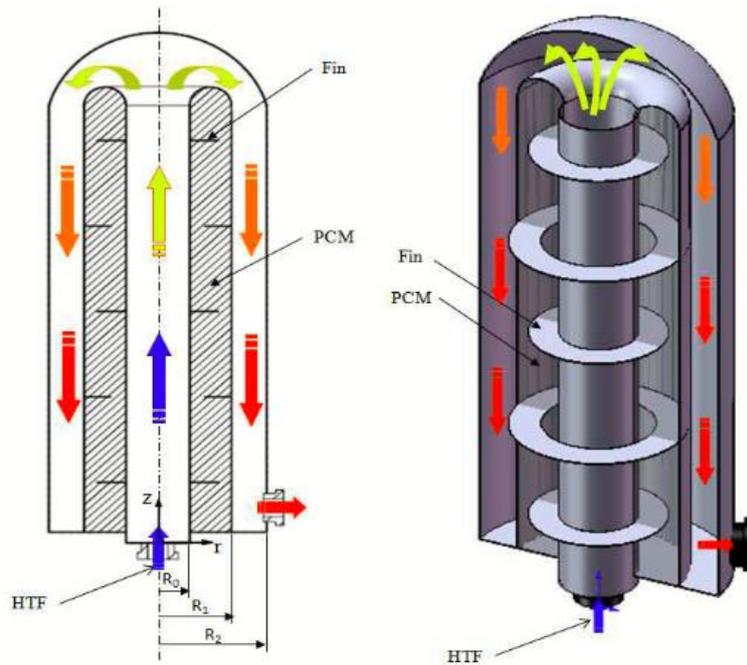


Fonte: Al-Abidi et al.(2014)

No trocador, esquematicamente ilustrado na Figura 2.8, através do volume anular, compreendido entre os tubos externo e intermediário, escoia um fluido de troca térmica de resfriamento (*Cold Heat Transfer Fluid-CHTF*), através do volume, compreendido pelo tubo interno, escoia um fluido de troca térmica de aquecimento (*Hot Heat Transfer Fluid-HHTF*) e confinado no volume anular, compreendido entre os tubos intermediário e interno, encontra-se o PCM, que continuamente armazena energia térmica proveniente do HHTF e libera essa energia para o CHTF, passando pelo processo de solidificação por um lado e pelo processo de fusão no outro. Nas Figuras 2.8 e 2.9, observa-se os casos em que as superfícies, externa do tubo interno e interna do tubo intermediário, são aletadas para aumentar o fluxo térmico entre o PCM e o HTF. Nestes

casos, os processos de carga e descarga do PCM ocorrem em períodos distintos: Durante o processo de carregamento, o HHTF adentra em um sistema de tubulações, que permite ao mesmo aquecer o PCM, trocando calor por convecção a partir das superfícies interna do tubo interno e externa do tubo intermediário, com auxílio das aletas, fabricadas com material de elevada condutividade térmica. Ao final do processo de fusão, inicia-se o processo de descarga, injetando-se o CTHF no trocador de calor, onde o PCM é levado ao estado sólido, liberando energia para LHTES.

Figura 2.9 - TTHX com aletas radiais.

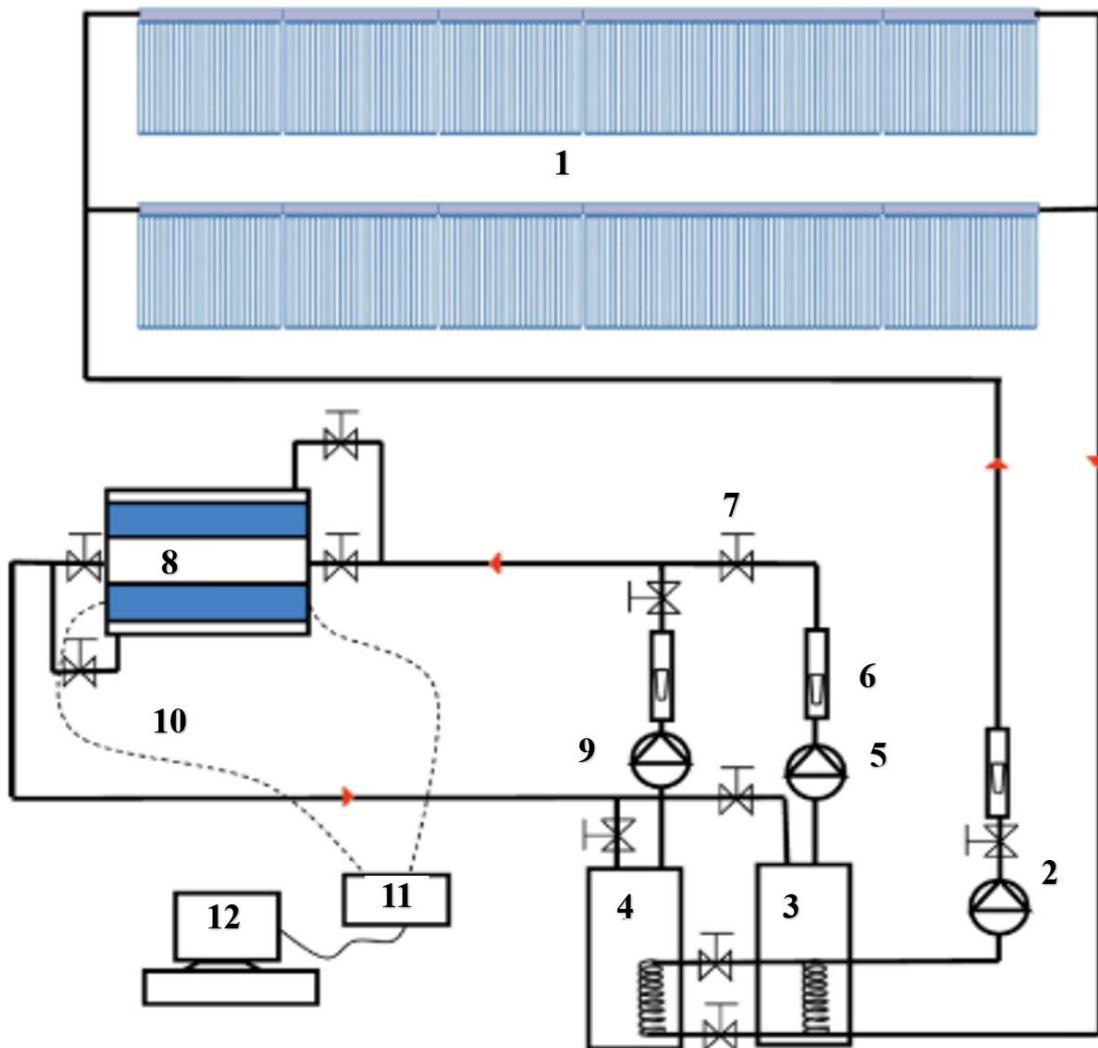


Fonte: Jmal & Baccar (2015)

O TTHX da Figura 2.8 foi aplicado a um sistema de armazenamento de energia e de monitoramento de dados, por Al-abidi et al. (2013) e Al-Abidi et al. (2014). A Figura 2.10 ilustra, o sistema de armazenamento utilizado pelos autores, o qual compreendeu termopares do tipo K (0,5% de precisão), um registrador de dados e um computador. O fluxo do HTF, foi medido por um rotâmetro com 5% de precisão. Dois termopares também foram instalados na entrada e na saída do TTHX, para medir as temperaturas do HTF nestas seções. O TTHX foi isolado com lã de vidro (70 mm de espessura); quinze termopares foram instalados no PCM, em intervalos de 10 mm, montados em diferentes direções angulares e posições radiais, localizados a 100 mm da face de entrada, como ilustrado na referida figura. A água, usada para o processo de carga e descarga, foi provida da estação de aquecimento central do *Green Technology Park*, no Instituto de Energia Solar *Research*, da Universidade Nacional da Malásia. Essa estação de aquecimento, compreende 300 coletores solares de tubo evacuado e três tanques de armazenamento, de 200 L cada. Dois desses tanques,

foram utilizados pelos pesquisadores: um para carregar e outro para descarregar o material de mudança de fase. O carregamento térmico foi conduzido pelo fluxo de água quente, estabelecido por uma bomba de circulação principal (1), que liga o coletor solar ao tanque de armazenamento. Quando a temperatura do tanque atingiu a temperatura de fusão do PCM, a bomba de circulação de carga (4) foi ativada e iniciou-se o processo de fusão. Devido as variações de radiação solar, ao longo do dia, a temperatura de entrada do HTF foi controlada com aquecimento elétrico utilizando um termostato. O processo de solidificação do PCM começou, quando todo o material derreteu. A temperatura do tanque de descarga foi mantida a 68 °C, considerada a temperatura mínima para alimentar o TTHX e na fusão, a temperatura inicial do PCM foi ajustada à temperatura ambiente (27°C).

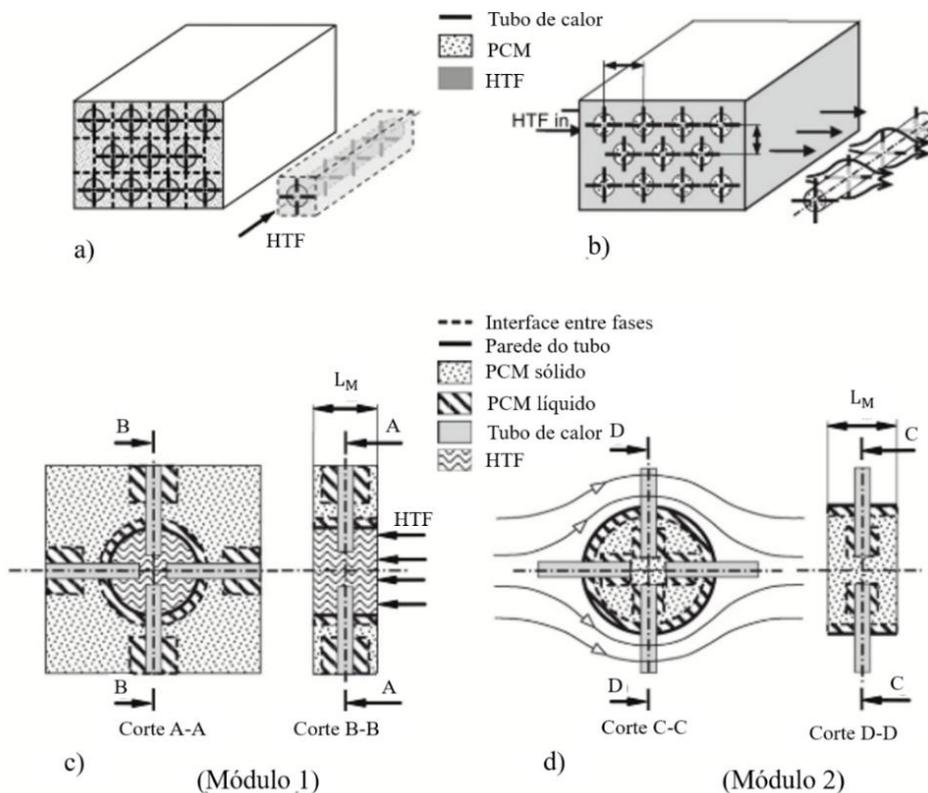
Figura 210 - Diagrama esquemático do aparelho experimental que inclui um coletor solar de tubo evacuado (1), bomba de circulação de aquecimento principal (2), tanque de carregamento (3), tanque de descarregamento (4), bomba de circulação de carga (5), rotâmetro (6).



2.3.1.2 Tubos de calor (*Heat pipe- HP*)

Tubos de calor (*Heat pipe-HP*) são dispositivos que utilizam, em sua estrutura, a condensação ou evaporação de HTFs secundários, para intensificar o fluxo térmico entre o PCM e o HTF principal (NITHYANANDAM & PITCHUMANI, 2013). A Figura 2.10, ilustra dois módulos LHTES, do tipo casca e tubo, que utilizam tubos de calor, como intensificadores do fluxo térmico. O módulo 1, funciona com PCM preenchendo o volume da casca e o HTF principal escoando no interior dos tubos do trocador de calor. O módulo 2, funciona com o PCM preenchendo o volume dos tubos e o HTF principal, escoando no volume do casco. Os tubos de calor são distribuídos ao longo do LHTES conectando os volumes preenchidos por PCM e o HTF principal. Nas extremidades do HP ocorre a condensação e a evaporação do fluido de trabalho (HTF secundário), fazendo com que o mesmo conduza energia térmica, de forma mais intensa e acelere o processo de mudança de fase nos PCMs. Caso uma dada extremidade esteja alocada na seção referente ao PCM e o mesmo esteja no processo de carregamento, esta será a extremidade onde ocorrerá condensação do HTF secundário, enquanto na extremidade que estiver na seção referente ao HTF principal, estará ocorrendo evaporação. O contrário ocorrerá, caso o PCM esteja no processo de descarregamento

Figura 2.10 - Duas unidades de LHTES tipo casca e tubo com HPs (a) PCM preenche o volume da casca e HTF escoo no interior dos tubos -Módulo 1 (b) PCM preenche o volume dos tubos e o HTF escoo no volume do casco-Modulo 2 (c) Detalhes do módulo 1 (d) Detalhes do módulo 2



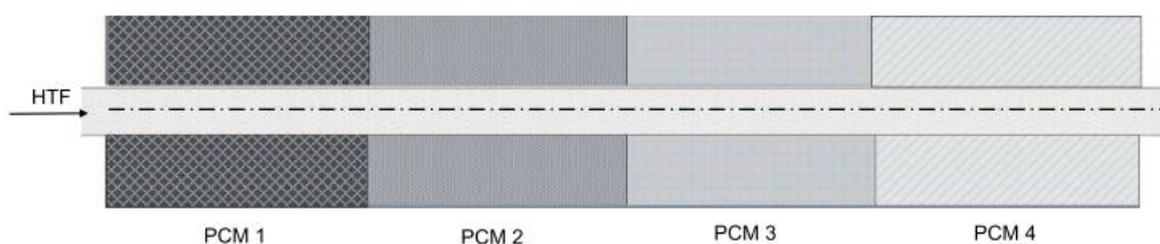
Fonte: Shabgard et al (2010)

Shabgard et al. (2010) relataram, em um estudo numérico, sobre o sistema esboçado na Figura 2.10, sendo este aplicado em usinas de energia solar térmica, utilizando ambos os modos de carga e descarga, que um aumento significativo nas taxas de armazenamento e liberação de energia, devido à presença de HPs, é observado. Utilizando um único tubo de calor, os pesquisadores constataram que, do total da energia armazenada no PCM, durante o processo de carregamento, 13% encontrava-se nas proximidades do HP, mostrando a relevante capacidade deste método, em acelerar o processo de troca térmica.

2.3.1.3 Múltiplos PCMs

Como apresentado na Figura 2.11, neste método de intensificação de troca térmica, um mesmo HTF, ao longo do seu percurso no LHTES, troca calor com vários materiais de mudança de fase, que possuem diferentes pontos de fusão. Isto é, mesmo que o HTF perca energia térmica, aquecendo os materiais de maior ponto de fusão, dispostos no início da trajetória, o mesmo ainda tem capacidade de elevar materiais de menor ponto de fusão, que estão sequencialmente alocados no restante dessa trajetória, ao estado de transição de fase, promovendo uma maior eficiência do processo de troca térmica (IBRAHIM et al., 2017).

Figura 2.11 - Esquema ilustrativo do processo de troca térmica em um LHTES funcionando com múltiplos PCMs



Fonte: Ibrahim et al. (2017).

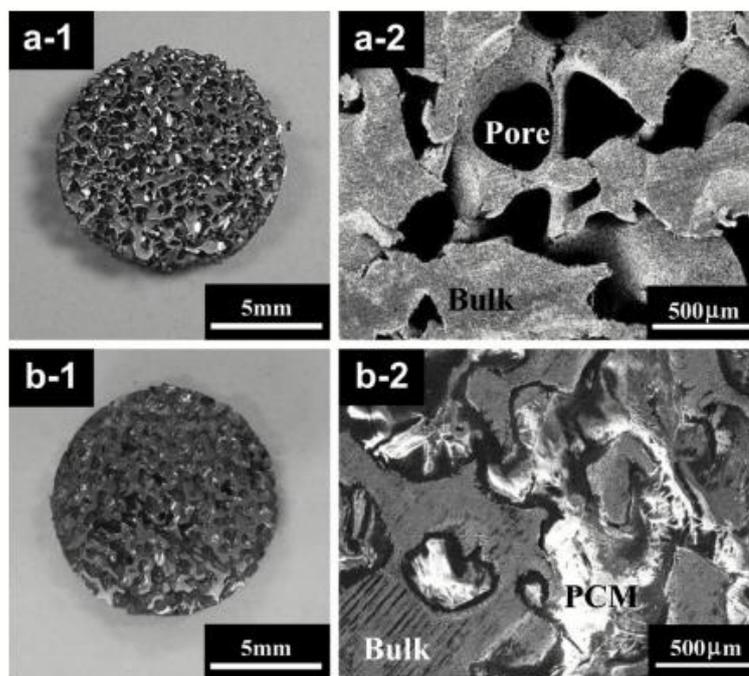
2.3.2 Aumento da condutividade térmica

As técnicas de aumento da condutividade térmica dos PCMs, são divididas entre as que utilizam a composição dos mesmos com materiais de elevada condutividade térmica, separadas de acordo com a estrutura morfológica dos materiais condutivos, a saber, partículas ou estruturas porosas e as que utilizam o encapsulamento dos PCMs, subdivididas de acordo com o tamanho das cápsulas em macro ou micro encapsulamento.

2.3.2.1 Composição com materiais de alta condutividade térmica.

A adição de materiais de elevada condutividade térmica, consiste na fabricação de um material compósito constituído de PCMs e materiais metálicos, materiais a base de carbono e outros materiais como nitreto de boro e sílica (LIN et al., 2018). Estes podem ser aplicados na forma de partículas de formato esféricos ou irregulares, dispersas aleatoriamente na matriz ou utilizando estruturas porosas (*Foams*), que quando mergulhadas nos PCMs, estando estes no estado líquido ou pastoso, tem seus poros preenchidos por PCM e uma rede interconectada de matérias de mudança de fase, passa a interagir termicamente, a partir da estrutura dos materiais de elevada condutividade. A Figura 2.12, ilustra um material compósito de espuma metálica porosa (*Metal foam-MF*) de níquel (Ni) impregnada com Eritritol ($C_4H_{10}O_4$) como material de mudança de fase. O níquel apresenta porosidade de 84-86% e um tamanho médio de poro de 500 μm , sendo este preenchido sob condição de vácuo de 5.0×10^{-4} Pa e temperatura de 150°C (OYA et al., 2012).

Figura 2.12 - (a) Meio poroso de Níquel (Ni) (a2) Detalha dos poros (b) Níquel preenchido com PCM (Eritritol) (b2) detalhe dos poros preenchidos.



Fonte: Oya et al. (2012)

2.3.2.2 Encapsulamento

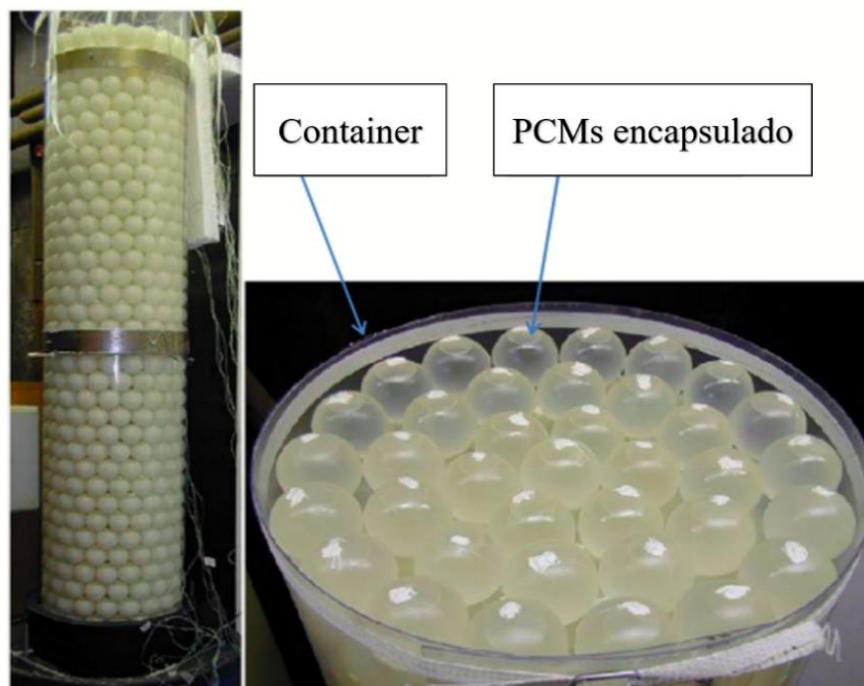
Além da baixa condutividade térmica, outras questões como as altas variações volumétricas durante a mudança de fase, vazamentos e inflamabilidade dos PCMs orgânicos, e a corrosão, decomposição e sub-resfriamento, característicos dos PCMs inorgânicos, são questões que

impedem a sua aplicação. Neste sentido, as técnicas de encapsulamento destes materiais, têm sido desenvolvidas. Através de métodos físico-químicos é possível empacotar frações de materiais de mudança de fase, em capsulas de materiais de maior condutividade térmica, geralmente polímeros ou metais, aumentando a área de transferência de calor e reduzindo a reatividade dos PCMs em relação ao ambiente externo (ZHAO & ZHANG, 2011). As técnicas de encapsulamento podem ser subdivididas de acordo com o tamanho das capsulas em macro ou microencapsulamento.

2.3.2.2.1 Macroencapsulamento

O macroencapsulamento consiste em alocar o PCM em uma contenção macroscópica, contendo desde alguns ml até vários litros de material. Estes containers, são frequentemente feitos de metal ou plástico. Essa técnica é comum devido à alta disponibilidade destes recipientes, os quais já são fabricados para outras aplicações. Desta forma, o macroencapsulamento é feito principalmente para manter o PCM no estado líquido, evitar mudanças em sua composição devido ao contato com o meio ambiente e se o container for resistente, o encapsulamento também pode adicionar estabilidade mecânica ao LHTES (CABEZA & MEHLING, 2008). A Figura 2.13 ilustra um recipiente com macrocápsulas esféricas de PCM, que armazenam energia através de um HTF (água ou ar).

Figura 2.13 - Macrocápsulas de PCM.

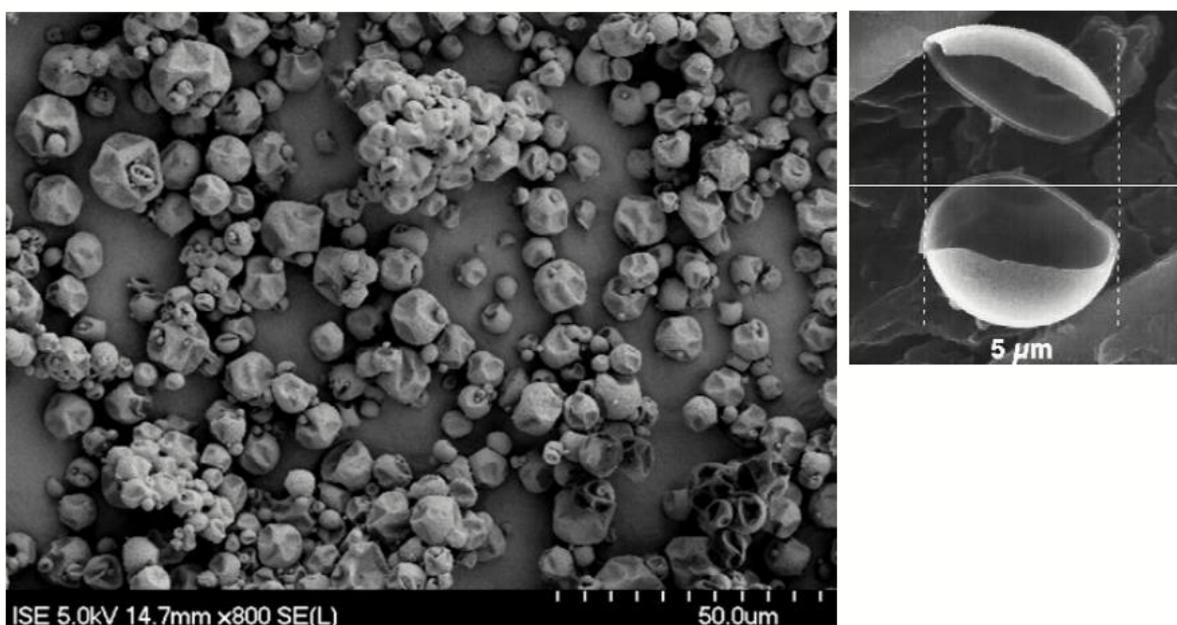


Fonte: Sharif et al. (2015)

2.3.2.2.1 Microencapsulamento

O microencapsulamento ocorre, quando capsulas com dimensões entre 1 e 1000 μm de diâmetro são utilizadas para revestir partículas sólidas ou líquidas de PCMs. Os processos físicos utilizados para microencapsulação são processos de secagem por atomização, centrífugos e de leito fluidizado, ou processos de revestimento. Já os processos químicos utilizados, são encapsulações *in-situ* como coacervação complexa com gelatina, policondensação interfacial, para obtenção de um revestimento de poliamida ou poliuretano e outros. Estes processos, são capazes de produzir materiais com elevada estanqueidade e com mais alta transferência de calor devido à grande relação superfície/volume das capsulas (CABEZA & MEHLING, 2008). A Figura 2.14 ilustra a micrografia de uma parafina comercial microencapsulada, com um diâmetro de cápsula típico, na faixa de 2-20 μm , produzida pela empresa BASF®.

Figura 2.14 - Microcápsulas de parafina.



Fonte: Cabeza & Mehling (2008)

2.4 Aplicações

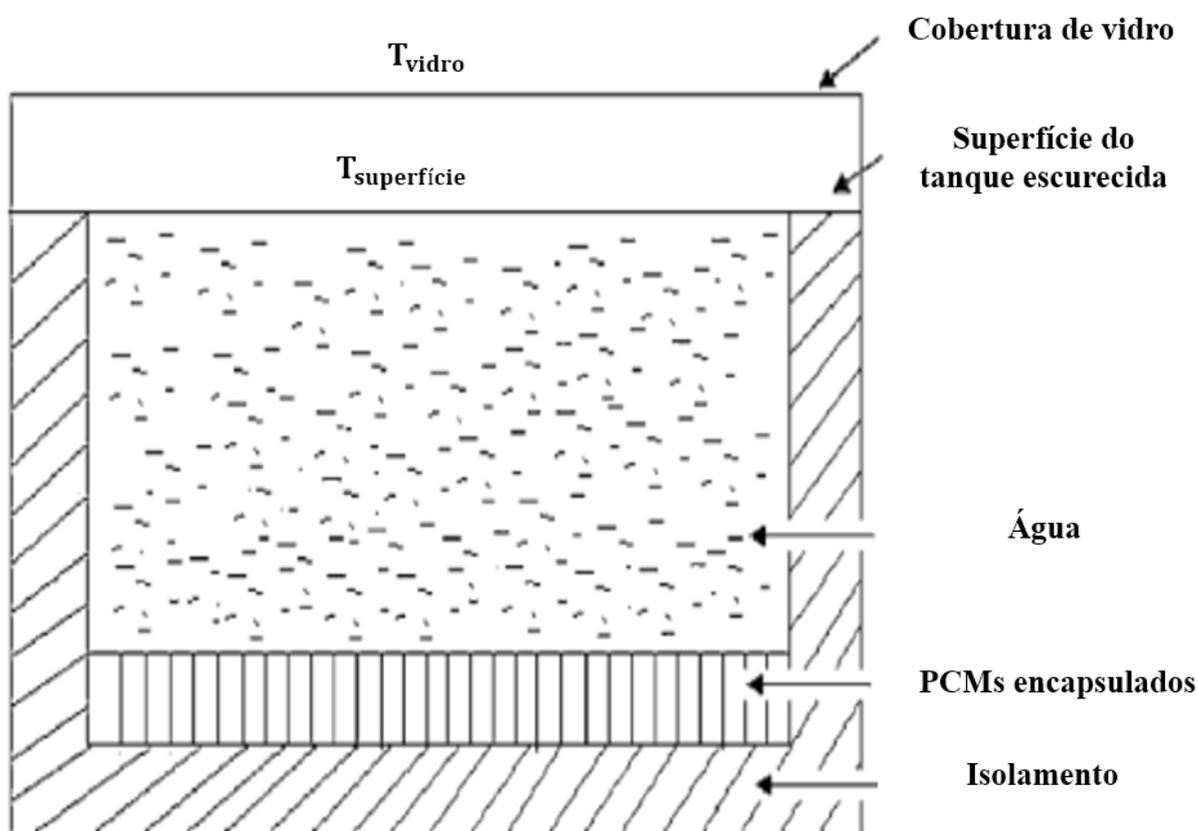
Os PCMs possuem diversas aplicações das quais pode-se citar:

2.4.1 Aquecimento solar de água:

Como apresentado na Figura 2.15, nestes sistemas, uma camada de PCM preenche a parte inferior de um reservatório de aquecimento de água. Durante o dia, a água aquece via energia solar

térmica e passa a transferir calor para o PCM. Este, por sua vez, absorve energia na forma de calor latente e funde. Ao final do dia, a água quente é retirada e substituída por água fria, a qual passa a receber energia do PCM aquecido, que resfria até atingir o seu estado de solidificação.

Figura 2.15 - Reservatório de aquecimento solar de água.

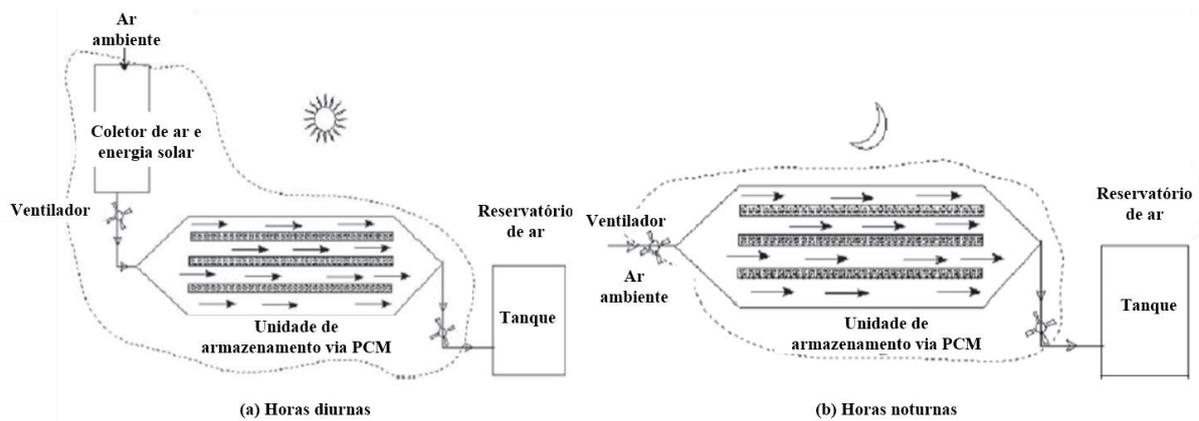


Fonte: Sharma & Chen (2009).

2.4.2 Aquecimento de ar por energia térmica solar:

No modelo apresentado na Figura 2.16 Waqas e Kumar (2013) utilizaram um sistema composto por um coletor solar, ventiladores, que forçam a passagem de ar através do coletor e unidades de armazenamento de energia. Durante o dia (Figura 2.16a), a energia térmica obtida no coletor solar aquece o ar, que passa pela unidade de armazenamento de energia, levando o PCM ao seu estado líquido. Esta troca de calor, faz com que o ar entre resfriado no ambiente. Durante a noite (Figura 4b), o PCM é resfriado com ar frio, característico deste período, atingindo o estado de solidificação e levando o ar a entrar aquecido no ambiente proposto.

Figura 2.16 - Coletor solar acoplado com uma unidade de armazenamento de calor latente para aquecimento de ambientes.

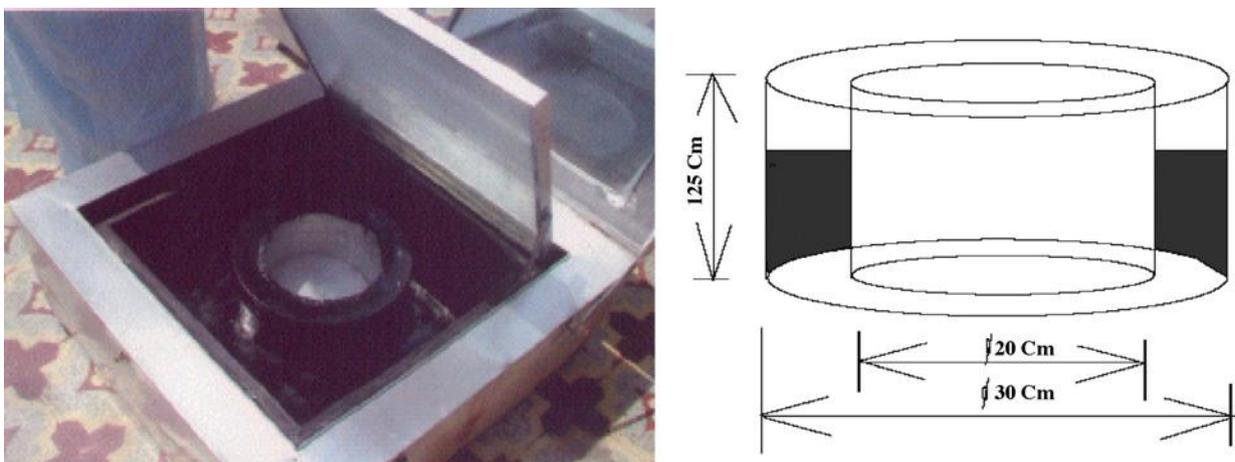


Fonte: Waqas e Kumar (2013).

2.4.3 Fornos solares

A Figura 2.17 apresenta um forno solar desenvolvido por Sharma et al. (2000). Este forno é capaz de operar durante a noite ou em dia nublados a partir do armazenamento de energia proveniente da mudança de fase do PCM, alocado na cavidade existente entre os cilindros externo e interno do forno, apresentados na figura. Os autores obtiveram resultados que indicam que o ponto de fusão do PCM utilizado para este fim deve estar entre 105 e 110°C. Para atingir estas temperaturas, são utilizadas lentes que focalizam os raios solares que incidem no forno, ao longo do dia.

Figura 2.17 - Caixa contendo um forno solar acoplado a um PCM.

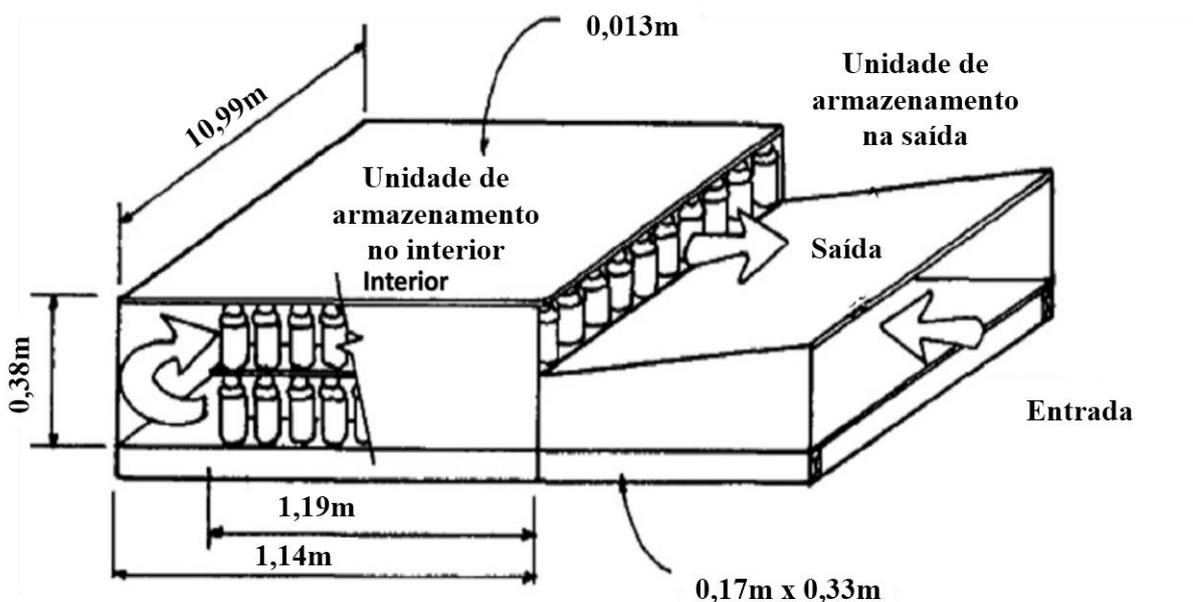


Fonte: Sharma et al. (2000)

2.4.4 Estufas solares

Os PCMs também são utilizados para manutenção de temperaturas em estufas. A Figura 2.18 apresenta uma estufa com duas unidades de armazenamento de energia: uma dentro da estufa e outra na saída da mesma. A primeira é responsável por armazenar o calor do ar aquecido, que entra na estufa durante o dia, por meio da fusão do PCM. Durante a noite, esta energia será liberada no interior da estufa. A segunda unidade de armazenamento, funciona como um isolante, absorvendo o calor do ar quente, que é liberado na saída da estufa.

Figura 2.18 - Estufa acoplada com unidades de armazenamento de energia via calor latente.



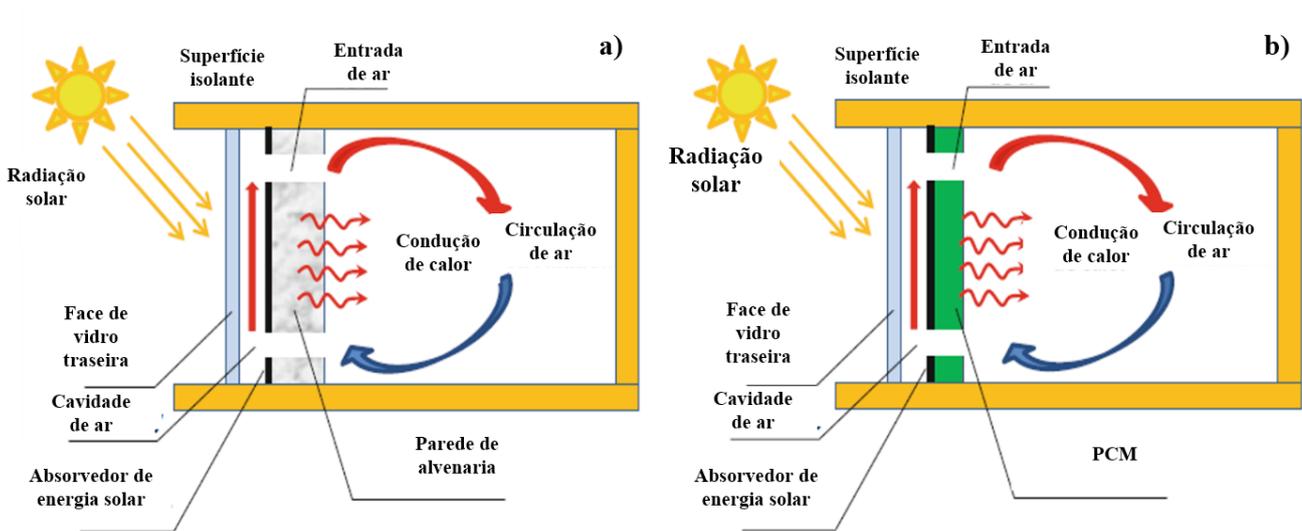
Fonte: Sharma et al. (2009)

2.4.5 Construções

Os materiais de construção desenvolvidos com PCMs são aplicados com o objetivo de controlar as temperaturas no ambiente das residências ao longo do dia. Na Figura 2.19, observa-se a diferença entre construções que utilizam o aquecimento solar para controle de temperatura com o armazenamento de calor sensível (Figura 2.19a) e com armazenamento de calor latente (Figura 2.19b). Observa-se que, primeiramente, ocorre uma redução nas dimensões das paredes, que antes eram feitas em alvenaria, e passam a ser construídas com PCMs. Isto ocorre, devido a elevada capacidade térmica e densidades características destes materiais. Outro aspecto que pode ser citado desta aplicação, é a transferência de calor por radiação, que estes passam a liberar durante a noite

para o ambiente residencial, promovendo o aquecimento do ar no interior da residência (KOŚNY, 2015)

Figura 2.19 - Comparação entre sistemas de controle de temperatura com e sem a aplicação de PCMs.



Fonte: Kośny (2015).

CAPÍTULO III

É abordado neste capítulo, uma revisão bibliográfica das aplicações da fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamic-CFD*) para avaliação de sistemas de armazenamento de energia térmica, via calor latente.

3.1 Aplicações de CFD em sistemas de armazenamento de energia via calor latente

Denomina-se CFD, a forma generalizada para descrever a simulação numérica de todos os processos físicos e/ou físico-químicos onde ocorre escoamento, a saber, transferência de calor e massa, mudanças de fase, reações químicas (combustão e oxidação), processos que envolvem o movimento de equipamentos mecânicos (movimento de pistões, hélices e palhetas) e de deformação mecânica. Essas simulações, são realizadas com o propósito de prever campos de concentração, velocidades, pressão, temperatura, tensões, frações volumétricas e propriedades turbulentas, que ocorrem nos fenômenos físicos analisados. Para tanto, modelos numéricos, de várias linguagens de programação, são desenvolvidos baseados nas equações de conservação da massa, espécies químicas, energia e quantidade de movimento. À medida que esses modelos numéricos são validados, com resultados experimentais ou analíticos, os mesmos são capazes de gerar um considerável aumento na eficiência dos processos industriais, reduzindo o número de experimentos e aparatos tecnológicos, necessários a construção e avaliação de sistemas físico-químicos.

Para se descrever fisicamente os processos de armazenamento de energia térmica via calor latente, faz-se necessária uma formulação matemática que caracterize o fenômeno transitório de mudança de fase, onde uma fronteira móvel de transição, é governada por uma equação diferencial parcial, que pode ser resolvida analítica ou numericamente. A solução analítica desse processo é problemática, por causa das interfaces não lineares na fronteira de mudança de fase, que apresentam geometria complexa e condição de contorno não padrão; os poucos estudos analíticos disponíveis nessa área são sobre casos unidimensionais com geometrias regulares e condições de contorno padrão (AL-ABIDI et al., 2013).

A natureza não linear, inerente às interfaces móveis, de transição de fase sólido-líquido, características dos processos de mudança de fase, os definem como processos de difícil solução. O deslocamento dessas interfaces é controlado pelo calor latente, perdido ou absorvido, no limite das mesmas, o que matematicamente é descrito como um tipo particular de problema de condições de contorno, para o qual as equações diferenciais parciais são resolvidas, dentro de limites moveis

(DUTIL et al., 2011). Esta questão foi estudada pela primeira vez, por Lamé e Clapeyron (1831), quando analisaram a formação da crosta terrestre, a partir da sua solidificação. Nesse caso, o problema foi simplificado de uma geometria esférica para uma placa semi-infinita, unidimensional. Estes problemas, no entanto, passaram a ser denominados problemas de Stefan, devido ao físico esloveno Jozef Stefan (1889) ter estudado esta problemática, especificamente, analisando a formação de gelo. Na sequência, Evans (1951) comprovou a existência de solução para este tipo de problema e Douglas (1957), comprovou a singularidade desta solução.

A conservação da energia, que governa os fenômenos de transferência de calor em PCMs de transição sólido-líquido, pode ser resolvida baseada na temperatura ou na entalpia. No primeiro caso, a temperatura é tratada como variável principal, as equações de conservação são escritas separadamente para a fase sólida e líquida e as interfaces entre estas fases, podem ser rastreadas, obtendo-se uma solução precisa. No segundo caso, as posições das interfaces sólido-líquido não são rastreadas, as equações governantes são similares as equações monofásicas, não existem condições explícitas a serem satisfeitas na interface sólido-líquido; a formulação baseada na entalpia, envolve a solução dentro de uma zona pastosa (*Mushy Zone-MZ*) de transição, onde ambas as fases estão presentes e o problema de mudança de fase, se torna mais simples de ser resolvido (JOULIN et al., 2009).

Neste sentido, pode-se observar várias pesquisas na área de CFD que tem empreendido esforços, na busca por caracterizar LHTESs, de modo a definir condições ótimas de operação e direcionar as aplicações dos PCMs, nas mais variadas aplicações.

Jian-You (2008) realizou uma investigação numérica e experimental de uma unidade de armazenamento de energia térmica, envolvendo processos de mudança de fase dominados pela condução de calor. A unidade de armazenamento de energia térmica, envolve um TTHX com enchimento de PCM no canal intermediário, com um fluido aquecido (HHTF) escoando no canal externo durante o processo de carregamento e um fluido frio (CHTF) escoando no canal interno durante o processo de descarregamento do LHTES. Um método numérico simplificado, foi desenvolvido para a analisar a solidificação e fusão do PCM, no tubo concêntrico triplex. Para testar a validade física dos resultados numéricos, um aparato experimental foi construído, para avaliar o efeito da temperatura e taxa de transferência de calor. A comparação entre as previsões numéricas e os dados experimentais mostraram boa concordância. Variando-se a temperatura do CHTF, os resultados mostraram que a cada aumento de 2°C na temperatura do fluido resulta em uma taxa média de recuperação de calor de 0,042 kW.

Li et al. (2012) apresentaram um estudo numérico e experimental, avaliando o processo de fusão em células abertas de MFs de cobre, com porosidade de 90%, saturada de parafina. A

temperatura da parede e a distribuição de temperatura dentro da espuma, foram medidas durante o processo de fusão. Os efeitos dos parâmetros morfológicos da espuma, incluindo porosidade e densidade de poros, na distribuição de temperatura, foram investigados. Foi proposto um modelo numérico, que considerou o efeito do meio poroso metálico, a convecção natural local e o não-equilíbrio térmico. Os resultados previstos numericamente mostraram-se de acordo com os resultados experimentais, indicando uma relevante aceleração no processo de mudança de fase, devido a presença da espuma metálica porosa. O aumento da condução de calor, é mais proeminente do que a remoção da convecção natural do líquido fundido, que esta estrutura representa; os mecanismos de difusão de calor e convecção natural, dominaram o processo de fusão; A uniformidade da distribuição de temperatura dentro do compósito, foi aumentada pela aceleração da taxa de convecção natural, que ocorreu diminuindo a porosidade da espuma.

Al-Abidi (2013), investigou numericamente o aumento na transferência de calor entre um fluido de troca térmica (Água-H₂O) e a parafina comercial RT82, produzida pela Rubitherm® Technologies GmbH, sediada na Alemanha. O processo de troca térmica foi realizado com um TTHX, fabricado com tubos cobre (Cu), alumínio (Al) e Aço carbono, aletados nas superfícies, diretamente em contato com os PCMs, com diferentes configurações de aletas longitudinais. Um modelo numérico bidimensional, foi desenvolvido utilizando o *software* Ansys FLUENT® 6.3.26, considerando condução pura e convecção natural, através do material de mudança de fase. O número de aletas, suas dimensões e o material das mesmas, influenciam o tempo de fusão completa do PCM. Experimentos foram conduzidos para validar o modelo proposto e os resultados simulados foram validados com os obtidos experimentalmente. Estes resultados revelaram que a geometria do TTHX com oito aletas alcançou uma redução de 34,7% no tempo necessário para a fusão completa do PCM, que o tempo necessário a fusão para o caso com comprimento de 42 mm nas aletas, com configuração de oito aletas, representou uma redução de 37,5% em relação ao caso com aletas de 10 mm e que a utilização do cobre em relação ao aço reduziu esse mesmo tempo em 42,8%.

Kong et al. (2014) avaliaram numericamente a redução no consumo de energia e o melhoramento no conforto térmico de um edifício, localizado na cidade de Tianjin (China), devido a aplicação de dois sistemas de painéis com PCMs: Um utilizando ácido cáprico, instalados na superfície externa das paredes e do teto do edifício (*Phase Change Material on the Outer Walls-PCMOW*) e outro utilizando um composto de 95 % de ácido cáprico e 5% de 1-dodecanol, instalados nas superfícies internas das paredes e do teto (*Phase Change Material on the Inside Walls-PCMIW*). Uma modelagem matemática unidimensional e transiente, baseada na temperatura, foi desenvolvida para prever o comportamento térmico de ambientes, com os sistemas PCMOW e PCMIW, em comparação com um ambiente de referência, onde não foram aplicados os sistemas de

armazenamento térmico. A solução numérica foi validada, comparando os resultados com dados experimentais, a qual apresentou erros relativos menores que 5%. Os autores constataram que as variações de temperatura da parede e do teto, no ambiente de referência, são maiores que as dos ambientes com PCMOW e com PCMIW. A baixa condutividade térmica dos PCMs, reduziu a transmissão de calor para a atmosfera interna do ambiente. Nas salas com PCMIW, tanto o calor transmitido através das paredes, como das janelas e das portas do ambiente, pôde ser absorvido ou libertado pelos PCMs, o que é diferente para o ambiente com PCMOW, que apenas reduziu o calor transmitido através das paredes. As menores flutuações de temperatura, indicaram que os tempos de operação dos sistemas de resfriamento de ar ou aquecedores, podem ser reduzidas devido a utilização de PCMs, o que representa uma oportunidade para redução do consumo de energia.

Jmal e Baccar (2015) estudaram o processo de solidificação da parafina C_{18} , em um TTHX, com aletas radiais, distribuídos ao longo das superfícies, em contato com o PCM. Nesta ocasião, os pesquisadores utilizaram ar, como fluido de troca térmica, o qual escoava através dos volumes, compreendidos entre o tubo externo e intermediário e no interior do tubo interno, como ilustrado na Figura 2.9, do capítulo anterior. O trabalho apresentou uma modelagem numérica bidimensional, baseada nas equações da continuidade, momento e energia, utilizando o método de discretização por volumes finitos. Utilizou-se resultados experimentais, reportados por Longeon et al (2013), para validação do modelo, os quais apresentaram boa concordância. Os autores concluíram, que o aumento no número de aletas acelera o processo de solidificação, até um limite máximo de 9 aletas, quando o aumento destas passa a ser desprezível, devido restrição do movimento do fluido, que a inserção das aletas também representa, limitando nestes casos o processo de troca térmica à transferências de calor por condução pura.

Antunes (2016), desenvolveu um estudo numérico para avaliar a transferência de calor, com mudança de fase sólido-líquido, em cavidades de secção retangular preenchidas com PCM Micronal[®] DS 5001X e a sua influência na termorregulação de um painel fotovoltaico. Foi utilizado um modelo bidimensional transiente, assumindo-se que a transferência de calor ocorre de forma puramente difusiva. Os resultados numéricos obtidos mostraram estar de acordo com os resultados experimentais, reportados por Soares et al. (2015). Antunes (2016) constatou, que o tempo de fusão do PCM é semelhante para as unidades de armazenamento com 1 e 5 cavidades, que o tempo de solidificação diminui de forma progressiva, à medida que o número de cavidades aumenta e que a espessura ideal da cavidade retangular, colocada na parte posterior do painel fotovoltaico, é de 3 cm, para se obter um efeito termorregulador, durante as horas de maior radiação solar.

Mastani Joybari et al. (2017) realizaram um estudo numérico para avaliar a performance de um TTHX, submetido aos processos de carga e descarga simultaneamente. A proposta consiste, na

análise da condição de operação, continua, de um sistema de armazenamento e liberação de energia, de modo que, em algum momento dos ciclos térmicos, o PCM (Rubitherm[®] RT31) estará sofrendo processo de fusão em uma parte do seu volume e sendo solidificado em outra parte, a este tipo de LHTES, denomina-se sistemas de carga e descarga simultâneas (*Simultaneous Charging and Discharging - SCD*).

As equações governantes foram numericamente resolvidas utilizando o *software* Ansys FLUENT[®] v16.2. O efeito da convecção natural, no processo de transferência de calor foi investigado, bem como, os modos de operação que consideram o aquecimento, a partir da superfície externa do tubo intermediário e resfriamento, a partir da superfície interna do tubo interno e os que consideram o aquecimento, a partir da superfície interna do tubo interno e resfriamento a partir da superfície externa do tubo intermediário.

Os resultados foram validados com resultados experimentais, que consideram os processos de carga e descarga separadamente e apresentaram boa concordância. As análises indicaram, que a condição inicial do PCM (completamente fundido ou completamente solidificado) tem um grande impacto na configuração final da interface sólido-líquido do material. Observou-se que o modelo puramente difusivo pode ser aplicado, com baixos níveis de erro, para condição inicial do PCM completamente fundido, mas na condição inicial do material completamente solidificado, a desconsideração da convecção natural pode gerar erros relevantes na descrição do processo.

Youssef et al. (2018) realizaram o desenvolvimento numérico de um trocador de calor de mudança de fase (*PCM Heat exchanger-HX*), construído com 8 tubos, com superfícies externas ligadas a fios de cobre em espiral, que interagem com a parafina orgânica PlusICE[®] A16, que funde a 16 °C, dentro de um container metálico. Neste sistema, os tubos são conectados, formando uma estrutura em serpentina, por onde o fluido de troca térmica (ar), proveniente de um sistema de bomba de calor, assistido por energia solar, entra em uma extremidade do trocador, aquecendo ou resfriando o PCM, ao longo dos ciclos térmicos existentes no local. Os autores propuseram um detalhado modelo tridimensional, para avaliar a performance do HX, utilizando o *software* Ansys FLUENT[®] para resolver as equações de conservação e validaram os resultados numéricas com os dados experimentais obtidos. Observou-se que, dentro das condições de operação analisadas, o período de carga foi mais curto que o de descarga do PCM, o que foi atribuído ao efeito de transferência de calor por convecção natural, ser mais efetivo durante a fusão do material. Constatou-se, que tanto as velocidades de entrada do HTF, quanto a diferença entre a sua temperatura e a do PCM, são inversamente proporcionais ao tempo necessário ao carregamento e descarregamento do material.

Desta forma, pode-se constatar a importância da técnica CFD para avaliação e melhoramento de sistemas de armazenamento de energia térmica via calor latente. A Tabela 3.1 resume os

trabalhos analisados nessa área. O número de trabalhos que analisam os LHTES em geometrias 3D é escasso, dado a complexidade do modelo e de geração de malhas para os trocadores de calor. Os trabalhos tem mostrado que os modelos que tomam em conta, a convecção natural no PCM, ao longo do processo de mudança de fase, apresentam resultados mais acurados que aqueles que consideram o processo como sendo puramente difusivo. À medida que os dados numéricos são validados, estes podem ser utilizados no desenvolvimento de trocadores de calor de mudança de fase.

Tabela 3.1 - Resumo de trabalhos que aplicam CFD em LHTES

Referência	Ano	PCM	Dim.	Método de troca térmica
Jian-You	2008	n-Hexacosano	1D	TTHX
Li et al.	2012	Parafina	2D	Compósito poroso
Al-Abidi	2013	RT 82	2D	TTHX com aletas longitudinais
Kong et al	2014	Ácido cáprico	1D	Dissolução em material de construção
Jmal & Baccar	2015	Parafina C ₁₈	2D	TTHX com aletas radiais
Antunes	2016	DS 5001X	2D	Microencapsulamento
Mastani Joybari et al.	2017	RT 31	2D	TTHX
Youssef et al.	2018	A16	3D	HX

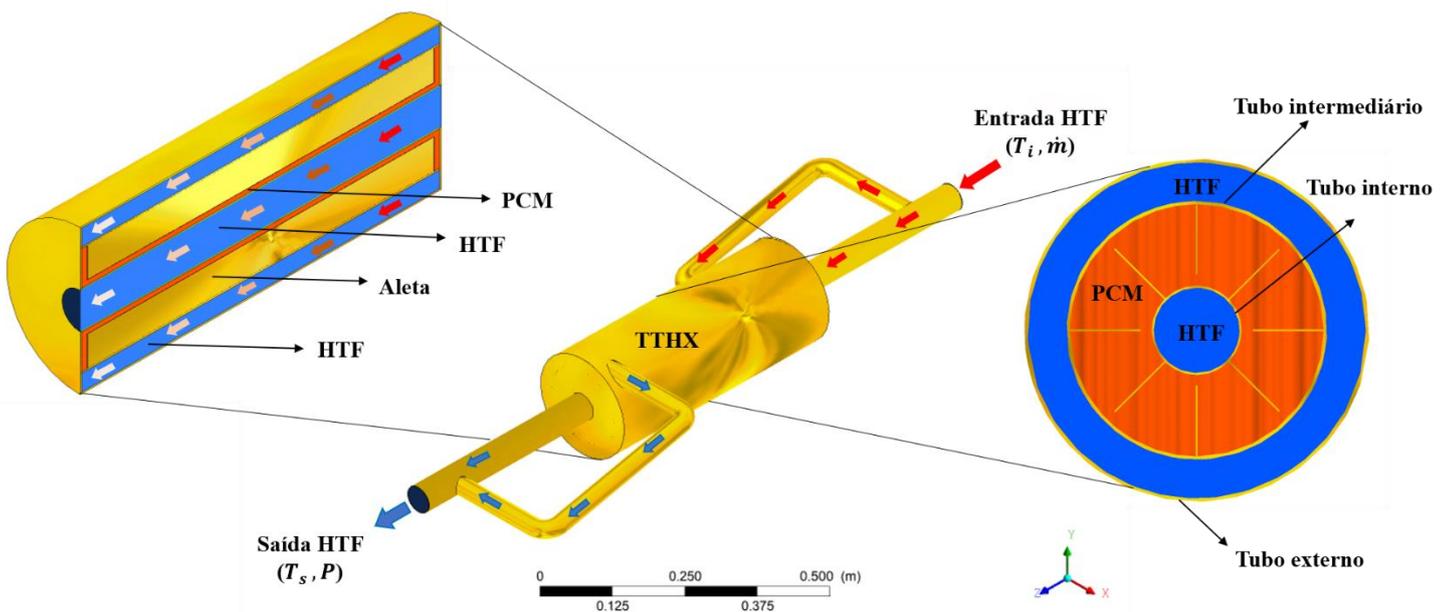
CAPÍTULO IV

Neste capítulo é apresentado a metodologia empregada para o desenvolvimento da pesquisa.

4.1 Problema Físico

A proposta física de estudo, consiste na análise dos processos de fusão-solidificação de um PCM (Rubitherm® RT82), que troca calor com um HTF (Água), através de um TTHX de cobre, com aletas longitudinais, instaladas nas superfícies tubulares, diretamente em contato com o PCM. Como ilustrado na Figura 4.1, o TTHX é subdividida em 5 domínios físicos, a saber, o volume de fluido (água), circulando nas tubulações, os volumes sólidos dos tubos de cobre interno, intermediário e externo do TTHX, e o volume de PCM, compreendido entre as superfícies interna do tubo intermediário e a externa do tubo interno

Figura 4.1 - Problema físico



No carregamento, a água adentra o trocador com temperatura (T_i) e fluxo mássico (\dot{m}) pré-estabelecidos, por um tubo de cobre com 50,8 mm de diâmetro e espessura de 1,2 mm. Esse fluxo mássico é dividido por uma ramificação da tubulação de entrada, a qual possui 32 mm de diâmetro e 1,2 mm de espessura. Desta fora o HTF transfere energia para o PCM através das superfícies externa do tubo intermediário e interna do tubo interno. Por sua vês, o calor é conduzido pelas

tubulações aletadas para o PCM. À medida que o HTF, libera energia para o sistema, sua temperatura na saída (T_i) é reduzida e ao longo do tempo, obtém-se a fusão do PCM. No processo de solidificação, o HTF adentra o trocador, com temperatura inferior ao PCM, repelindo o fluido quente, que havia nas linhas de fluxo, e recebendo energia do PCM, levando o material a solidificar. As superfícies externas do TTXH, são consideradas isoladas, de modo que, a troca de calor com o meio externo é nula. Nas Figuras 4.2-7, tem-se respectivamente, as vistas frontal e lateral do TTXH, frontal e isométrica do domínio fluido, dos tubos interno e intermediário, e do PCM com as suas respectivas cotas.

Figura 4.2 - Vista frontal do TTXH

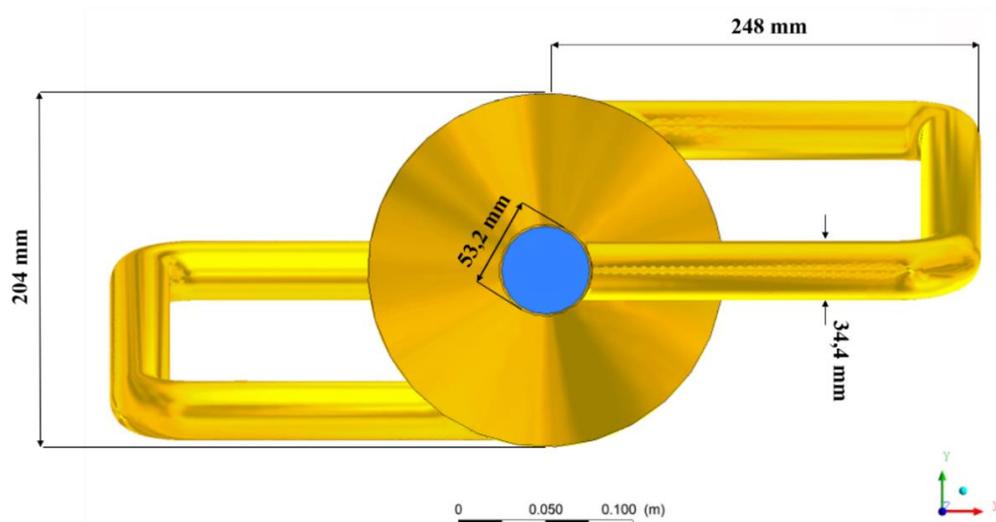


Figura 4.3 - Vista lateral do TTXH

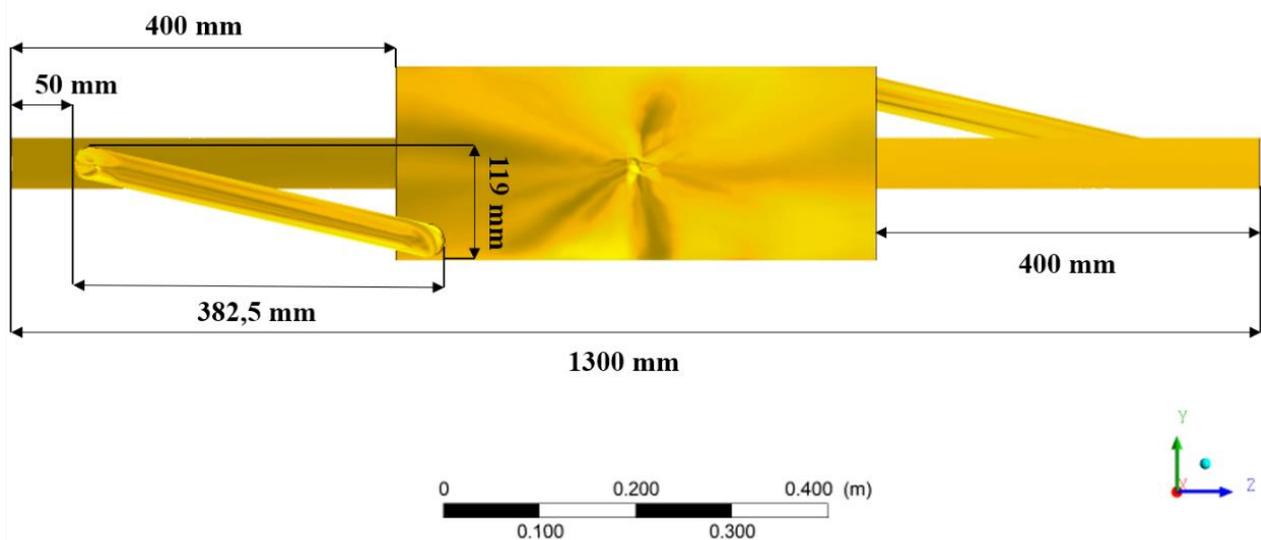


Figura 4.4 - Vista frontal e isométrica do domínio fluido (HTF)

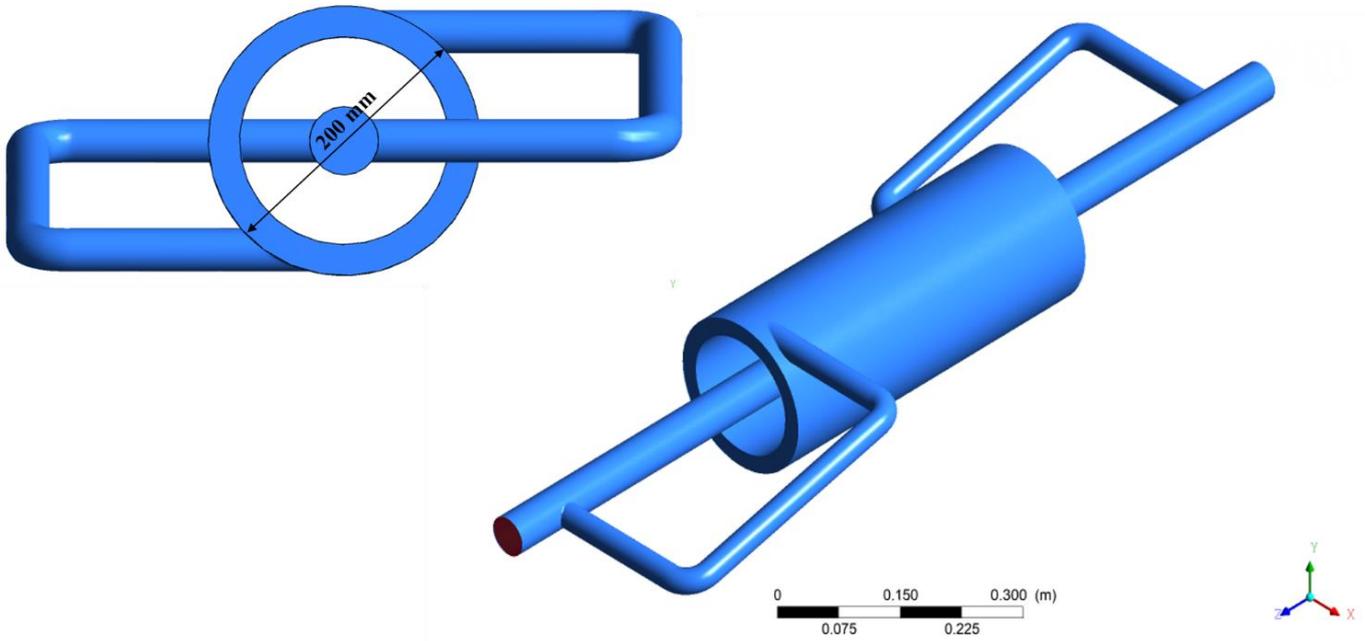


Figura 4.5 - Vista frontal e isométrica do tubo intermediário

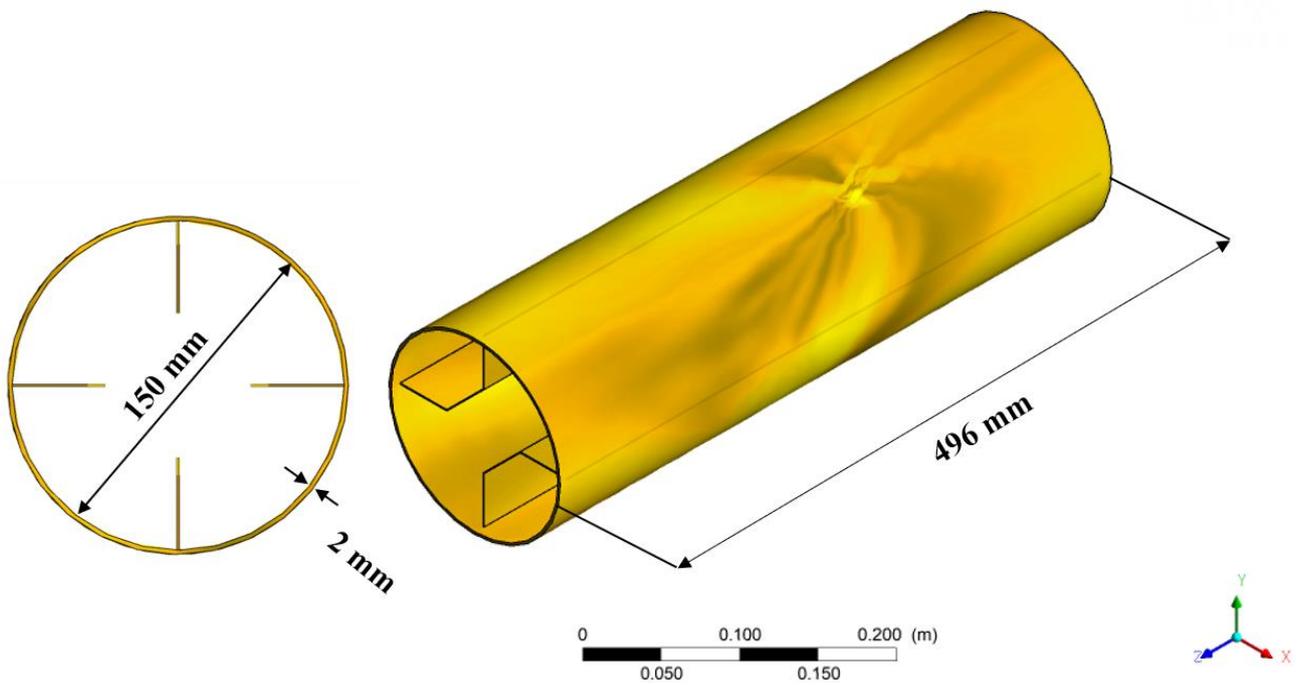


Figura 4.6 - Vista frontal e isométrica do tubo interno

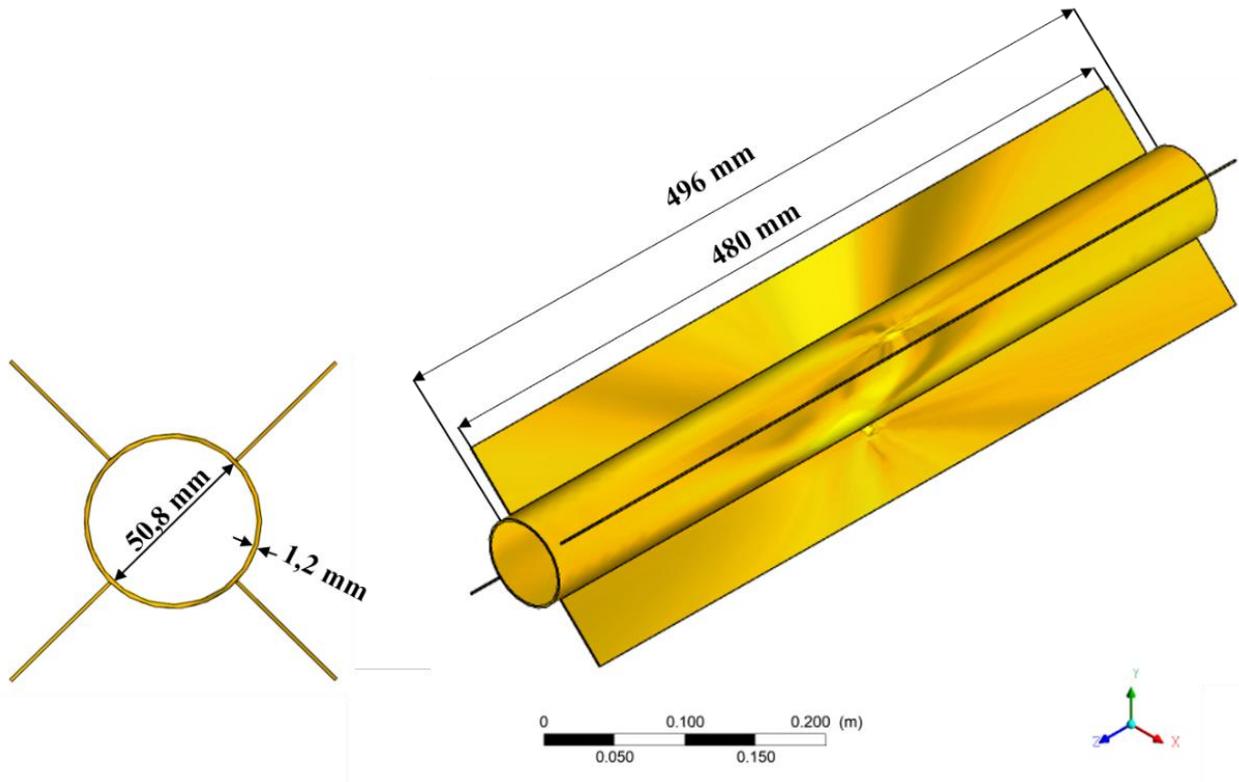
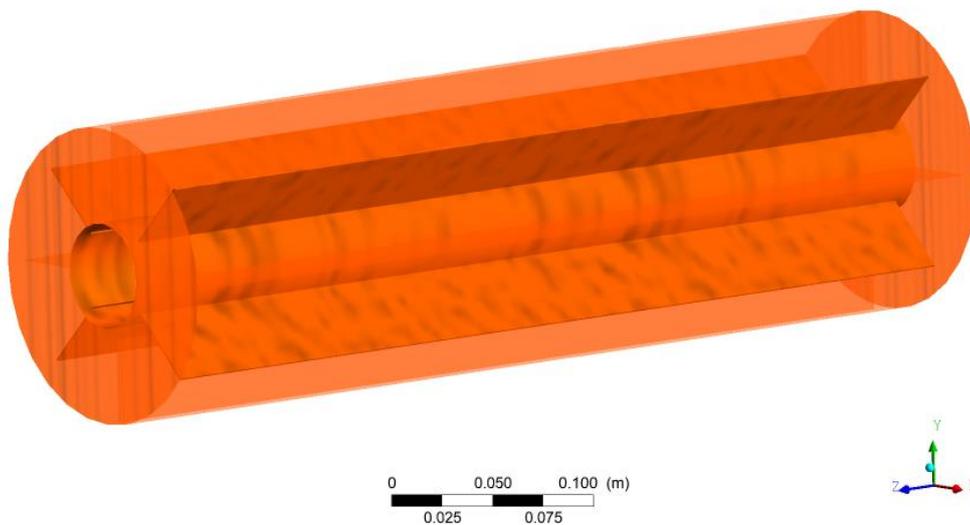


Figura 4.7 - Domínio geométrico referente ao material de mudança de fase

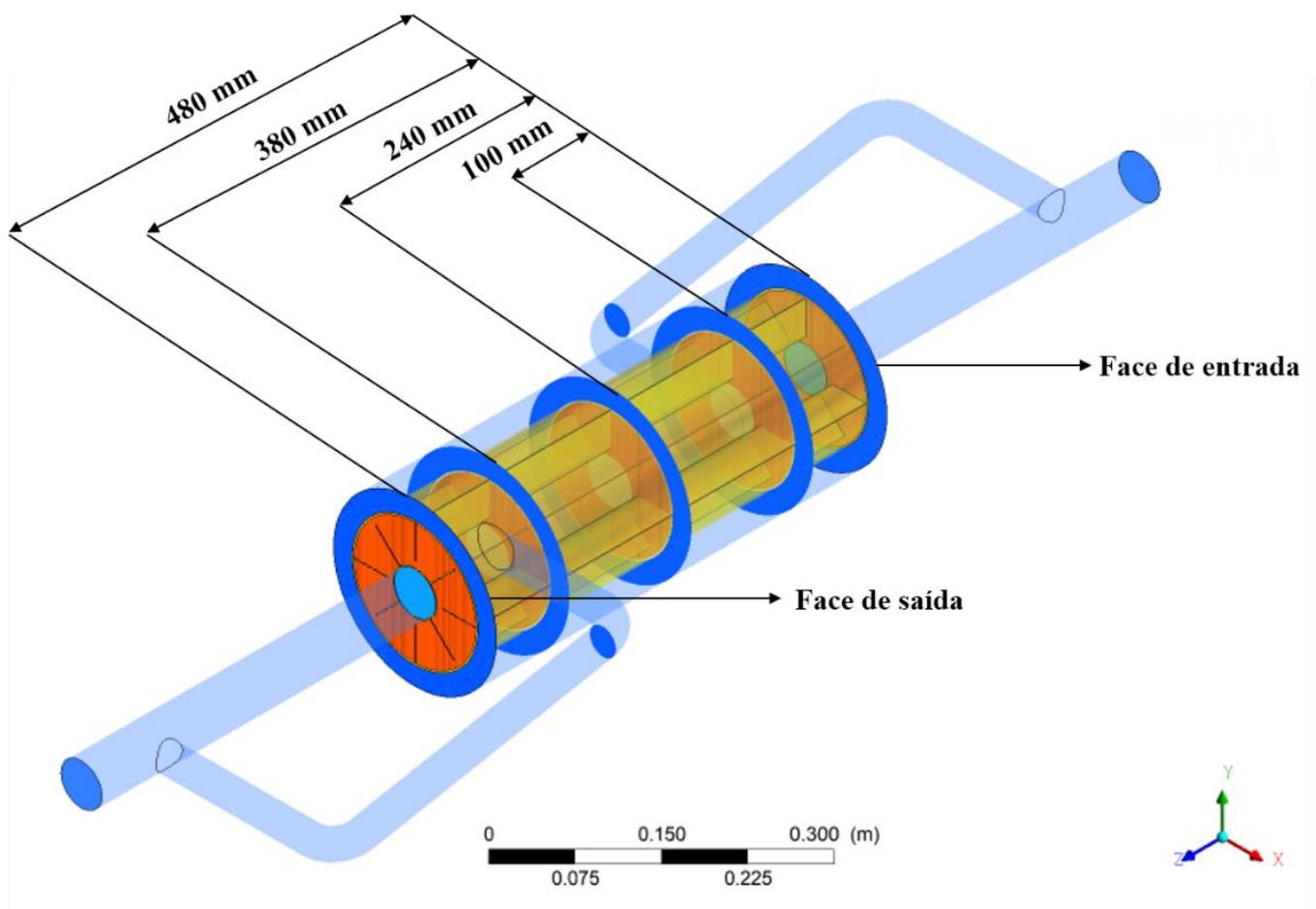


Para efeito de simplificação, o domínio referente a tubulação externa, não é considerado nas simulações, devido a pequena espessura da tubulação e ao isolamento utilizado nas superfícies externas do TTHX. Desta forma apenas os domínios referentes ao HTF, PCM, tubulações interna e intermediária foram considerados.

Como pode ser observado na Figura 4.6, existe uma variação de 16mm entre o comprimento da tubulação e das aletas. Adicionando a espessura (2mm) da tubulação externa, que reveste todo o trocador, essa diferença cresce para 20mm, sendo 10mm de em cada extremidade do trocador. Outra simplificação que foi utilizada, foi a de considerar apenas os 480mm do comprimento do TTHX, correspondente ao comprimento aletas.

Desta forma, o problema físico simplificado, fica como lustrado na Figura 4.8, onde também estão referidos os 5 planos, ao longo do comprimento do trocador, que foram tratados nos resultados apresentados no Capítulo 5, a saber, 0, 100, 240, 380 e 480mm da face de entrada ($z = 0$ mm) do TTHX. Estas simplificações, permitiram a produção de malhas mais simples e com considerável qualidade, as quais estão descritas na seção 4.2. As geometrias apresentadas foram construídas no *software* ANSYS Design Modeler®.

Figura 4.8 - Domínios estudados e esquema de planos analisados



4.1.1 Configurações propostas

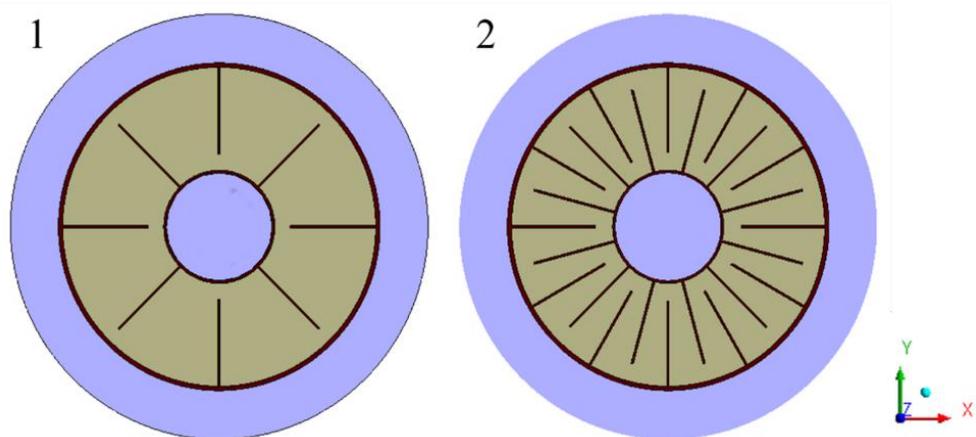
Duas configurações geométricas foram analisadas, variando-se o número (N°) e altura (a) das aletas, as quais estão dispostas na Figura 4.9 e descritas na Tabela 4.1. A configuração 1, é

utilizada para validar os resultados numéricos, com os resultados experimentais de Al-abidi et al. (2014) e Al-abidi et al. (2013b). Com a metodologia numérica validada, propõe-se a configuração 2, de modo a analisar a influência do aumento do número de aletas na estrutura do TTHX, nos processos de armazenamento e liberação de energia. Como apresentado na Tabela 4.1, a área de troca térmica (superfícies das tubulações aletadas em contato com o PCM) da configuração 1 é de 308832 mm^2 , enquanto a configuração 2 possui uma área de $1228023,6 \text{ mm}^2$. Devido a inserção de aletas na geometria do trocador, tem-se menos volume ocupado por PCM. Na Tabela 4.1 consta os volumes de PCM relativos as duas configurações: a configuração 1 possui 0.00725707 m^3 , enquanto a configuração 2 possui 0.00695444 m^3 , essa característica foi avaliada quanto ao nível de absorção de energia total na unidade de troca térmica.

Tabela 4.1 - Configurações geométricas estudadas.

Configurações	e (mm)	a (mm)	Nº	Área de troca térmica (mm^2)	Volume de PCM (m^3)	Método de troca térmica
1	1	42	8	308832	0.00725707	ext-int
2	1	40	24	1228023,6	0.00695444	ext-int

Figura 4.9 - Configurações de aletas

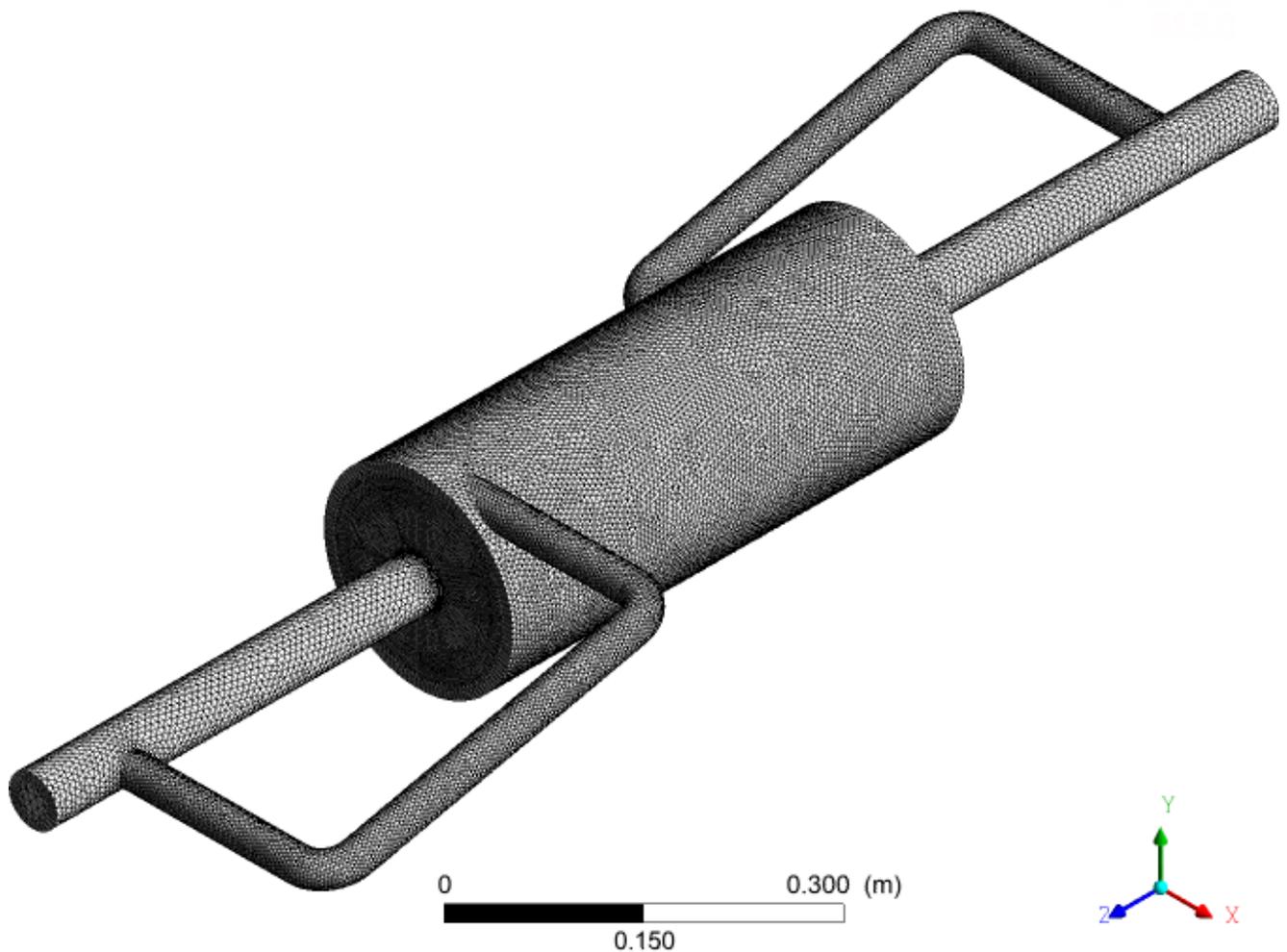


4.2 Malha numérica

Para solução das equações de conservação e, conseqüente, simulação do processo de fusão e solidificação dos PPCMs, faz-se necessária a conversão do problema contínuo, em um problema

discreto, numericamente possível de ser solucionado. A forma de discretização, caracteriza a metodologia numérica aplicada. Neste trabalho, foi utilizado o método de discretização por volumes finitos, o qual, por definição, realiza um balanço das equações de conservação, para cada volume de controle, que constitui a malha numérica. Esta, consiste basicamente na partição, tridimensional, de um domínio geométrico, em elementos denominados células, compostas por arestas e nós, onde as equações governantes podem ser resolvidas em limites finitos, reduzindo-as a forma algébrica. Esta modelagem acarreta erros, que diminuem à medida que a malha é acrescida de elementos, e devem ser trabalhados de forma a atingirem valores aceitáveis aos projetos de engenharia.

Figura 4.10 - Vista isométrica da malha utilizada para o TTHX



No problema proposto, foram desenvolvidas malhas híbridas, de elementos tetra e hexaédricos, não estruturadas, no âmbito do *software* Ansys Meshing[®]. Esse tipo de malha possibilitou associar a capacidade de moldagem à geometrias complexas dos elementos tetraédricos, alocados no domínio do HTF, com a qualidade dos resultados relativos aos elementos hexaédricos,

principalmente nas regiões de parede, nas estruturas aletadas e no domínio do PCM, os quais mantiveram um boa qualidade na malha para a referida geometria.

Na Tabela 4.2, estão representados os parâmetros de qualidade de malha, ortogonalidade (mínima e média), deformação (máxima e média) e número de elementos, referentes as configurações geométricas apresentadas na Tabela 4.1. Observa-se que todas malhas, encontram-se dentro do limite recomendado para valores de deformação (abaixo de 0,95) e de ortogonalidade (acima de 0,1) (ANSYS, 2015).

Figura 4.11 - Vista frontal da malha utilizada para o TTHX a) configuração 1 e b) configuração 2

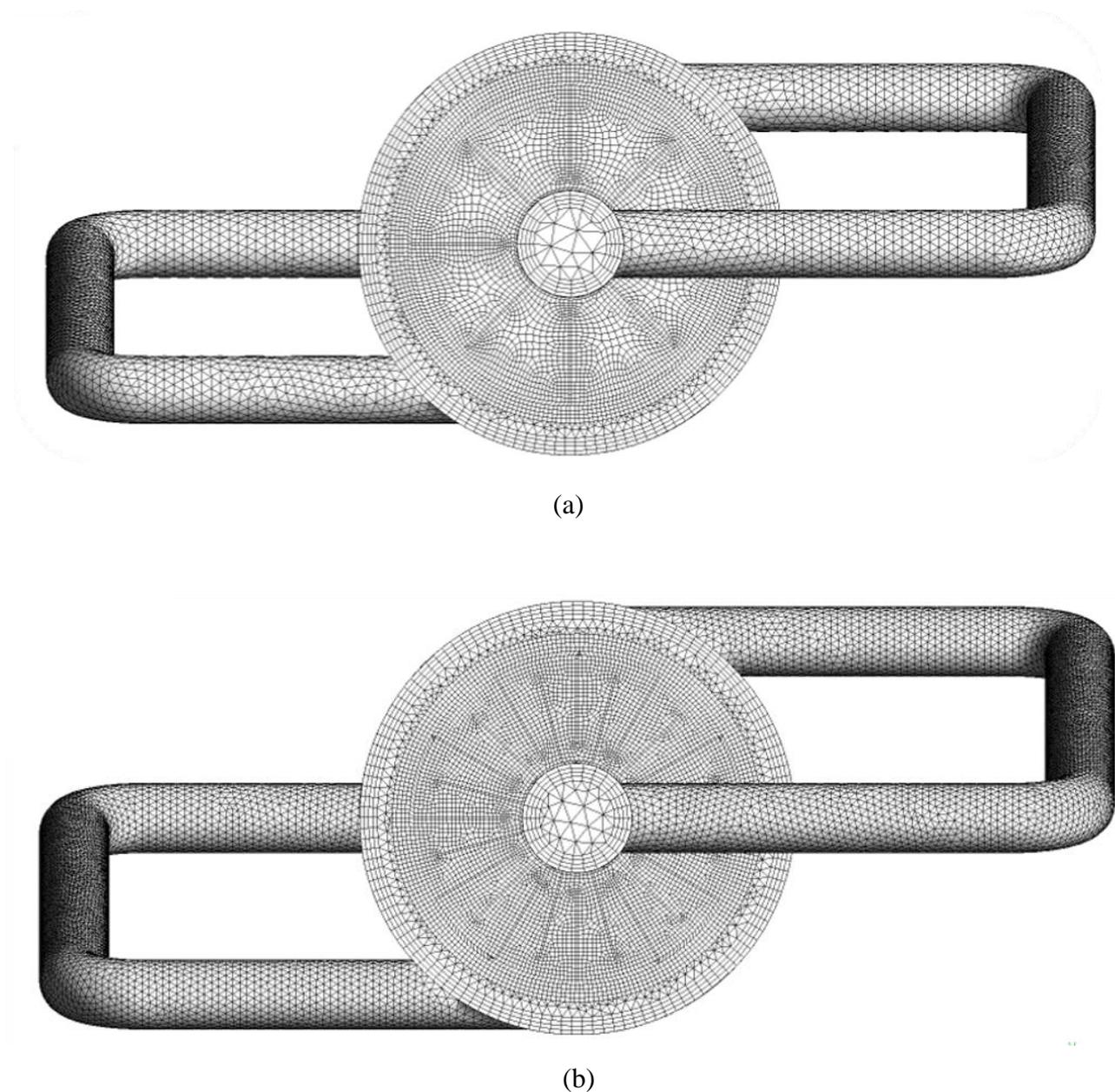


Figura 4.12 - Detalhes da malha utilizada para o HTF

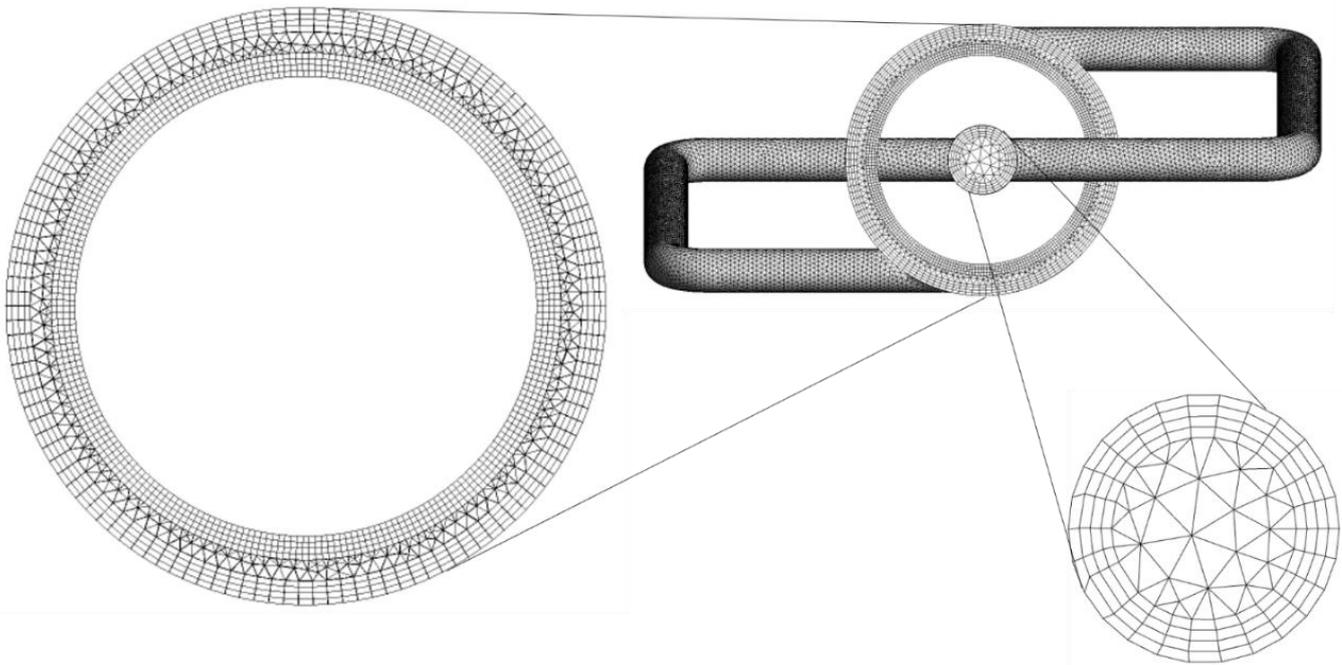
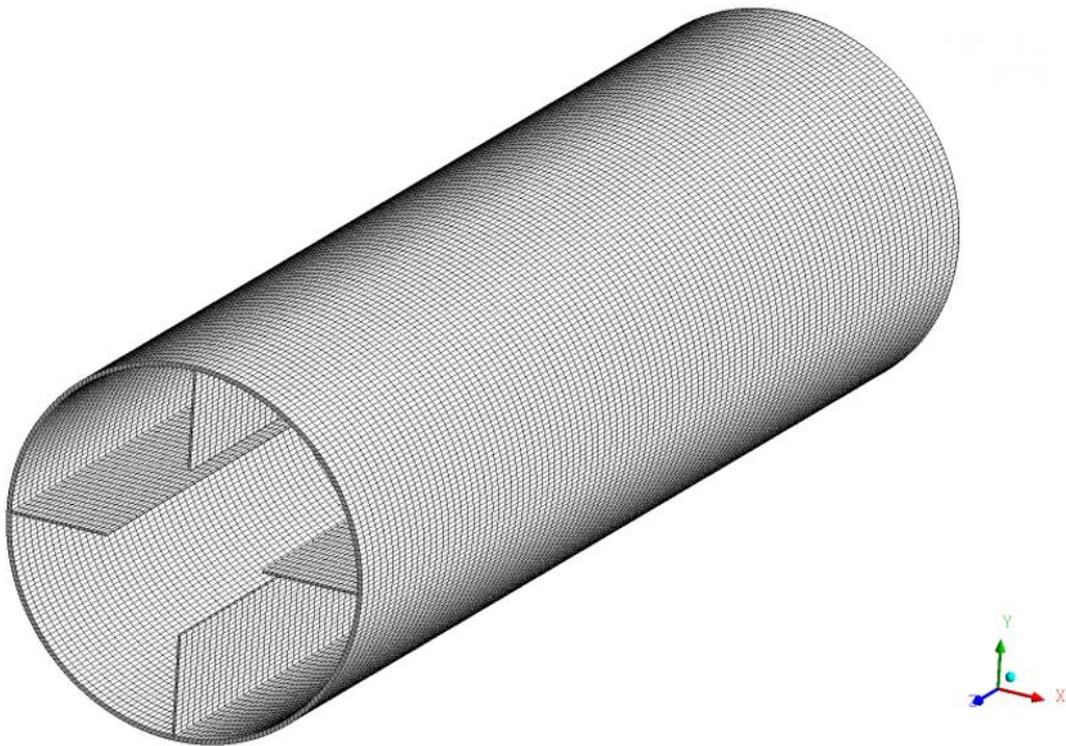


Tabela 4.2 - Malhas construídas e parâmetros de qualidade de malha

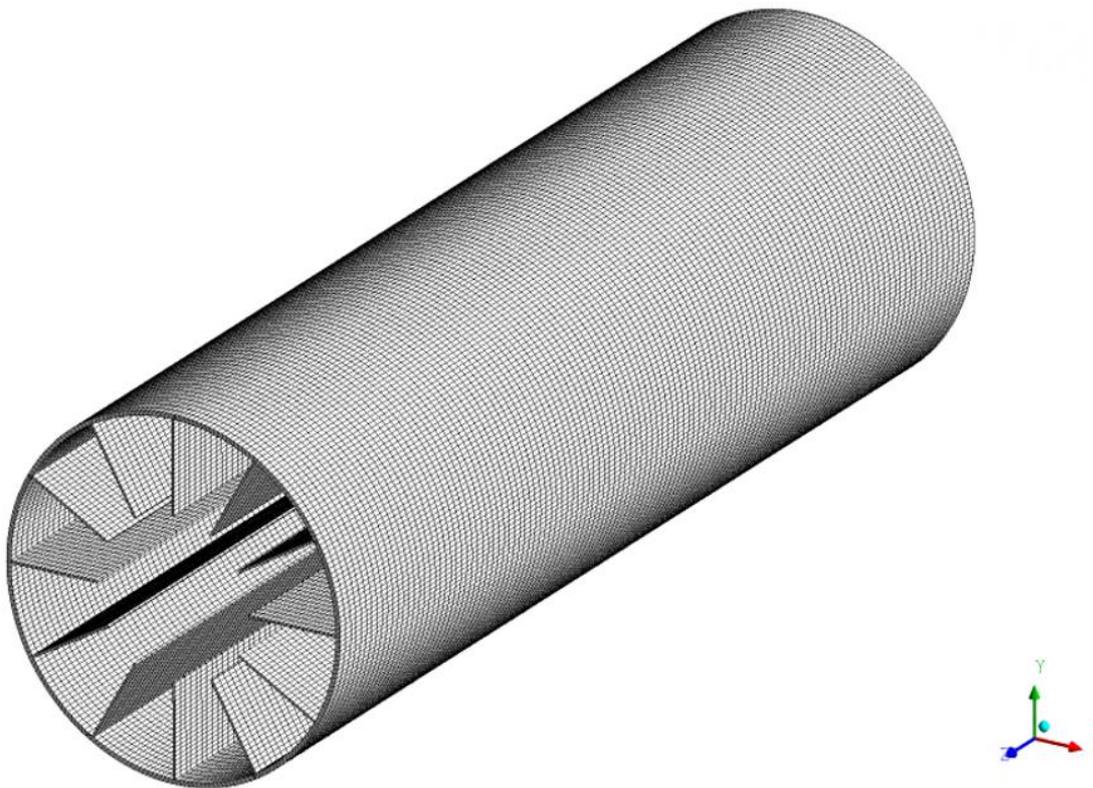
Malha	Ortogonalidade.		Deformação		Nº de elementos	Configuração
	Mínima.	Média	Máxima	Média		
1	0,179	0,891	0,849	0,220	1155525	1
2	0,181	0,900	0,9168	0,191	2902682	1
3	0,246	0,900	0,826	0,207	1823647	2

As Figuras 4.10-15, ilustram as malhas utilizadas para os domínios tratados no problema físico, referentes a configuração 1 e 2, da Figura 4.9. A Figura 4.10 apresenta a vista isométrica e a Figura 4.11a e 4.11b, as vistas frontais das malhas utilizadas para os trocadores de calor, nas referidas configurações geométricas. Na Figura 4.12, tem-se os detalhes da malha utilizada para o HTF, a qual possui elementos tetraédricos na parte interna do volume e camadas de elementos hexaédricos nas paredes, que exigem uma melhor qualidade de malha, devido às camadas limites hidrodinâmica e térmica se desenvolverem nestas regiões. As Figuras 4.13a e 4.13b, 4.14a e 4.14b, 4.15a e 4.15b, respectivamente, para as duas configurações, descrevem o domínio das tubulações aletadas interna e intermediária, e do PCM. Observa-se que foi possível manter uma uniformidade dos elementos nas tubulações, enquanto no PCM os elementos possuem um formato irregular, mas passível conformidade as referidas geometrias.

Figura 4.13 - Malha utilizada para o domínio do tubo intermediário a) configuração 1 e b) configuração 2

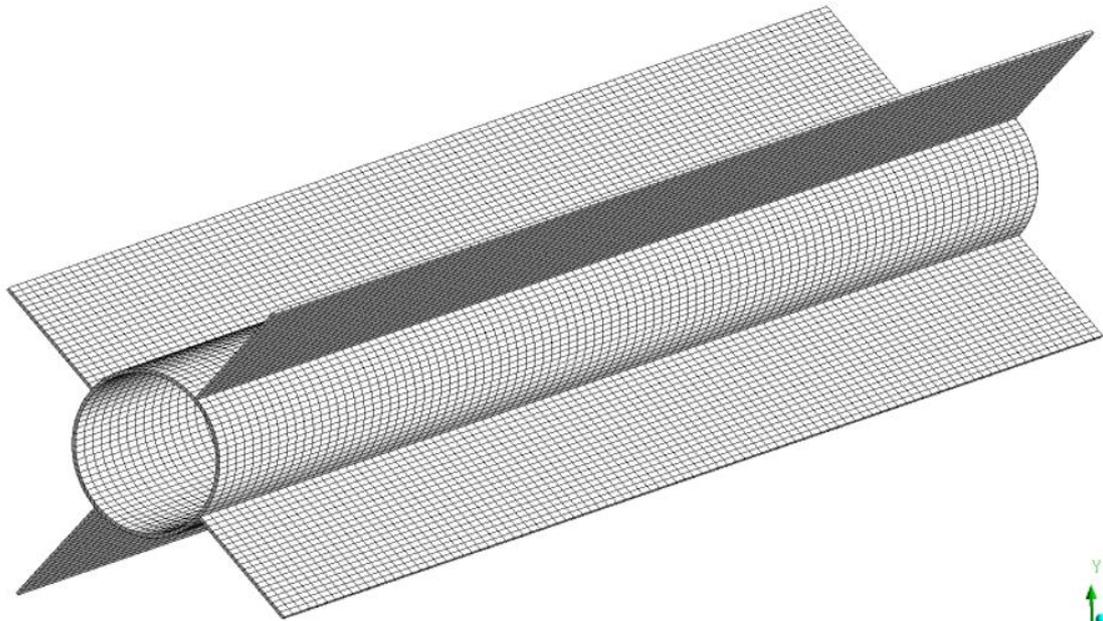


(a)

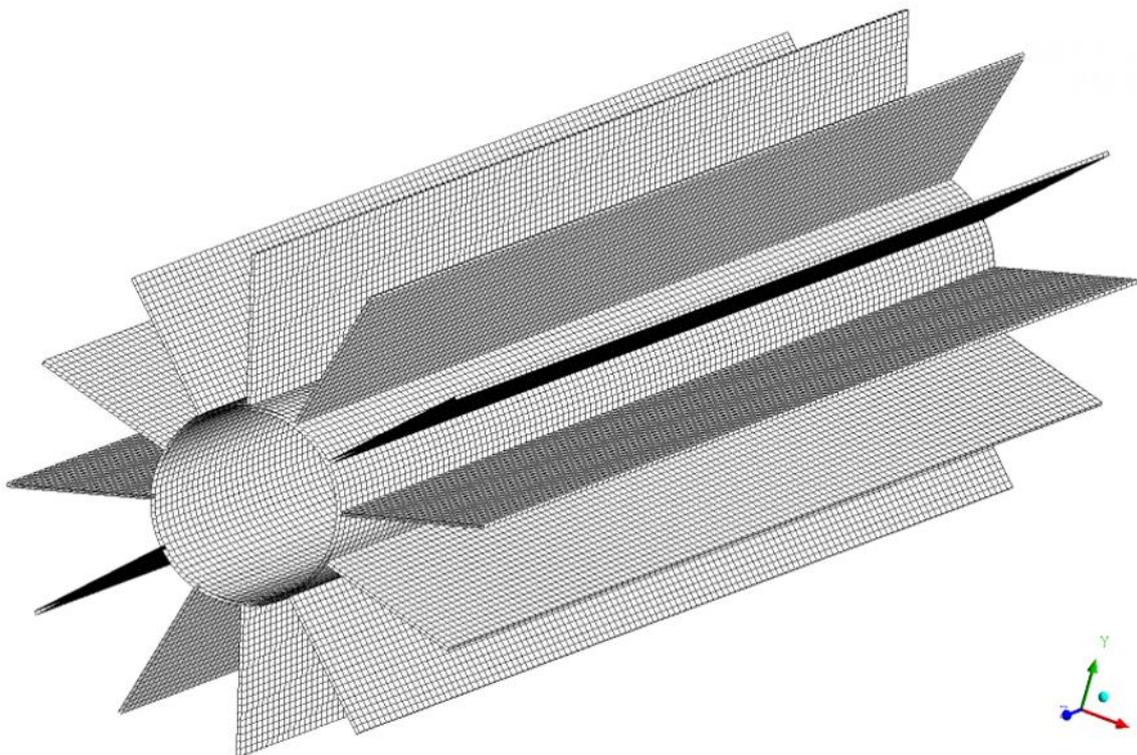


(b)

Figura 4.14 - Malha utilizada para o domínio do tubo interno a) configuração 1 e b) configuração 2

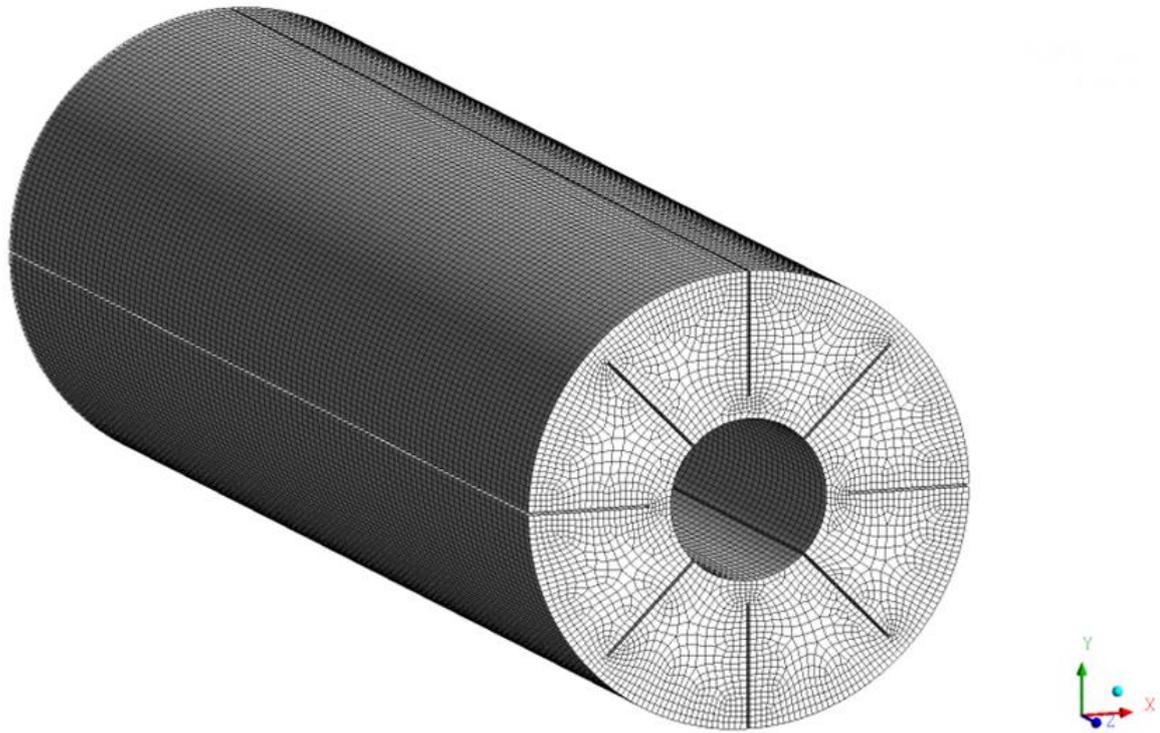


(a)

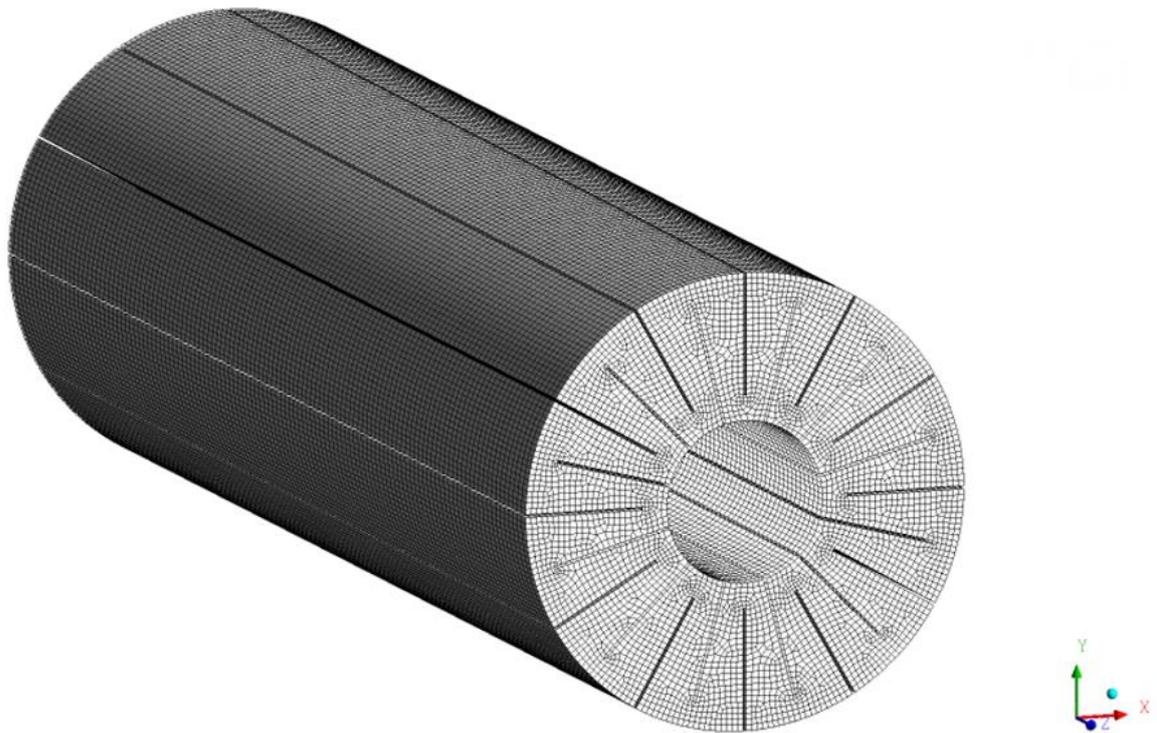


(b)

Figura 4.15 - Malha utilizada para o domínio do PCM a) configuração 1 e b) configuração 2



(a)



(b)

4.2.1 Modelagem matemática

As equações de conservação, que descrevem o a operação do TTHX, foram tratadas nesta seção. Faz-se necessário uma modelagem que analise os processos fluidodinâmicos, térmicos e de transição de fase, que ocorrem durante os ciclos de carga e descarrega do PCM.

4.2.1.1 Modelagem Fluidodinâmica

O escoamento do HTF nas tubulações do trocador de calor ocorre em regimes de escoamento turbulento, laminar e de transição, a depender da região analisada. À medida que o PCM é aquecido ou resfriado, o mesmo apresenta variações na sua densidade, que ocorrem, primeiramente, nas regiões mais próximas das paredes das tubulações. Essas variações de densidade, em meio ao campo gravitacional, são convertidas em forças de empuxo, que movimentam o PCM, com baixas velocidades, dentro do trocador. Desta forma, foi utilizado o modelo de turbulência k-w SST (Shear-Stress Transport), com correções para baixos números de Reynolds (Re), que possibilitou a análise do escoamento em todos os regimes referidos.

4.2.1.1.1 Equações de conservação-*Reynolds Averaging Navier-Stokes* - RANS

Para obtenção das equações RANS faz-se necessário a decomposição das variáveis de escoamento, das equações de Navier-Stokes, em termos de médias temporais e componentes flutuantes, como descrito na Equação 1, para uma variável genérica ϕ .

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (1)$$

onde $\bar{\phi}$ é a média temporal ϕ' representa as flutuações dessa variável. Desta forma, tem-se as equações de conservação para escoamentos turbulentos.

Continuidade

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

Quantidade de movimento

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial X_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial X_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3)$$

onde ρ é a densidade do fluido, μ é a viscosidade dinâmica, t é a variável temporal, P é a pressão, X é o vetor posição, u é vetor velocidades, os sub-índices i e j representam as componentes (x , y e z) dos eixos coordenados, de modo que, sendo i ou $j = 1$ tem-se a componente na direção x , sendo i ou $j = 2$ tem-se a componente na direção y , sendo i ou $j = 3$ tem-se a componente na direção z . O termo $\overline{u'_i u'_j}$ representa as tensões de Reynolds, derivadas do escoamento turbulento.

4.2.1.1.2 Modelo de turbulência: *Shear-Stress Transport- k- ω SST*

O modelo de transporte de tensões (*Shear-Stress Transport- k- ω SST*) aplicado no *software* Ansys FLUENT[®], foi desenvolvido por Menter (1994), com objetivo de unir a robustez e a acurácia, para os resultados próximos a parede, do modelo k - ω padrão (WILCOX, 1998) com a acurácia e simplicidade do modelo k - ϵ (LAUNDER; SPALDING, 1972), nas regiões distantes da parede. Para tanto, funções de acoplamento são utilizadas para que as equações dos modelos k - ω e k - ϵ sejam ativadas, respectivamente, nas células próximas e distantes das paredes, do domínio computacional. Em suma, a variável k representa a energia cinética turbulenta de um escoamento e a variável ω representa a taxa de dissipação desta energia. As Equações 4 e 5, descrevem o transporte destas variáveis.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial X_j} \right) + G_k - Y_k + W_k \quad (4)$$

e

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial X_i} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial X_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + W_\omega \quad (5)$$

Nestas Equações, o termo G_k representa a produção de energia cinética turbulenta, G_ω representa a geração de ω , Γ_k e Γ_ω representam a difusividade efetiva de k e ω , devido a turbulência, Y_k e Y_ω , representam a dissipação de k e ω . O termo D_ω representa a difusão cruzada, W_k e W_ω , representam os termos fonte das referidas equações. Estas variáveis são descritas como segue:

Difusividades efetivas

As difusividades efetivas de k e ω são calculadas nas Equações 6 e 7.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (6)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (7)$$

onde σ_k e σ_ω são os números de Prandtl turbulentos, descritos nas Equações 8 e 9.

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}} \quad (8)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (9)$$

onde F_1 é uma das a funções de acoplamento entre os modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$ descrita na Equação 10; $\sigma_{k,1} = 1,176$; $\sigma_{k,2} = 1,0$; $\sigma_{\omega,1} = 2,0$; $\sigma_{\omega,2} = 1,168$.

$$F_1 = \tanh(\theta_1^4) \quad (10)$$

O termo θ_1 é dado pela Equação 11.

$$\theta_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega d}, \frac{500\mu}{\rho d^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ d^2} \right] \quad (11)$$

onde D_ω^+ é calculado pela Equação 12; onde d é a distância entre a posição estudada no domínio e a parede mais próxima.

$$D_\omega^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial X_j} \frac{\partial \omega}{\partial X_j}, 10^{-10} \right] \quad (12)$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega} \right]} \quad (13)$$

onde α^* é o fator de amortecimento da viscosidade turbulenta, utilizado para corrigir o valor da mesma, para números de Reynolds baixos, dado pela Equação 14; $\alpha_1 = 0,31$:

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + \frac{Re_t}{R_k}}{1 + \frac{Re_t}{R_k}} \right) \quad (14)$$

sendo Re_t o número de Reynolds turbulento, calculado pela Equação 15, $R_k = 6$; $\alpha_\infty^* = 1$; α_0^* calculado pela Equação 16.

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (15)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (16)$$

onde

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} - (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (17)$$

sendo $\beta_{i,1} = 0,075$ e $\beta_{i,2} = 0,0828$.

O termo F_2 , da Equação 13, é outra função de acoplamento entre os modelos $k-\omega$ e $k-\varepsilon$, a qual é descrita como segue:

$$F_2 = \tanh(\theta_2^2) \quad (18)$$

onde

$$\theta_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega d}, \frac{500\mu}{\rho d^2 \omega} \right] \quad (19)$$

O termo S da Equação 13, é a magnitude da taxa de deformação do fluido e é dado pela Equação 20:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (20)$$

onde

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) \quad (21)$$

Geração de energia cinética turbulenta

O termo G_k da Equação 4 representa a produção de energia cinética turbulenta (k) esse termo pode ser definido como:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \quad (22)$$

Geração de dissipação de energia cinética turbulenta.

O termo G_ω , da Equação 5, representa a produção de ω , esse termo pode ser definido como:

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (23)$$

onde

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + \frac{Re_t}{R_\omega}}{1 + \frac{Re_t}{R_\omega}} \right) \quad (24)$$

sendo $R_\omega = 2,95$ e α_∞ definido pela Equação 25.

$$\alpha_{\infty} = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (25)$$

onde

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\lambda_x^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (26)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\lambda_x^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (27)$$

sendo $\lambda_x = 0,41$.

Dissipação de k

O termo Y_k , da Equação 4, representa a dissipação de k, o qual é calculado na Equação 28.

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (28)$$

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \xi^*] \quad (29)$$

Os termos β_i^* , ξ^* da Equação 29 são dados por:

$$\beta_i^* = \beta_{\infty}^* \left(\frac{\frac{4}{15} + \left(\frac{Re_t}{R_{\beta}}\right)^4}{1 + \left(\frac{Re_t}{R_{\beta}}\right)^4} \right) \quad (30)$$

sendo $\xi^* = 1,5$, $R_{\beta} = 8$, e $\beta_{\infty}^* = 0,09$.

Dissipação de ω

O termo Y_{ω} da Equação 5 representa a dissipação de ω , o qual é calculado na Equação 31.

$$Y_{\omega} = \rho \beta^* \omega^2 \quad (31)$$

4.2.1.2 Modelagem da transferência de calor

4.2.1.2.1 Convecção entre o HTF e as tubulações

Para modelagem da transferência de calor entre o fluido de troca térmica e as paredes dos tubos, bem como entre o PCM no estado líquido e as paredes das tubulações, foi aplicado o modelo de energia utilizado pelo Ansys FLUENT®, o qual trata a conservação da energia como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial X_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial X_j}\left[\gamma_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial X_j} + u_i(\tau_{ij})_{\text{eff}}\right] + W_h \quad (32)$$

onde T é temperatura, W_h é o termo fonte de energia, E (Equação 33) é a energia total e γ_{eff} é a condutividade térmica efetiva, descrita na Equação (35).

$$E = h - \frac{P}{\rho} + \frac{|u_i|^2}{2} \quad (33)$$

onde h é entalpia sensível definida por:

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (34)$$

sendo h_{ref} , T_{ref} , c_p a entalpia de referência, a temperatura de referência e o calor específico do fluido a pressão constante. No modo padrão do *software*, h_{ref} e T_{ref} são tomados como 0 J/Kg e 15 °C, respectivamente.

$$\gamma_{\text{eff}} = \gamma + \gamma_t \quad (35)$$

onde

$$\gamma_t = \frac{c_p \mu_t}{\sigma} \quad (36)$$

O termo $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ é o tensor de tensões de cisalhamento dado por:

$$(\tau_{ij})_{\text{eff}} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial X_k} \delta_{ij} \quad (37)$$

sendo

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (38)$$

4.2.1.2.2 Condução através das tubulações

Tratando-se da transferência de calor por condução através das tubulações e entre a parede do fluido e o PCM (estado sólido), a Equação 32 é rearranjada da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial X_i}[u_i \rho h] = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\gamma \frac{\partial T}{\partial X_j} \right] + W_h \quad (39)$$

4.2.1.2.2 Transferência de calor latente: Modelagem dos processos de Fusão-solidificação

Para solução do problema transiente de solidificação/fusão do PCM, foi utilizado o modelo de entalpia-porosidade desenvolvido por Voller e Prakash (1987). Nesta técnica, a interface sólido-líquido não é rastreada explicitamente, de modo que a fração de líquido calculada é quem indica a posição desta ao longo dos processos de mudança de fase. A transferência de calor no domínio do PCM, ocorre devido ao mecanismo de difusão térmica e devido a convecção natural que se dá em função da variação na densidade material que é função da variação da temperatura e do processo de mudança de fase.

A fração de líquido (ψ) é computada para cada célula, em cada iteração, a partir do balanço de entalpia, de modo que, ao longo do domínio, pode-se ter as seguintes condições:

$\psi_m = 1$: A célula m está totalmente preenchida com líquido.

$\psi_m = 0$: A célula m não tem nenhuma região preenchida por líquido.

$0 < \psi_m < 1$: A célula m encontra-se na zona de transição sólido-líquido.

A região de transição (pastosa) entre as duas fases é modelada como uma região “pseudo” porosa, na qual a porosidade decresce de 1 a 0, à medida que o material solidifica. A equação da energia para transição de fase utilizada no modelo é descrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \frac{\partial}{\partial X_i}(u_i \rho H) = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\gamma \frac{\partial T}{\partial X_j} \right] + S_h \quad (40)$$

onde H é a entalpia total do material, computada como a soma da entalpia sensível, h, e da variação entalpia latente do material, descrita na Equação 41.

$$H = h + \Delta H \quad (41)$$

A fração de líquido é calculada da seguinte forma:

$$\psi = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ 1 & \text{se } T > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{se } T_s < T < T_l \end{cases} \quad (42)$$

onde T_s é a temperatura de solidificação do material e T_l é a temperatura em que todo o material se encontra no estado líquido. O termo referente a variação de entalpia da Equação 41 é calculada como segue.

$$\Delta H = \psi L \quad (43)$$

Desta forma, o ΔH pode variar desde zero (material totalmente solidificado) até L (calor latente de fusão) quando o material se encontra totalmente na fase líquida.

A densidade (ρ) do PCM é calculada pela Equação 44. Esta equação acopla o modelo de convecção natural de Boussinesq (ANSYS, 2015), para $T \geq T_l$, com uma função de mistura, para $T_l \geq T \geq T_s$. Caso o material esteja abaixo de T_s a densidade permanece constante em ρ_s .

$$\rho = \begin{cases} \rho_l [1 - \eta(T - T_l)] & \text{se } T \geq T_l \\ \rho_l \psi + (1 - \psi)\rho_s & \text{se } T_l \geq T \geq T_s \\ \rho_s & \text{se } T_s \geq T \end{cases} \quad (44)$$

onde ρ_s e ρ_l são as densidades do material no estado sólido e líquido, respectivamente e η é coeficiente de expansão térmica

4.2.2 Condições de Contorno

4.2.2.1 Fluxo mássico

Defini-se o fluxo de mássico na entrada do HTF. A especificação do fluxo mássico, permite que a pressão total varie, em resposta à solução numérica. Nesta condição de contorno, foram estabelecidos, o sistema de referência absoluto, a direção do fluxo, normal a superfície de entrada, a intensidade de turbulência I (Equação 45), de 5% e a razão de viscosidade turbulenta R_μ (Equação 46), de 10.

$$I \equiv \frac{u'}{\bar{u}} \quad (45)$$

sendo u' a flutuação da velocidade de entrada e \bar{u} a velocidade média.

$$R_\mu = \frac{\mu_t}{\mu} \quad (46)$$

4.2.2.2 Outflow

Condições de contorno *outflow* são obedecidas, em escoamentos completamente desenvolvidos. Estas, modelam as saídas de um fluxo onde os detalhes da velocidade, pressão e temperatura não são conhecidos, antes de resolver o problema numérico. Neste caso, o *solver* do software Ansys FLUENT[®] extrapola as informações necessárias, a partir das condições no interior do domínio físico. Duas características principais são ativadas no *solver* na medida que as condições de contorno *outflow* são habilitadas: (1) Fluxo difusivo nulo, o que significa que as condições da saída são extrapoladas a partir do domínio interno e que estas condições não têm influência sobre o fluxo a montante e (2) Para todas as variáveis de fluxo, é feita uma correção geral do balanço de massa.

4.2.2.3 Condição de parede

As condições da parede são usadas para ligar as regiões fluida e sólida e para tratar o isolamento nas superfícies externas do trocador HTF. Condições de contorno de não-deslizamento foram aplicadas nas paredes das tubulações e nas superfícies fluidas dos domínios, às quais são tomadas como superfícies estacionárias com rugosidade desprezível.

Quanto a transferência de calor, tem-se duas condições distintas: fluxo nulo, para as superfícies externa do domínio do HTF e a condição de acoplamento (*coupled*) para as interfaces sólido-líquido, existentes entre a superfície externa do tubo intermediário e interna do tubo interno com HTF, bem como, entre a superfície interna do tubo intermediário e externa do tubo interno com o PCM. Com esta condição, o fluxo de calor é calculado nas interfaces, em função das temperaturas das células vizinhas, de ambos os domínios. O Quadro 4.1 descreve as regiões limites do problema físico e suas respectivas condições de contorno.

Quadro 4.1 - Condições de contorno

Regiões	Condição de contorno
Entrada do trocador	Fluxo mássico
Saída do trocador de calor	Outflow
Superfície externa do HTF	Parede com fluxo de calor nulo
Superfície interna tubo interno-HTF	Parede acoplada
Superfície interna tubo intermediário-PCM	Parede acoplada
Superfície externa tubo interno-PCM	Parede acoplada
Superfície externa tubo intermediário HTF	Parede acoplada
Extremidades das tubulações e PCM e HTF	Parede com fluxo de calor nulo

4.2.3 Métodos de solução numérica

4.2.3.1 Acoplamento pressão velocidade

SIMPLE

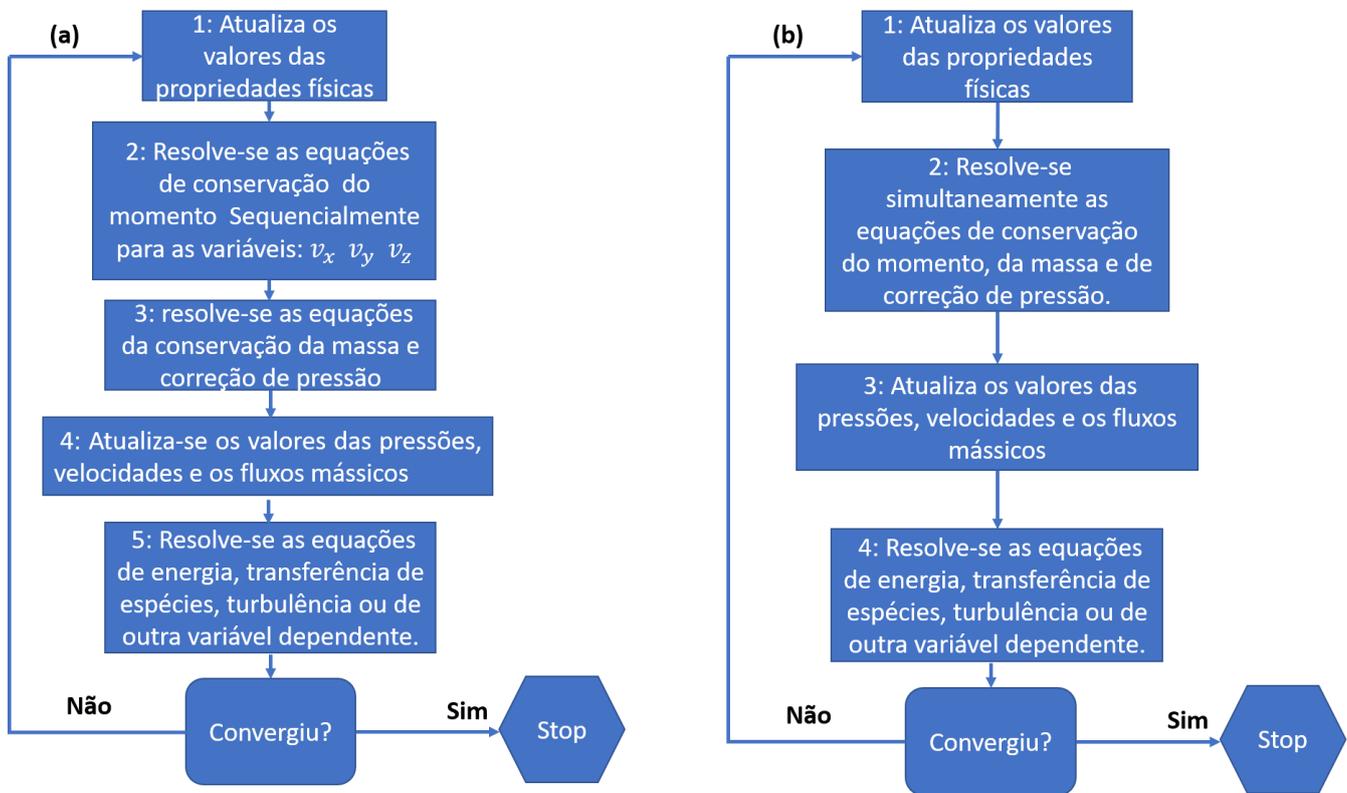
O algoritmo SIMPLE, utiliza uma relação entre velocidade e uma equação de correção de pressão, para atender os critérios de conservação da massa e obter o campo de pressão desejado. A equação de conservação do momento linear é resolvida com um “chute” no campo de pressão, com qual são calculadas as distribuições de velocidades, se o resultado obtido, apresenta diferenças maiores que o critério de convergência para conservação da massa, a pressão é corrigida em função dessa diferença e novamente a equação do momento é calculada, até que os critérios de convergência sejam obtidos.

COUPLED

O algoritmo *Coupled*, resolve as equações de continuidade, baseadas nos resultados do cálculo da conservação do momento e da pressão, de forma acoplada, o que lhe confere em relação aos algoritmos de solução segregada como o SIMPLE, um alcance de convergência com um número menor de iterações. O mesmo, também se mostra mais estável que os métodos segregados. Desta forma, recomenda-se o uso deste método de solução, quando a qualidade da malha é ruim, ou quando vários passos de tempo são utilizados para resolução de um problema transiente. Observou-

se que o tempo por iteração em um caso utilizando o algoritmo *Coupled* é maior que o relativo ao algoritmo *SIMPLE*, mas promove uma redução do erro por iteração mais acentuada. A Figura 4.16, ilustra os fluxogramas de solução para os métodos *Coupled* e *SIMPLE*.

Figura 4.16 - Fluxogramas dos métodos de solução segregada *SIMPLE* (a) a acoplada *Coupled* (b)



4.2.3.2 Interpolação espacial

Para se obter a solução numérica das equações de conservação apresentadas, faz-se necessária a discretização ou truncamento das equações parciais, que trabalham dentro de limites diferenciais, em equações algébricas, definidas para os limites finitos tridimensionais da malha numérica. Tem-se, portanto, para a variável genérica Φ a discretização da Equação geral de transporte:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} V + \sum_{f=1}^{N_f} \rho_f \Phi_f \vec{u}_f \vec{A}_f = \sum_{f=1}^{N_f} \varphi_{\Phi_f} \nabla \Phi_f \cdot \vec{A}_f + W_{\Phi} V \quad (47)$$

onde φ_Φ é o termo geral relativo as propriedades físicas, características de cada equação de conservação, \vec{A}_f é o vetor área correspondente as faces (f), W_Φ é o termo fonte por unidade de volume (V) e N_f o número de faces da respectiva célula, em que se analisa a equação conservativa. Conhecendo-se o valor da variável Φ nos centroides ($c_0, c_1..c_n$) das células e os seus valores (Φ_f) nas faces, pode-se obter soluções das equações de conservação, ao longo do espaço físico. Foram utilizados os métodos *Least Squares Cell-Based* (ANDERSON & BONHAUS, 1994) para determinação do gradiente $\nabla\Phi$, o método *Quadratic Upwind Implicit Differencing Convective Kinematics-QUICK* (LEONARD & MOKHTARI, 1990) para discretização das equações de momento linear e geração de energia cinética turbulenta, o método *Upwind* de primeira e segunda ordem (BARTH & JESPERSEN, 1989) para discretização das equações de dissipação da energia cinética turbulenta e da energia térmica, respectivamente e o método *PRESTO!* (ANSYS, 2015) para discretização da pressão.

4.2.3.3 Interpolação temporal

O método de discretização temporal implícito de segunda ordem, foi utilizado nas simulações. Na Equação 48, as variáveis discretizadas em relação ao espaço, variáveis na vizinhança da célula central, são tratadas no tempo futuro ou posterior. Evidentemente, estes valores no tempo futuro, são valores iterativos, que partem de um chute inicial, são calculados pelas referidas equações, comparados com seus valores anteriores e quando as diferenças entre estes valores atingem um critério de convergência, os mesmos são atualizados no tempo futuro. Desta forma, obtém-se o comportamento transiente das equações de conservação. Em outras palavras, obtém-se os campos vetoriais da variável Φ , dentro do domínio geométrico, no decorrer do tempo, como descrito na Equação 49. A vantagem do método implícito é que o mesmo é incondicionalmente estável, devido o processo iterativo utilizado no seu cálculo.

$$\frac{3\Phi^{n+1} - 4\Phi^n + \Phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\Phi^{n+1}) \quad (48)$$

$$\Phi^{n+1} = \frac{(2F(\Phi^{n+1})\Delta t + 4\Phi^n - \Phi^{n-1})}{3} \quad (49)$$

onde $F(\Phi)$ incorpora todas as discretizações espaciais, Φ^{n+1} refere-se ao valor da variável Φ , na posição central, no passo de tempo futuro, Φ^n , no passo de tempo atual e Φ^{n-1} no passo de tempo anterior.

4.2.3.4 Estratégias de simulação

Dado ao elevado tempo de simulação, necessário para, com as malhas relativamente densas que foram descritas, simular o processo transiente de fusão e solidificação dos PCM, foram adotadas algumas estratégias de simulação para que se fossem atingidas as convergências das equações, dentro intervalos de tempo reduzidos:

- Inicialmente os casos foram rodados em regime permanente, com acoplamento pressão-velocidade *Coupled*, sem estarem habilitados os modelos de Energia e mudança de fase. Essa medida permitiu que os campos de pressão e velocidades, no escoamento do HTF, fossem estabelecidos previamente. À medida que o processo em regime permanente atingia a convergência, os resultados fluidodinâmicos eram utilizados, como condição inicial para a simulação transiente, com os modelos de energia e mudança de fase habilitados.
- Acabado o processo de fusão do PCM, os campos de pressão, temperatura, velocidade e frações de líquido, são utilizados como condição inicial dos processos de solidificação. Passa-se, portanto, a injetar o CHTF no trocador, o qual se mistura com o HHTF, inicialmente contido no trocador. Após um dado intervalo de tempo, o fluido quente é totalmente repellido do sistema e dar-se seguimento ao processo de solidificação. Numericamente, esta etapa representou instabilidades que foram controladas com a redução no passo de tempo de 0,5 para 0,005s durante os primeiros 40s do processo de solidificação. Devido a esta redução, acarretar um aumento significativo no tempo de simulação total, foi testado a utilização do algoritmo *SIMPLE* ao invés do *Coupled* durante esta etapa, o que possibilitou maior rapidez ao processo, que já apresentava uma estabilidade, antes garantida pelo método *Coupled*, agora garantida devido ao pequeno passo de tempo utilizado. Após os 40s iniciais, o passo de tempo foi aumentado para 0,25s, o qual foi mantido até o fim do processo de solidificação.

4.2.3.5 Fatores de Relaxação

Devido a não linearidade das equações de conservação, o *solver* utiliza fatores de relaxação para controlar as mudanças nas variáveis, ao longo das iterações realizadas, tanto em problemas resolvidos no regime permanente, quanto dentro de cada passo de tempo, dos casos transientes.

Como descrito na Equação 50, o valor atualizado da variável genérica Φ , dentro do passo de tempo, é dependente do valor da iteração anterior Φ_0 , da diferença calculada na iteração $\Delta\Phi$ e do fator de relaxação ζ . Esses fatores, são inseridos nas equações de conservação e promovem estabilidade na solução das mesmas. Os fatores de relaxação, utilizados nos métodos de acoplamento pressão velocidade *SIMPLE* e *Coupled* são ilustrados na Tabela 4.2.

$$\Phi^n = \Phi^{n-1} + \zeta\Delta\Phi \quad (50)$$

Tabela 4.3 - Fatores de relaxação

Fatores de relaxação	SIMPLE	Coupled
Densidade	1	1
Forças de corpo	1	1
Energia cinética turbulenta	0,8	0,8
Taxa de dissipação de turbulência	0,8	0,8
Viscosidade turbulenta	1	1
Fração de líquido	0,9	0,9
Energia	1	1
Momentum	0,7	0,75
Pressão	0,3	0,75
Número de Courant	-	200

4.2.3.6 Critérios de convergência

Os critérios de convergência utilizados nas simulações são descritos no Tabela 4.3.

Tabela 4.4 - Critérios de convergência utilizados

Equações de conservação	Critério de convergência
Velocidades nas direções x, y e z	0,001
Continuidade	0,001
k	0,001
ω	0,001
Energia	0,00001

4.2.4 Propriedades Físicas

As propriedades físicas dos materiais utilizadas nas simulações são descritas na Tabela 4.5.

Tabela 4. 5 - Propriedades físicas dos materiais

Propriedades físicas	RT-82	Cobre	Água
Densidade (kg/m ³)	950 (s)/ 870 (l)	8978	998,2
C _p (kJ/kg.K)	2000	381	4182
γ (W/m.K)	0,2	387,6	0.6
μ (Pa. s)	0,03499	-	0,001003
L (kJ/kg)	201643,8	-	-
T _s (K)	343,2775	-	-
T _l (K)	355,3263	-	-

4.2.5 Casos estudados

Os casos que foram estudados ao longo de toda a pesquisa, estão descritos na Tabela 4.5. Sendo caracterizados com as condições: (1) Área (área total de troca térmica, a saber, a soma das áreas interna do tubo intermediário e externa do tubo interno); (2) \dot{m} (fluxo mássico na entrada das tubulações do TTHX); (3) T_{HTF_F} (temperatura do HTF na entrada do trocador para o processo de fusão); (3) T_{HTF_S} (temperatura do HTF na entrada do trocador para o processo de solidificação); Malha (a malha utilizada, referida na Tabela 4.2); (5) Δt_f (O passo de tempo utilizado para o processo de fusão) (6) Δt_s (O passo de tempo utilizado para o processo de solidificação); (6) T_{HTF} (Temperatura inicial do domínio referente ao HTF); (7) T_{PCM} (Temperatura inicial no domínio referente PCM e tubulações, podendo no processo de solidificação a mesma iniciar com a condição final da fusão, T_{FF}) .

Tabela 4. 6 - Casos estudados na pesquisa

Casos	Área (mm ²)	Condição de entrada do HTF			Malha	Δt_f (s)	Δt_s (s)	Condição inicial			
		\dot{m} (L/min)	T _{HTF_F} (°C)	T _{HTF_S} (°C)				fusão		solidif.	
								T _{HTF} (°C)	T _{PCM} (°C)	T _{HTF} (°C)	T _{PCM} (°C)
1	308832	8,3	90	68	1	0,5	0,25	90	27	68	93
2	308832	8,3	90	68	2	0,5	-	90	27	68	93
3	308832	8,3	90	68	1	0,1	-	90	27	68	93
4	308832	8,3	90	68	1	1	-	90	27	68	93
5	1228023,6	8,3	90	68	3	0,5	0,25	90	27	68	93

CAPÍTULO V

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões, de acordo com a metodologia do Capítulo IV, referentes aos casos de 1 a 5, descritos na Tabela 4.5.

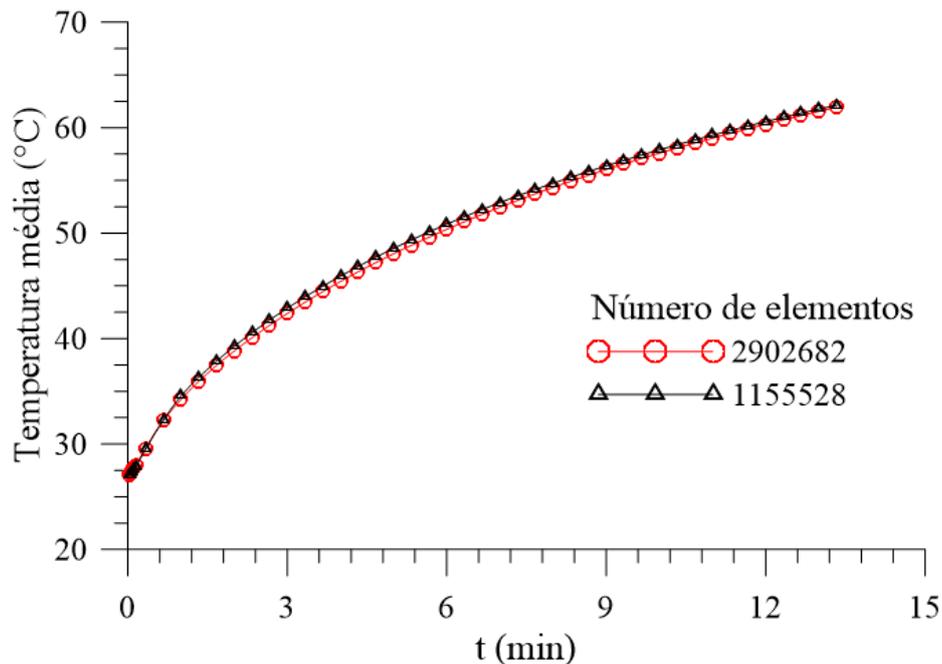
5.0 Resultados e Discussões

5.1 Estudo de malha

Para se alcançar resultados coerentes em CFD, é necessário realizar um estudo de malha, o qual deve comparar resultados obtidos com malhas mais refinadas, com resultados de outras menos refinadas, de modo que se encontre a independência em relação ao número de elementos ou convergência de malha. Tomando-se para tanto a configuração geométrica de aletas número 1 (Figura 4.9) foram analisados os resultados para 2 malhas, uma com 1155528 elementos e outra com 2902682.

Observa-se, na Figura 5.1, a evolução do perfil transiente de temperatura média, ao longo do processo de fusão, medido na seção do PCM, localizada em $z = 100$ mm da entrada ($z = 0$ mm) do TTHX.

Figura 5.1 - Temperatura média a 100 mm da entrada



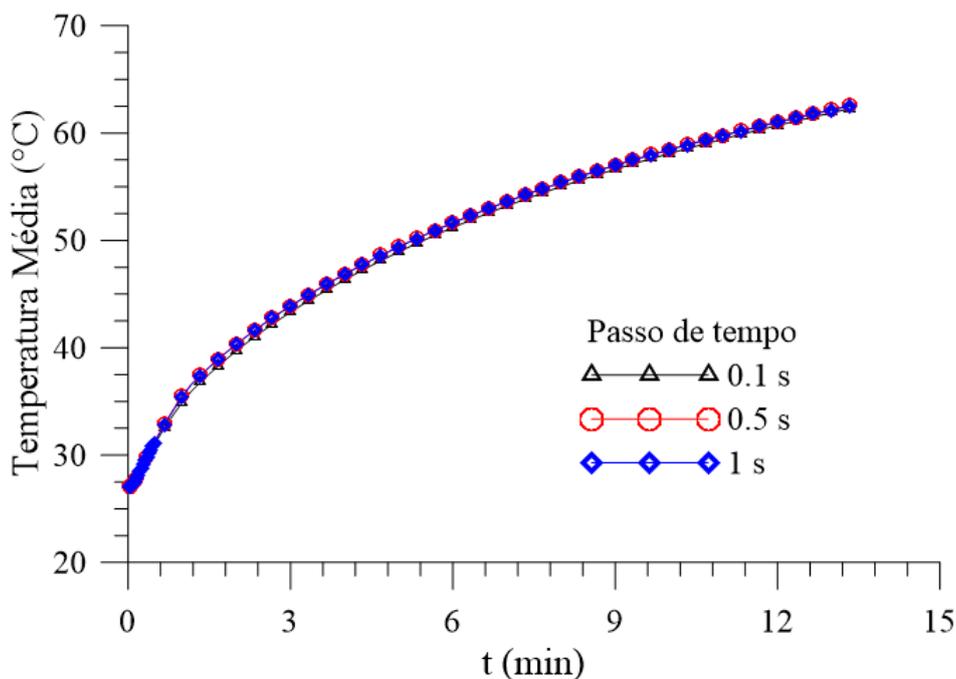
Pode-se constatar, que os resultados referentes a malha 1 (1155528 elementos) e 2 (2902682 elementos) não apresentaram variações significativas, ao passo que uma diferença de 32,49 h, no tempo computacional, foi relatada para as simulações destas malhas. Esse resultado, significa que a

independência quanto ao número de elementos de malha, foi atingida a partir da malha 1, a qual foi selecionada e utilizada como referência para confecção da malha proposta na configuração geométrica 2, correspondente a malha 3 (Tabela 4.2) com 1823647 elementos. Dado ao fato da malha 3 apresentar parâmetros de qualidade muito próximos das malhas 1 e 2, e um número de elementos superior a malha 1, a mesma foi considerada como adequada ao limite de convergência encontrado.

5.2 Estudo de passo de tempo

No mesmo sentido da análise de independência de malha, foi verificada a influência do passo de tempo para a os resultados de temperatura média tomada a 100 mm da seção de entrada do TTHX. Foram simulados casos com o passo de tempo de 0,1, 0,5 e 1, para o processo de fusão, e os resultados estão ilustrados na Figura 5.2. Observa-se que, a partir de 1s, pode-se considerar que os resultados permanecem inalterados quanto ao passo de tempo. Isto é, não existem variações significativas, entre os resultados obtidos para os três passos de tempo. No entanto, quando no processo de solidificação, passos de tempo superiores a 0,25 s apresentaram problemas de instabilidade numérica.

Figura 5.2 - Temperatura média a 100 mm da entrada do TTHX para diferentes passos de tempo



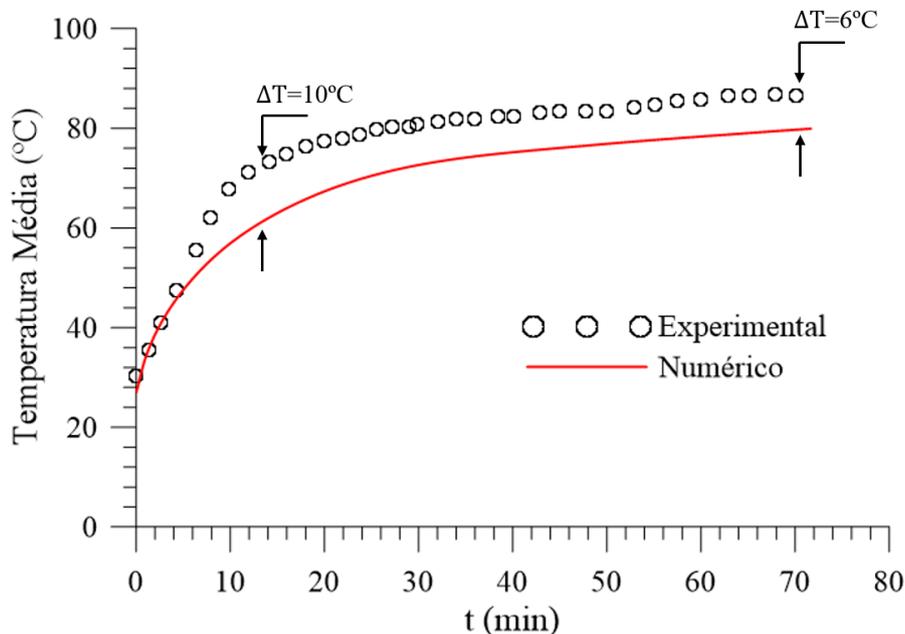
Adicionalmente, nos instantes iniciais (cerca de 40 s) da solidificação, quando passa-se a injetar fluido frio no TTHX, o passo de tempo teve que ser reduzido para 0,005 s, para que as misturas entre o HHTF, presente no trocador no final da fusão e o CHTF, sendo injetado no trocador, acontecessem de maneira fisicamente coerentes. Do contrário, valores de temperatura inferiores à

temperatura do CHTF eram observados nos resultados, o que é uma incoerência física. Diante do exposto, foram escolhidos os passos de tempo de 0,5 s para o processo de fusão, 0,005 s para os 40 s iniciais do processo de solidificação e 0,25 s para o restante do mesmo.

5.3 Validação

Para validação dos resultados apresentados neste trabalho, os mesmos foram comparados com resultados experimentais apresentados por Al-abidi et al. (2014) e Al-abidi et al. (2013b). Nestes trabalhos, foi utilizado um TTHX com as mesmas dimensões tratadas na configuração 1, utilizando a parafina RT82 como PCM. Este trocador de calor foi ilustrado na Figura 2.8.

Figura 5.3 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para temperatura média do PCM a 100 mm da face entrada do TTHX- Processo de Fusão

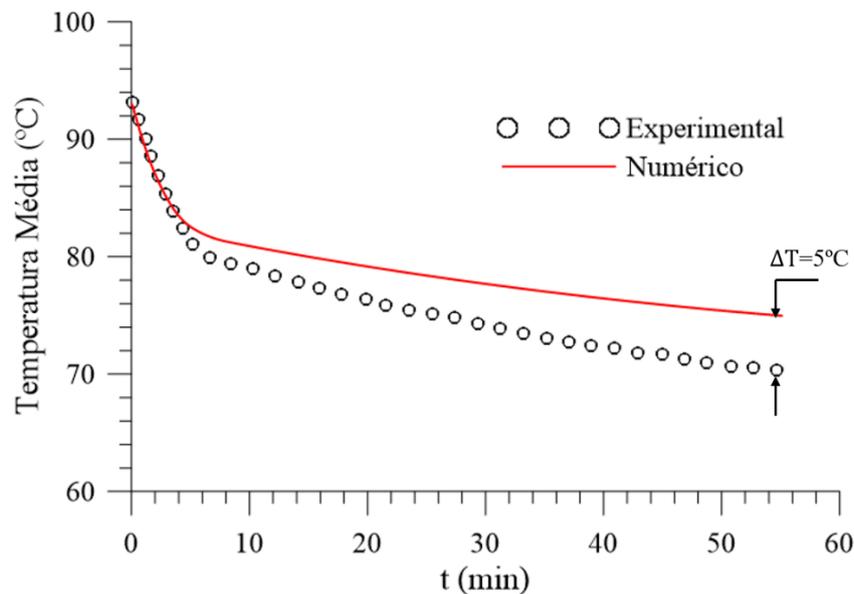


Nas Figuras 5.3 e 5.4, ilustram os resultados para a temperatura média tomada a 100 mm da seção de entrada do TTHX, respectivamente, ao longo dos processos de fusão e solidificação. Observa-se que os resultados numéricos reproduzem bem, a tendência dos resultados experimentais, tanto na carga quanto na descarga do material de mudança de fase.

No processo de fusão, o erro máximo foi de 10,22°C (16,32 %) e o erro médio foi de 6,22°C (9,14%). Já para a solidificação, o erro máximo de foi de 5,02°C (7,17%) e o erro médio de 3,09°C (4,2%). Dado as várias simplificações utilizadas e as próprias medições experimentais, sujeitas a

erros de precisão, pode-se concluir, com boa aproximação, que os resultados numéricos estão validados experimentalmente.

Figura 5.4 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para temperatura média do PCM a 100mm da face entrada do TTHX- Processo de Solidificação



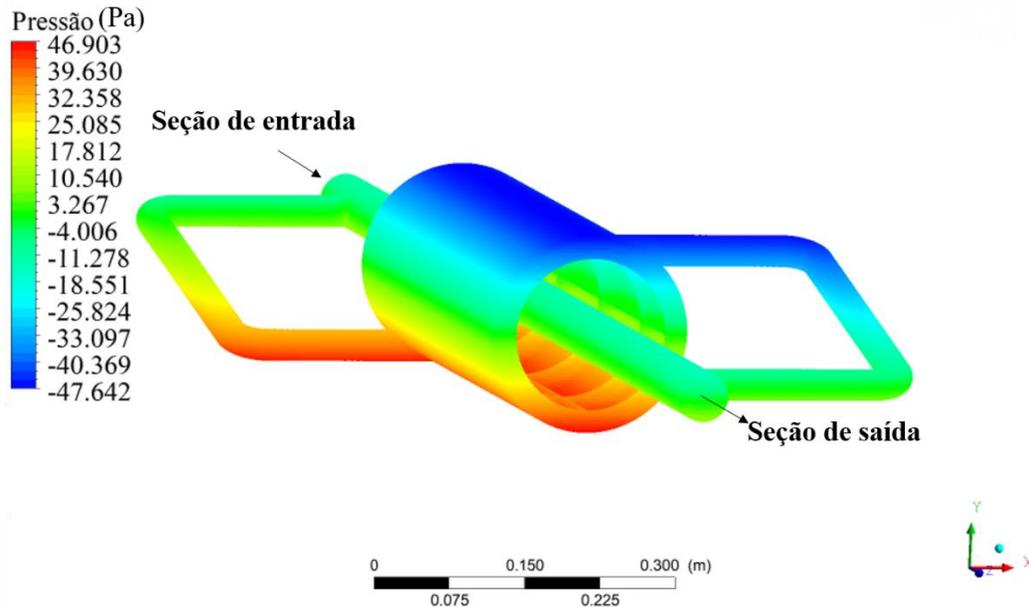
5.4 Resultados qualitativos

Trata-se nesta seção, dos resultados qualitativos do problema físico estudado. Este tipo de resultado, se propõe a apresentar e discutir, por meio de distribuições das variáveis pressão, velocidade, temperatura e fração de líquido ao longo dos domínios, correspondentes ao comportamento transiente da operação do TTHX. Estes resultados se resumem a configuração geométrica 2 (Figura 4.9), a qual é proposta nesta pesquisa. Na seção 5.5, referente aos resultados quantitativos foram comparadas as duas configurações.

5.4.1.1 Pressão no HTF

Na Figura 5.5, observa-se o campo de pressão desenvolvido para o fluido de troca térmica. Observa-se que o intervalo de pressões, ocorre predominantemente devido a estrutura geométrica do trocador, na qual o HTF é injetado na parte inferior-direita do anular, compreendido entre os tubos externo e intermediário e expelido pela região superior-esquerda, da mesma geometria. Com a gravidade, estabelecida no sentido negativo do eixo y, observa-se uma linha de pressão nula ao longo do eixo do TTHX. Regiões inferiores a esta linha, apresentam pressão positiva (entre 0 e 46,9 Pa), no mesmo sentido da gravidade, enquanto que regiões acima da linha apresentam valores negativos de pressão (entre 0 e -47,642 Pa), pois o fluxo nessa direção está no sentido oposto à gravidade.

Figura 5.5 - Distribuição de Pressão no HTF



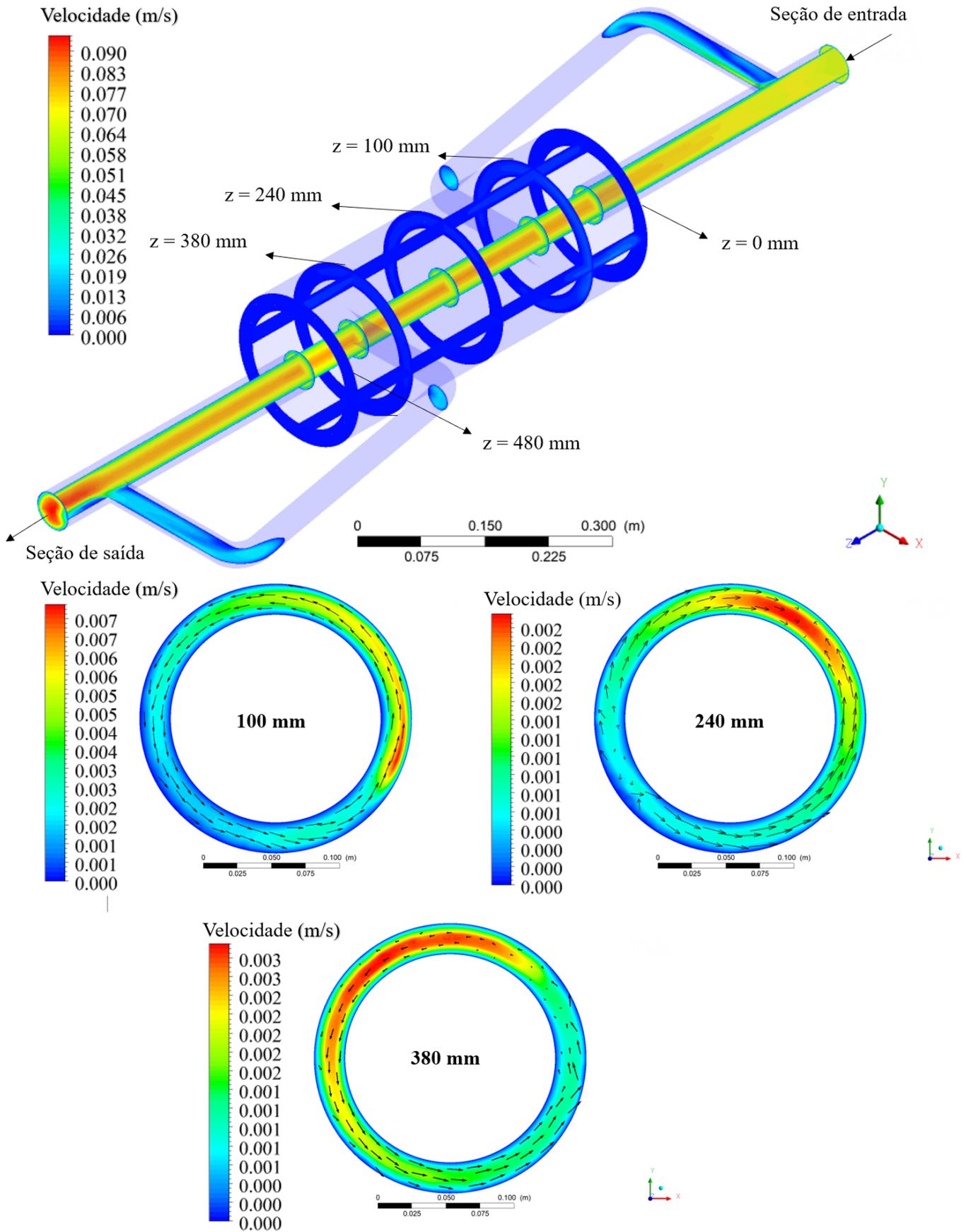
Como foi explicado na seção 4.2.3.4, antes de iniciar, o processo transiente de fusão, foi simulado, em regime permanente, apenas o processo fluidodinâmico para o HTF, de modo a se obter os níveis de pressão e velocidade, em regime permanente, para este domínio e utilizar os resultados como condição inicial, no regime transiente. Apenas as transformações térmicas, devido a transferência de calor por convecção entre o fluido de trabalho e o PCM e a variações fluidodinâmicas no volume de PCM, quando o mesmo se encontra na região de transição de fases, são desenvolvidas durante o processo transiente. O HTF é aquecido e resfriado a níveis que não alteram as condições fluidodinâmicas do seu escoamento, mantendo a distribuição de pressão em regime permanente, ao longo dos processos de fusão e solidificação.

5.4.1.2 Velocidade no HTF

A Figura 5.6, ilustra as distribuições de velocidades para o fluido de troca térmica. A vista isométrica desta figura está avaliada em uma faixa global, com valores de velocidades entre 0 e 0,0097 m/s e os planos de referência tomados ao longo do comprimento da região anular externa do trocador a 100, 240 e 380 mm da face de entrada do TTHX, são avaliadas variações locais de velocidade, os quais também apresentam vetores que ilustram as direções do escoamento.

Devido a diferenças nos valores das velocidades locais, relativas ao anular externo e ao tubo interno do trocador, pode-se constatar que existe uma maior resistência ao fluido ser direcionado para região externa. Isto se dá devido a configuração geométrica das tubulações.

Figura 5.6 - Distribuição de velocidades para o HTF



A junta tubular em T, existente à 50 mm da entrada do HTF, ramificando a linha principal (50,8 mm de diâmetro) na direção perpendicular, com uma tubulação de 32 mm de diâmetro, desfavorece o desvio do fluido para região externa do TTHX. Observa-se que os máximos níveis de velocidade nas regiões do anular externo, 0,007 m/s, são cerca de 13 vezes menores que os valores máximos de velocidade encontrados na região compreendida pelo tubo interno, 0,097 m/s.

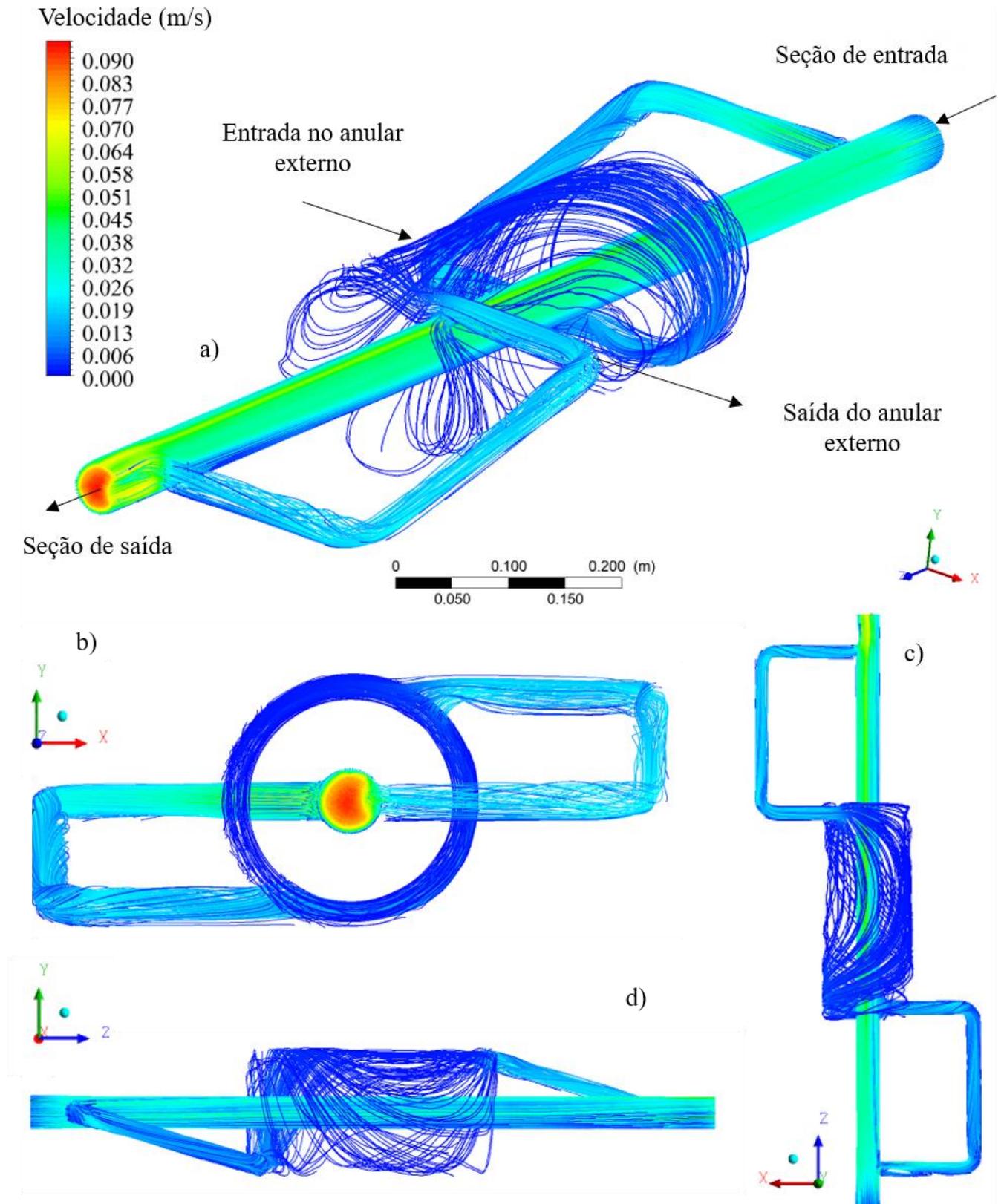
Comparando os campos de velocidades locais da Figura 5.6, pode-se constatar que os níveis desta variável decrescem, à medida que os planos são tomados na direção positiva de z. Isto se dá devido a distância destes planos em relação a injeção de fluido e a própria conversão da pressão de injeção em movimento turbilhonar, fazendo com que o HTF na saída do anular externo, apresente baixos níveis de pressão.

No plano a 100 mm da face de entrada do TTHX, tem-se os vetores indicando um fluxo no sentido anti-horário, já no plano a 240 mm, os vetores indicam um escoamento em sentido horário na região superior do anular e o sentido anti-horário na região inferior; Tanto no plano a 240 mm como a 380 mm, observa-se regiões com vetores apontados para várias direções, indicando uma espécie de movimento caótico, o que ocorre devido à proximidade com a seção de saída do trocador.

Na Figura 5.7 tem-se as linhas de corrente que descrevem a trajetória do HTF dentro do trocador de calor. Deve-se ressaltar, que o posicionamento tangencial das tubulações em relação ao anular externo, promove o escoamento turbilhonar, que irá depender da velocidade ou vazão na entrada do anular, desde a entrada até saída deste volume. A força de pressão que introduz o fluido nesta região é convertida em forças centrífugas, devido as paredes curvas do espaço anular.

Pode-se observar que a injeção do fluido na região inferior do anular e saída na região superior, faz com que, a partir da metade do comprimento desta região, o HTF seja deslocado nos sentidos horário e anti-horário em direção a saída, o que promove as direções e sentidos dos vetores descritos na Figura 5.6. O movimento turbilhonar foi quebrado devido a posição do tubo de saída do anular. Caso a retirada de fluido fosse posicionada no mesmo lado da entrada, o fluxo turbilhonar seguiria até a saída. Como foi observado nas seções que analisam a transferência de calor, essa característica promove variações assimétricas nas distribuições de temperatura e fração de líquido no PCM, fazendo com que as regiões alocadas na metade esquerda do volume de PCM, que troca calor com o HTF que escoam com os mais baixos níveis de velocidade descritos no anular externo, apresente níveis de fusão e solidificação reduzidos, quando comparados ao restante do volume do PCM.

Figura 5.7 - Linhas de corrente com níveis de velocidades nas vistas a) Isométrica b) Frontal c) Superior e d) Lateral



5.4.1.3 Processo de Fusão

Nesta seção, analisou-se os resultados qualitativos, referentes a fusão do PCM: distribuição de temperaturas, frações de líquido, pressão e velocidades.

5.4.1.3.1 Distribuição de temperaturas

Nas Figuras 5.8 a 5.11 observa-se, de maneira conjunta, as distribuições de temperatura para o fluido de aquecimento, as tubulações e o PCM, para quatro instantes específicos do processo de fusão, a saber, quando a fração de líquido no volume do PCM corresponde a 10 (785 s), 50 (1885 s), 80 (2915 s) e 100% (4375 s). Os cinco planos já especificados, ao longo do comprimento do trocador de calor, são analisados, além da vista isométrica, do problema físico inteiro.

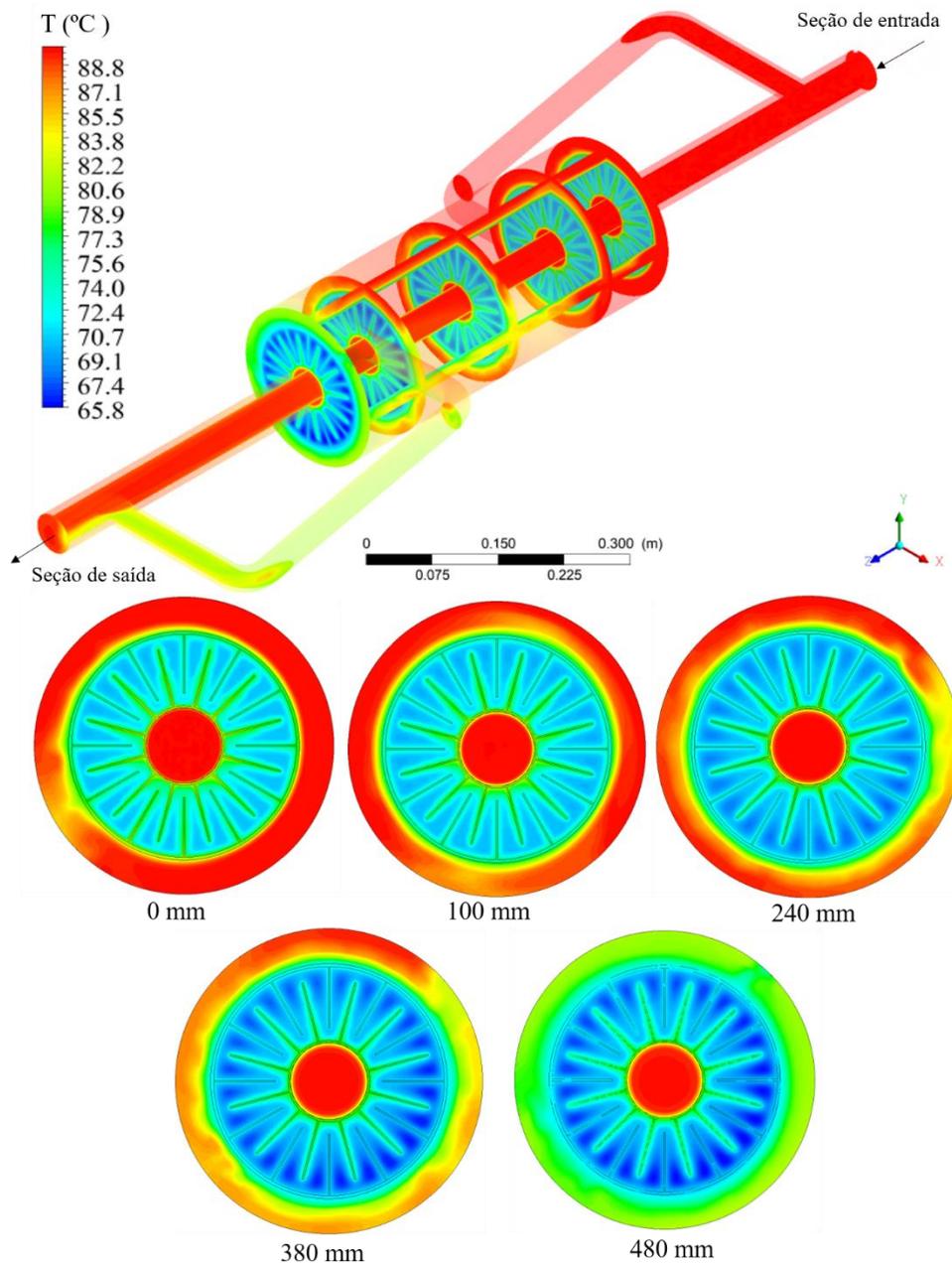
Primeiramente, é possível observar a coerência física esperada no trocador de calor: o HHTF entra, com 90°C, nas entradas externa e interna do TTHX e sai do trocador, com temperaturas reduzidas, à medida que este libera energia térmica para o PCM, o qual aumenta gradativamente sua temperatura, até ser completamente fundido. Ao longo do comprimento do TTHX, o HHTF reduz sua temperatura, perdendo energia para as seções de entrada e aquecendo mais lentamente, as seções mais próximas a saída do trocador, as quais, são as últimas a fundir.

Na Figura 5.8, observa-se que o HHTF, que entra no trocador com 90°C, sai da região externa do domínio, com temperaturas, por volta de 80°C. Na região interna do HHTF, as temperaturas, apenas nas regiões muito próximas a superfície interna do tubo interno, são reduzidas de 90 para valores em torno de 85°C, indicando que a camada limite térmica nessa região, é muito fina. Diante disto, pode-se constatar que existem dois mecanismos importantes de transferência de calor, atuando no TTHX: na região externa ao anular do PCM, tem-se uma área de troca térmica e tempo de contato maiores entre HHTF e a parede da tubulação, o que leva o fluido de troca térmica a sair mais resfriado do anular externo do trocador. Na parte interna, no entanto, tem-se uma menor área de contato, mas níveis de velocidade relativamente mais altos, o que faz a transferência de calor por convecção, a partir da superfície interna do anular preenchido com PCM, ser mais intensa.

Ainda nesta figura, no domínio relativo ao PCM, observa-se as regiões próximas as aletas, aquecendo mais rapidamente, devido a elevada condutividade térmica do cobre. Observa-se, que nas seções localizadas a 0 e 100 mm da entrada do TTHX as temperaturas encontram-se entre 69 e 75°C, lembrando que as temperaturas do líquido e sólido do PCM são, respectivamente, 70 e 82°C, o que nos faz concluir, que o material nesses comprimentos, encontra-se na região de transição de

fases, enquanto para maiores parcelas do comprimento do PCM, o mesmo encontra-se na fase sólida, devido ao já mencionado. efeito de resfriamento no HHTF.

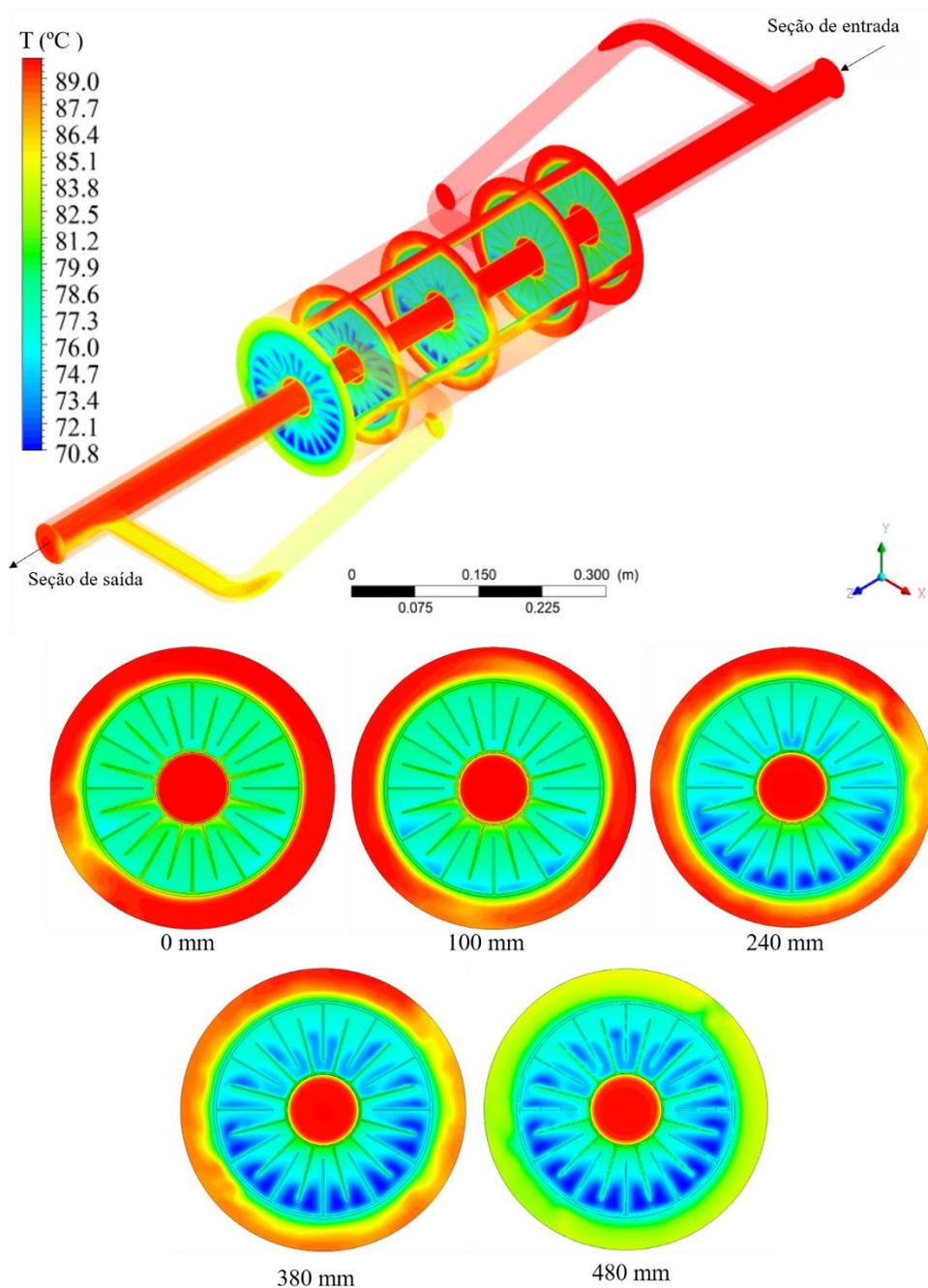
Figura 5.8 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 10% (785 s) do PCM fundido



Na Figura 5.9, observa-se o HHTF saindo mais aquecido, por volta de 85°C e 86°C, do anular externo e do tubo interno do TTHX, respectivamente. Isto se deve ao fato, de que, na medida que o PCM é aquecido, o gradiente de temperatura entre este e o HHTF é reduzido, de modo que a força motriz para transferência de calor vai sendo reduzida neste sentido. Em relação ao PCM, verifica-

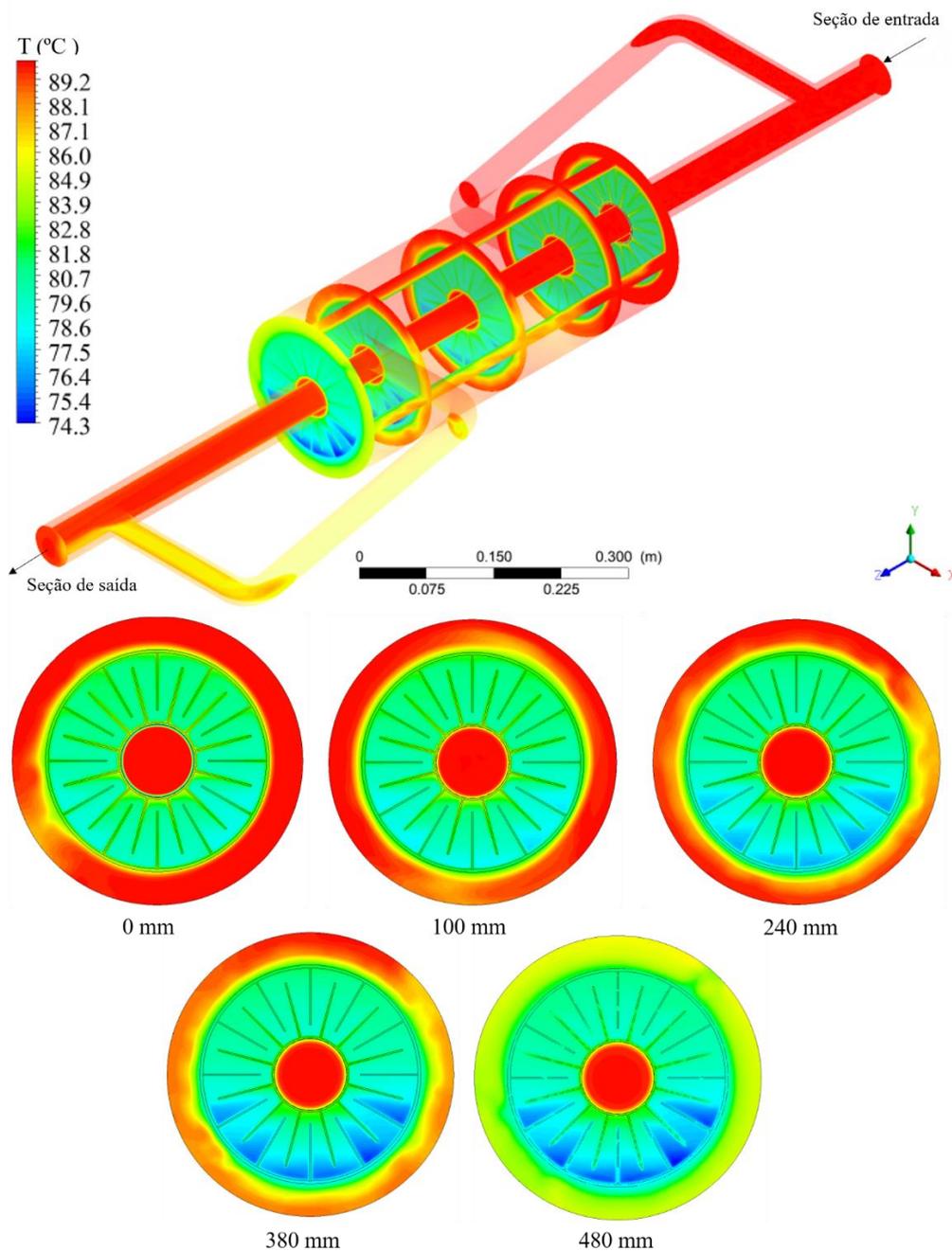
se que à medida que o mesmo se estende dos comprimentos de 100, 240, 380 e 480 mm da entrada, frações com mais baixas temperaturas são acumuladas na região inferior do anular. Isto se deve a redução nas densidades, relativas ao aumento de temperatura na parafina. Os fluidos mais aquecidos, são mais leves e tendem a se depositar nas regiões próximas superfícies inferiores do tubo interno e superiores do tubo intermediário, aglomerando as frações mais pesadas na nas proximidades face superior do tubo interno e inferior do intermediário, haja visto, que a própria geometria das aletas restringe os movimentos de ascensão das frações mais leves dentro no anular.

Figura 5.9 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 50% (1885 s) do PCM fundido



Para 80% do volume de PCM fundido (Figura 5.10) tem-se o HHTF sendo retirado do anular externo e do tubo interno do trocador, com temperaturas próximas a 87°C. Já para o PCM, observa-se que o mesmo se encontra, ao longo dos planos de análise, com temperaturas referentes a região de transição de fases e acima desta: até o comprimento de 100mm, é possível observar regiões do PCM próximas a asletas, com níveis de temperatura, acima da linha líquidos do material.

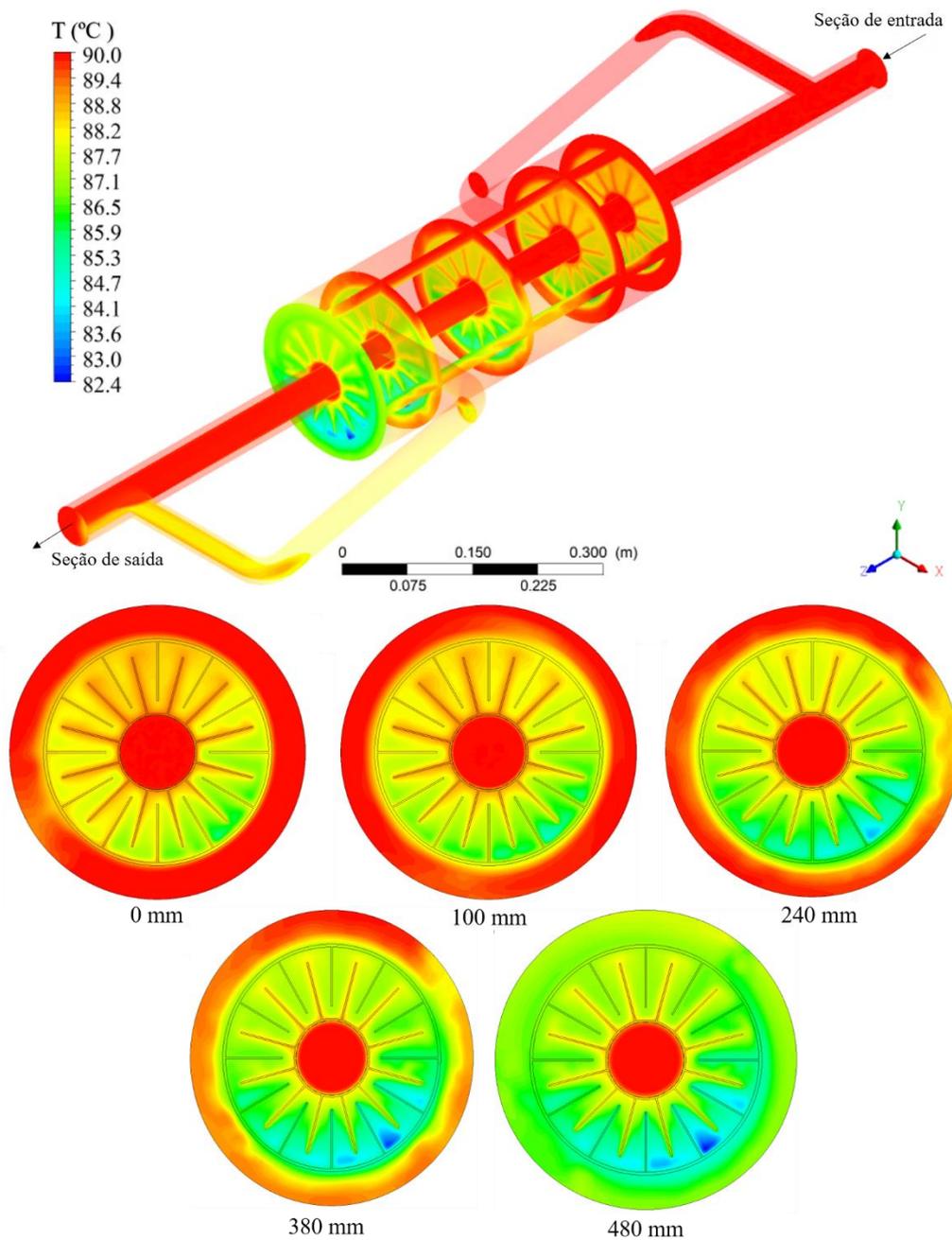
Figura 5.10 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 80% (2915 s) do PCM fundido



Estando o PCM com 100% do seu volume fundido, Figura 5.11, ilustra-se o HHTF saindo da região externa e interna do TTHX, com temperaturas próximas a 88°C e 89°C, respectivamente,

estando todos os planos, com o PCM acima da 82°C. Observa-se, que o tempo total do processo para o alcance de 100% de material líquido no trocador, está por volta de 4375 s (cerca 72,9 min).

Figura 5.11 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 100% (4375 s) do PCM fundido



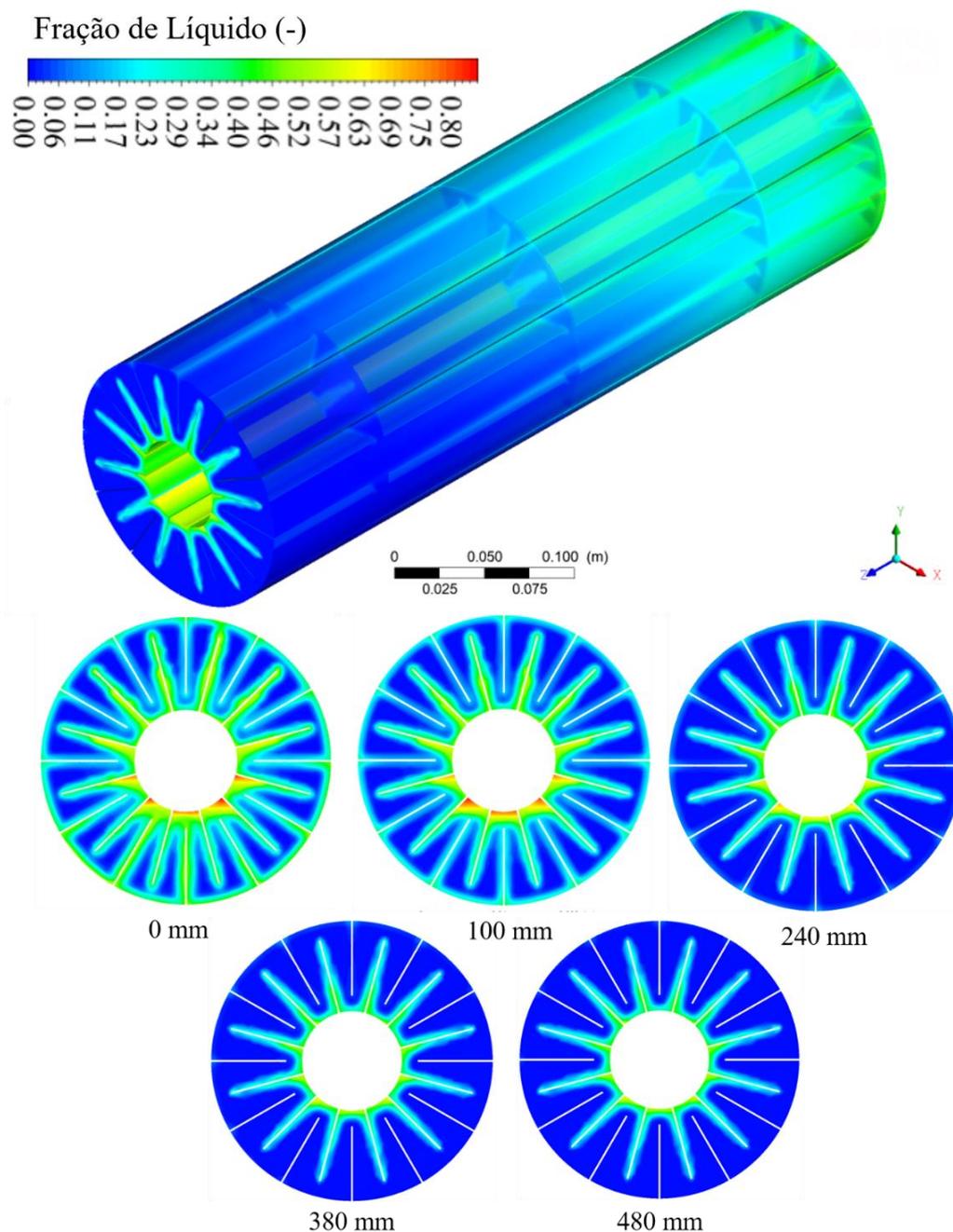
A depender das condições de aplicação do material, este tempo pode não se ajustar aos ciclos térmicos (carga e descarga) existentes. O mesmo pode ser carregado enquanto a energia térmica, proveniente da radiação solar, ainda estiver disponível, o que seria um desperdício de energia. No

sentido oposto, caso o tempo de energia disponível fosse menor que o tempo de fusão, o material não finalizaria o seu carregamento, ao longo deste intervalo, estaria sendo sub-utilizado.

5.4.1.3.2 Distribuição de fração de líquido

Nas Figura 5.12 a 5.15 tem-se as distribuições de frações de líquido ao longo do processo de fusão, com, respectivamente, 10, 50, 80 e 90% (3375 s) do volume do PCM fundido.

Figura 5.12 - Distribuição de fração de líquido do PCM 10% (785 s) do seu volume fundido



Observa-se na etapa referente a Figura 5.12, dentro de uma faixa de 0 a 80% de fração de líquido, as seguintes características: na entrada do TTHX (0 mm), as frações do PCM em contato com as aletas, tanto na superfície externa quanto interna ao anular preenchido com o PCM, encontram-se com frações de líquido diferentes de zero em sua estrutura. Observa-se o processo de acúmulo das frações mais leves, tons mais avermelhados, nas regiões próximas a face inferior da superfície interna do anular.

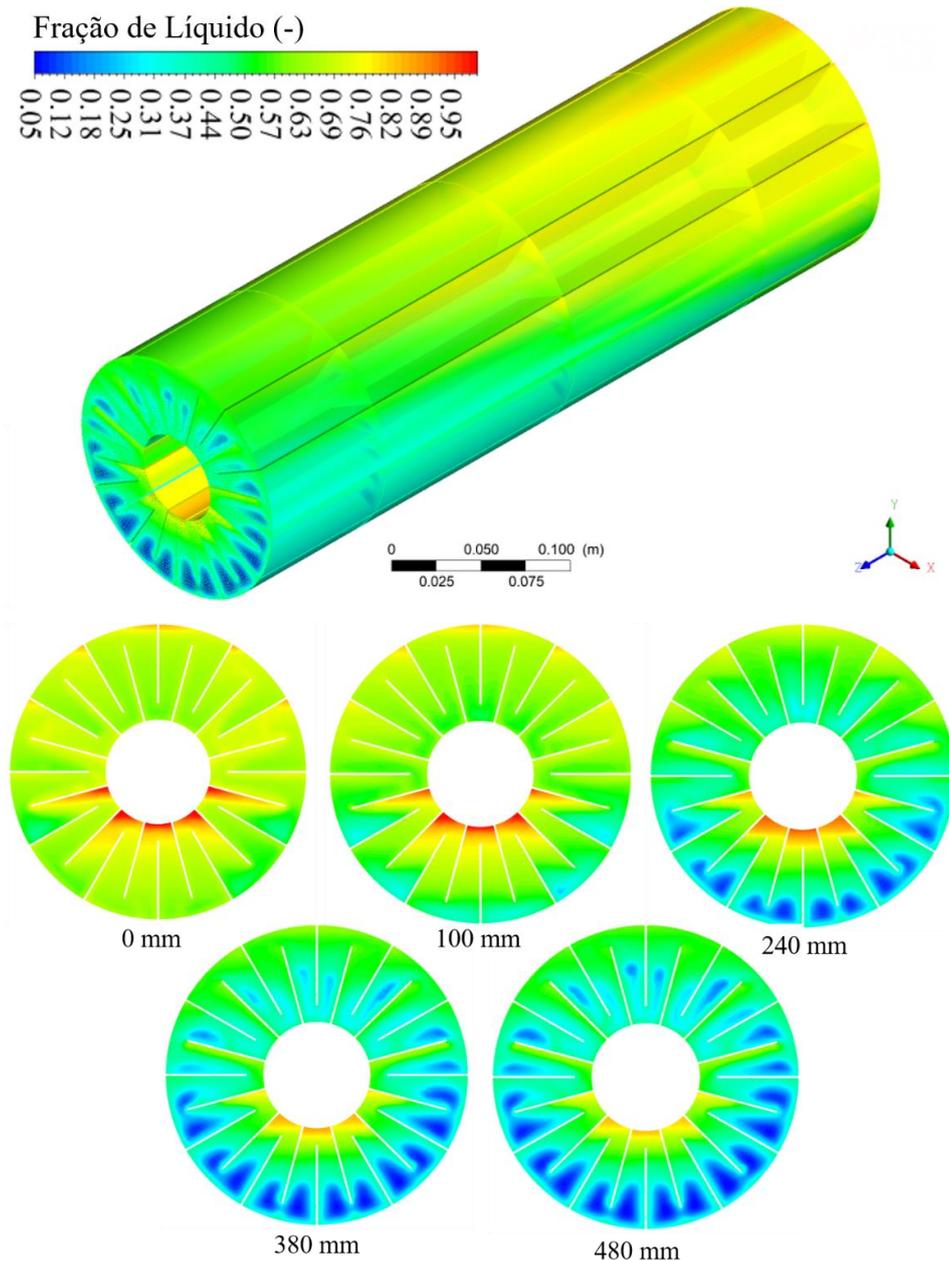
Na seção com 100 mm da entrada, constata-se uma redução na intensidade dos fenômenos desenvolvidos na seção em $z = 0$ mm, o que ocorre em conexão ao resfriamento do HHTF, ao longo do comprimento do trocador. Ainda se observa, as regiões próximas a superfície externa e interna do anular, com frações de líquido não nulas em sua composição, mas com menor intensidade que na entrada do trocador.

Na seção a 240 mm, verifica-se, nas regiões em contato com a superfície interna do anular, frações de até 50% de líquido em sua composição, mas nas paredes externas do anular, encontra-se apenas pequenas frações de líquido, concentradas nas bases das aletas, correspondentes ao início da mudança de fase nessa região. Nas seções com 380 e 480mm, o processo de mudança de fase, ainda está restrito as regiões próximas a superfície interna do anular, com valores, predominantemente, no intervalo de 20 a 30% de líquido, em sua composição.

Na Figura 5.13, tem-se a distribuição de fração estando 50% do volume de PCM no estado líquido. Pode-se observar, dentro de uma faixa de 5 a 100% de fração de líquido, as seguintes características: na entrada do TTHX ($z=0$ mm), todo o material já se encontra na região de transição, com valores acima de 44% de líquido em sua composição, estando as frações próximas da parte inferior da superfície interna do anular, com frações completamente fundidas e na parte superior da superfície externa do anular, com valores próximos a 75%.

Na seção com 100 mm da entrada, constata-se frações mais pesadas, com cerca de 30% de líquido, sendo acumuladas na parte inferior do anular, devido as variações de densidades no PCM. Na seção a 240 mm da entrada, esse acúmulo de frações mais densas, com valores próximos a 30%, ainda ocorrendo, nas regiões próximas a parte superior da superfície interna do anular e com valores inferiores a 20%, nas regiões próximas a parte inferior, da superfície externa do mesmo. Entre as seções com 380 e 480 mm, observa o mesmo acúmulo de frações pesadas ocorrendo de maneira mais intensa, valores com 5% de líquido, até na metade superior do anular.

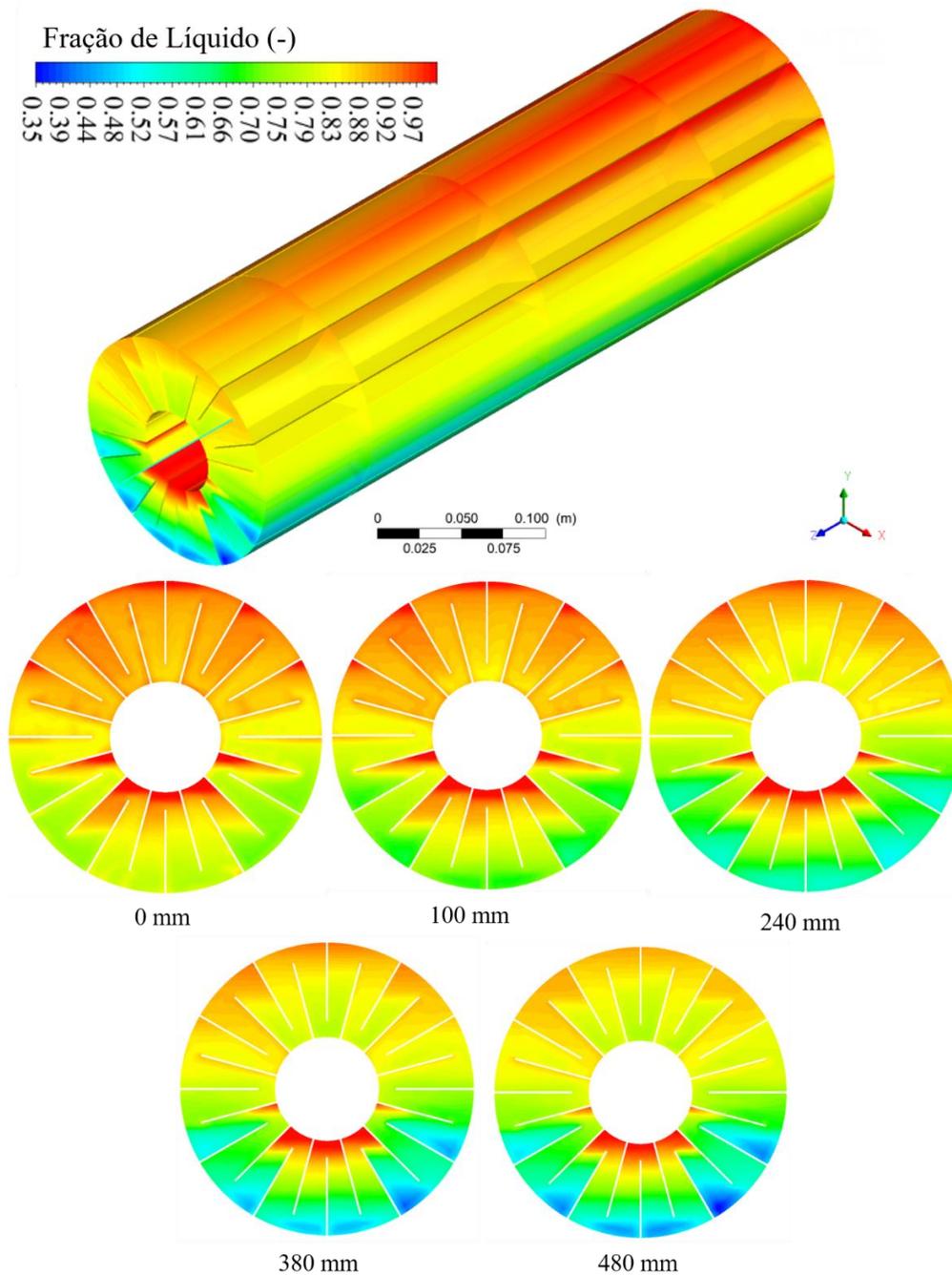
Figura 5.13 - Distribuição de fração de líquido no do PCM para 50% (1885s) do seu volume fundido



Na Figura 5.14, tem-se a distribuição de fração estando 80% do PCM no estado líquido. Constata-se, dentro de uma faixa de 35 a 100% de fração de líquido, as seguintes características: na entrada do TTHX ($z=0\text{mm}$), quase toda a metade superior do anular, encontra-se com valores de fração de líquido acima de 88%. O que se deve, ao movimento ascendente das frações mais leves de PCM, que agora pode ser visto de maneira mais distribuída, ao longo desta região.

Na metade inferior do anular, observa-se distribuição mais homogeneia de frações, com valores próximos a 70% de líquido em sua composição, a menos das regiões próximas a parte inferior da superfície interna do anular que, devido a geometria das aletas, retém frações do material, já completamente fundido.

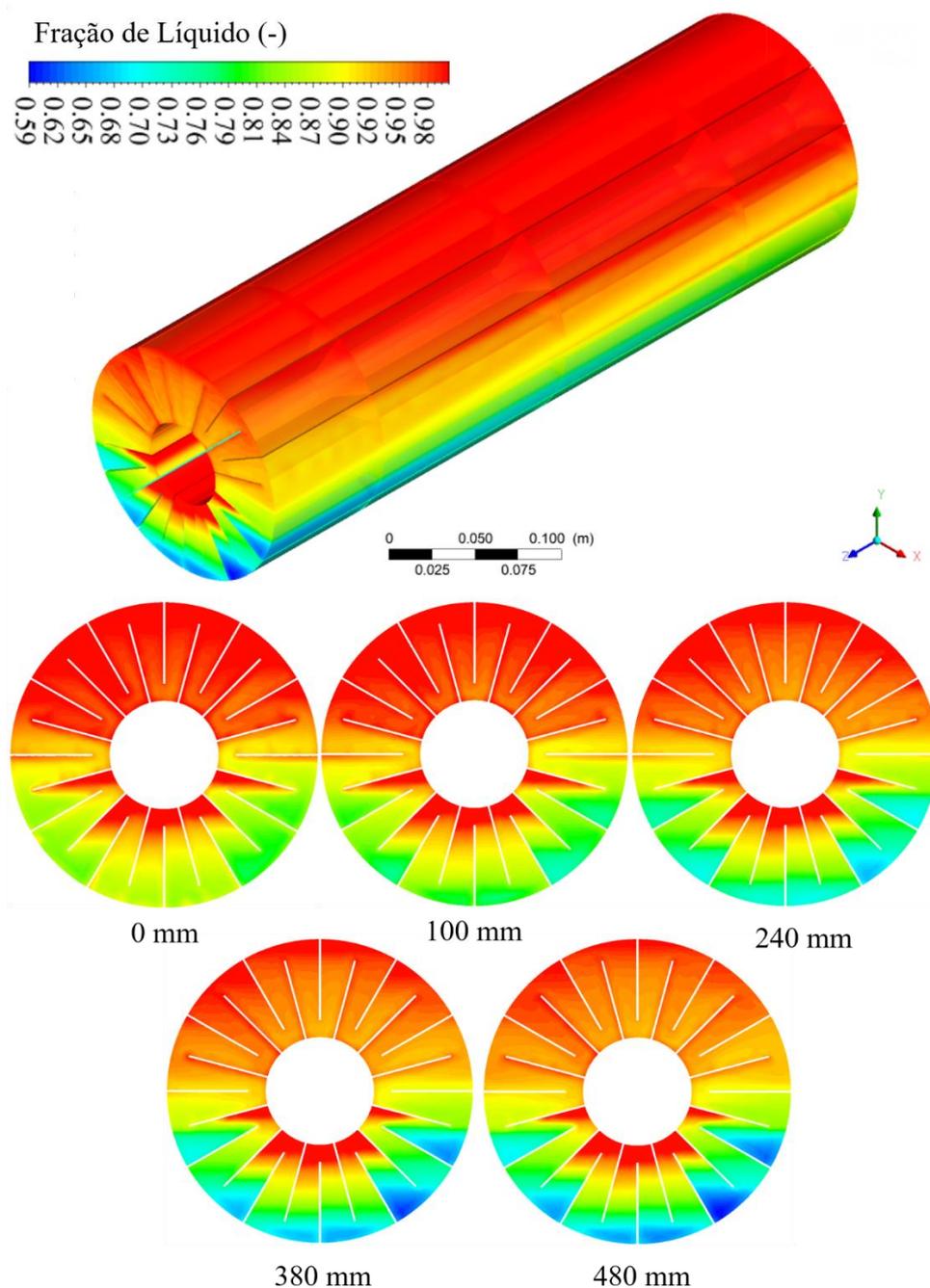
Figura 5.14 - Distribuição de fração de líquido no do PCM para 80% (2915 s) do seu volume fundido



As diferenças entre as distribuições de fração de líquido no PCM para planos $z = 0$ e 100 mm são muito pequenas, indicando que o processo tende a ocorrer uniformemente nas seções ao longo do comprimento, à medida que o processo de fusão se aproxima do final. Nas seções com 240, 380 e 480 mm da entrada, observa-se, respectivamente, nas regiões da metade inferior do anular, que frações próximas a 50, 40 e 35% de líquido em sua composição, são acumuladas e que, de maneira similar para as três seções, na região central da metade superior do anular, frações em torno de 50% de líquido são acumuladas.

A Figura 5.15 ilustra o campo de fração de líquido para 90% do volume do material no estado líquido. Para uma faixa de 59 a 100%, as seguintes características podem ser constatadas: na entrada do TTHX ($z = 0$ mm) e na seção a 100 mm da mesma, quase toda a metade superior do anular, encontra-se com valores de fração de líquido muito próximos 100%. A metade inferior acumula frações em torno 70% de líquido em sua composição, para regiões mais distantes das aletas e nas proximidades destas, observa-se frações próximas a 90%.

Figura 5.15 - Distribuição de fração de líquido no do PCM para 90% (3375 s) do seu volume fundido



Nas seções com $z = 240, 380$ e 480 mm, observa-se uma tendência em se aquecer, de maneira ligeiramente mais intensa, o material contido na parte direita do anular, que na parte esquerda do mesmo. Esse fenômeno, é mais facilmente observado nesta etapa do processo e deve-se ao movimento turbilhonar desenvolvido no trocador, ao longo no anular externo do HTF, que é quebrado nas regiões mais próximas da saída, acumulando velocidades mais baixas na metade esquerda do anular, reduzido a troca de calor local nesta região e aquecendo o PCM de forma mais lenta. Observa-se nas seções em $z = 380$ e 480 mm que frações em torno de 60% de líquido são acumuladas apenas na metade esquerda do anular.

5.4.1.3.3 Distribuição de Pressão no PCM

As Figuras 5.16 a 5.19, ilustram as distribuições de pressão, ao longo do volume do PCM, nos instantes onde 10, 50, 80 e 90% do material, encontra-se no estado líquido.

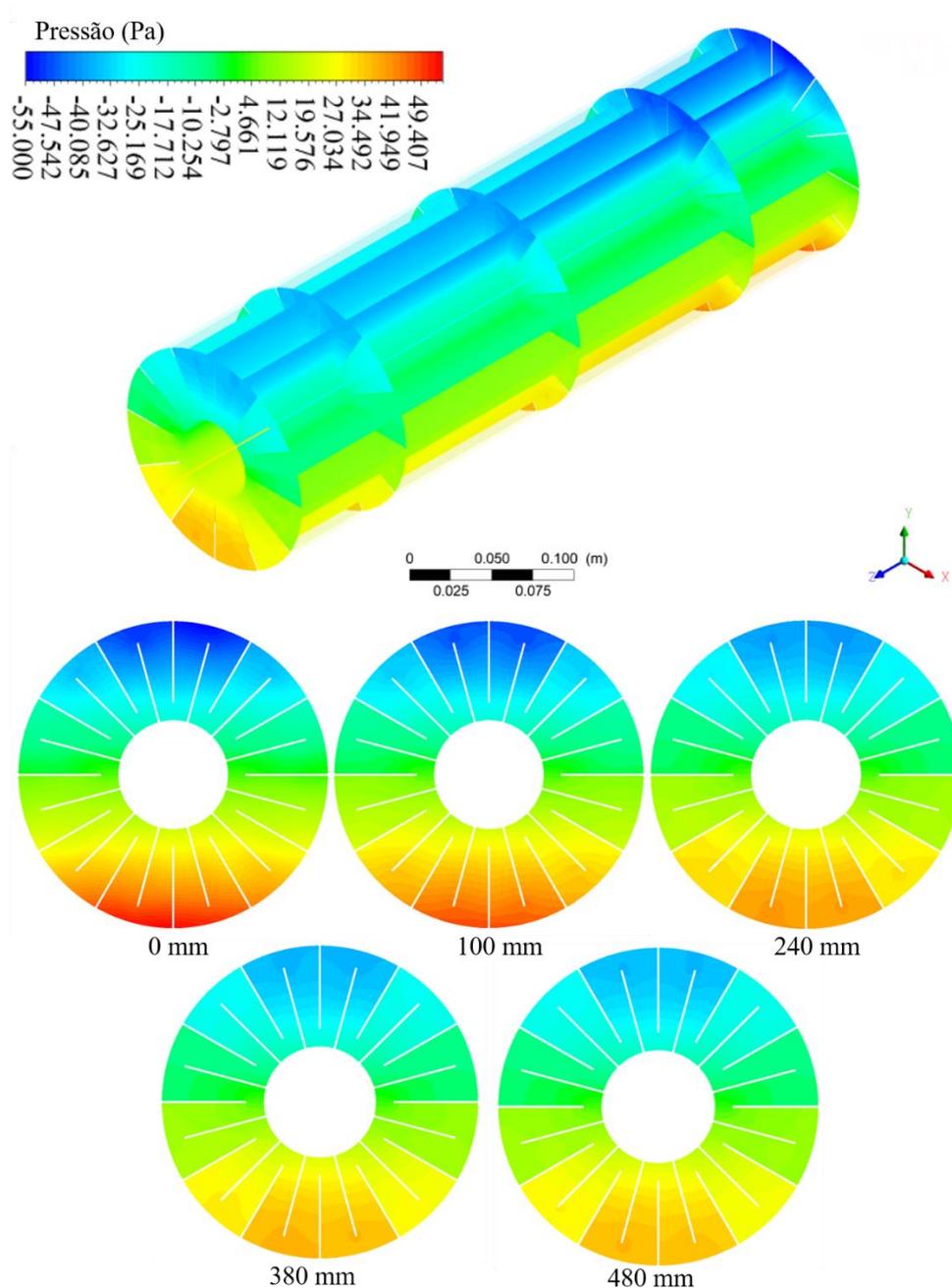
A pressão no interior do volume, passa a aumentar no decorrer da fusão. Tendo a linha de centro do trocador como o nível de pressão manométrica nula, o material líquido, junto com frações de sólido, ainda contidas no volume, exercem forças de corpo entre si, as quais são impulsionadas pela aceleração gravitacional, que se encontra na direção negativa do eixo y . Isto faz, com que os níveis de pressão negativa sejam reduzidos, da parte superior da superfície externa do anular, até a linha de pressão nula, a partir da qual, a pressão aumenta, para valores positivos, até a parte inferior da superfície externa do anular e, à medida que o processo de fusão se desenvolve, mais material líquido encontram-se no volume do PCM, onde maiores intervalos de variação de pressão são observados.

Devido a redução da densidade do material, ao longo do processo de fusão, observa-se aumentos na variação de pressão dentro do volume do PCM. Inicialmente, estando o material totalmente solidificado, as variações de pressão ao longo do volume, são inexistentes, no entanto, à medida que o material passa pelo processo de fusão, o mesmo tende a expandir o volume, que está restrito as paredes do TTHX.

Estando o material com 10% do seu volume fundido, Figura 5.16, as variações de pressão ocorrem no intervalo de ± 55 Pa, para seção entrada; entre 49,4 e -47,542 Pa, para a seção com 100 mm; entre 34,492 e -32,627 Pa, para a seções a 240, 380 e 480 mm, não tendo entre as duas últimas, variações significativas nas distribuições de pressão, o que se deve as frações de líquido encontradas

nestas seções serem próximas, ao ponto de não influenciar, de forma distinta, as distribuições de pressão.

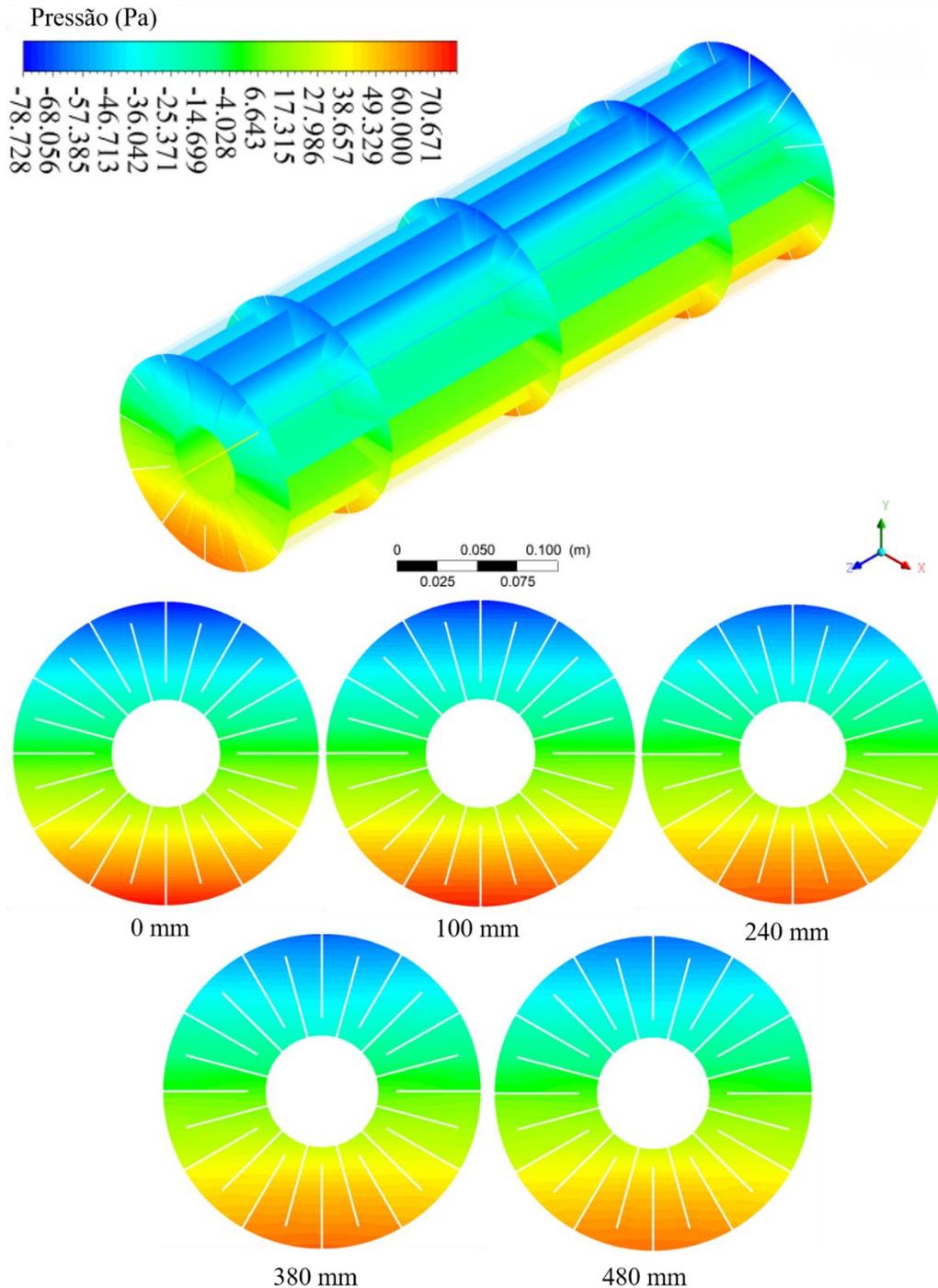
Figura 5.16 - Distribuição de pressão no domínio PCM 10% (785 s) do seu volume fundido



Na Figura 5.17, observa-se que a faixa de pressões aumentou para valores entre 80 e -78,728 Pa. Tendo o material alcançado 50% de fração de líquido no seu volume, as distribuições de pressão, nas seções ao longo do comprimento do mesmo, são muito similares: intervalos entre 80 e -78,728 , para seção entrada; para a seção em $z = 100$ mm, observa-se uma distribuição de pressão

semelhante a de $z = 0$ mm, mas com menor intensidade de pressões negativas na metade superior do anular, o que segue no mesmo sentido para seção em $z = 240$ mm; para a seções em $z = 380$ e 480 mm observa-se intervalos de pressão entre -46 e 49 Pa, mostrando que nestas seções os níveis pressão devido ao processo de mudança de fase se aproximam da metade dos mesmos observados para seções de entrada.

Figura 5.17 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 50% (1885 s) do seu volume fundido



Já para Figura 5.18 e 5.19 a faixa, que é praticamente invariável para todas seções ao longo do comprimento, é aumentada para ± 105 Pa. No mesmo sentido, para 100% do material no estado líquido, tem-se os maiores níveis de pressão no PCM (aproximadamente ± 130 Pa). Observa-se, que existe um limite para as variações de pressão ao longo do comprimento do PCM, devido ao acúmulo de líquido no TTXH. O que ocorre, por volta de 50% do material fundido. A partir de então, as variações de pressão na direção do comprimento do PCM são desprezíveis.

Figura 5.18 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 80% (2915 s) do seu volume fundido

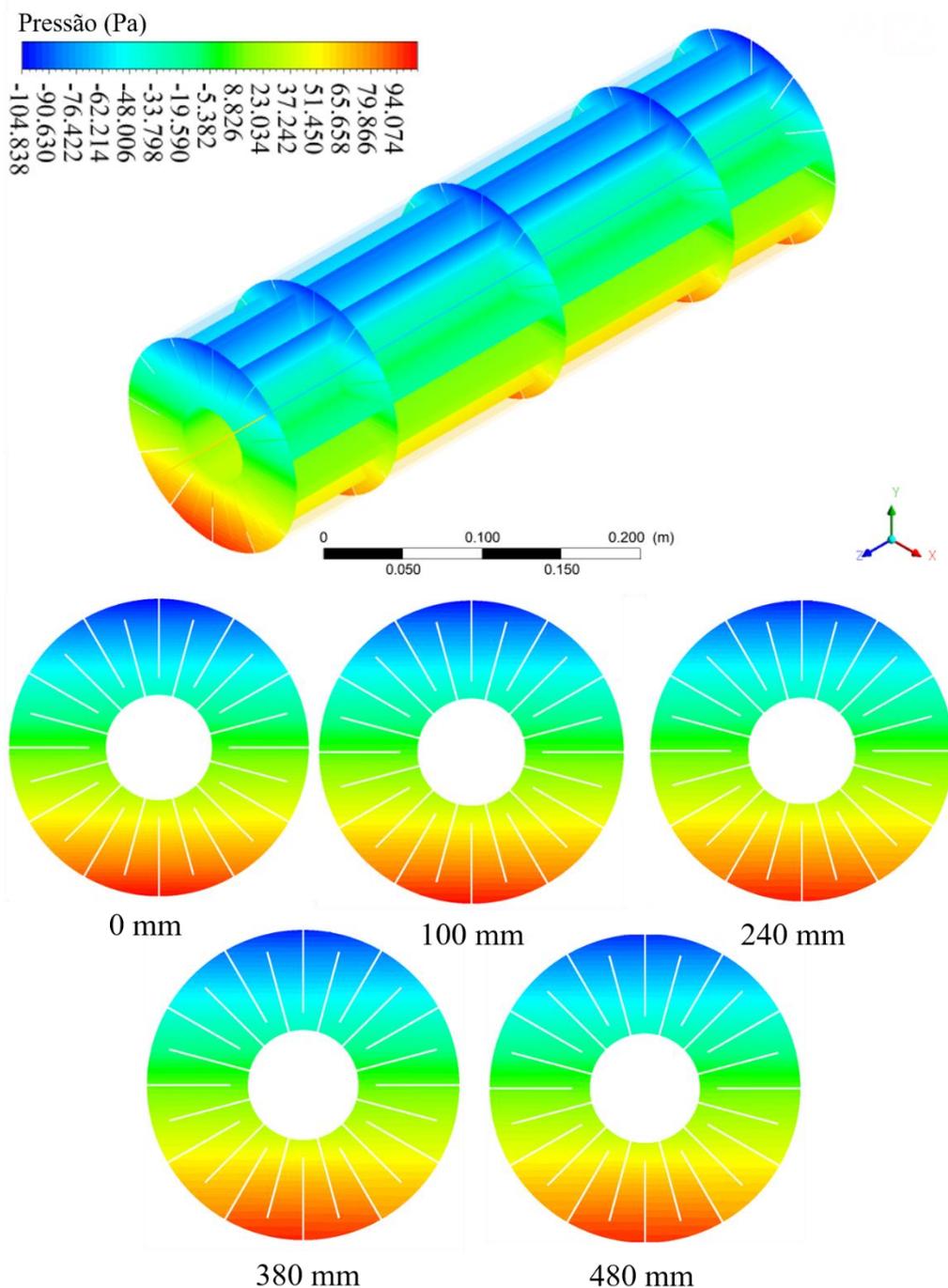
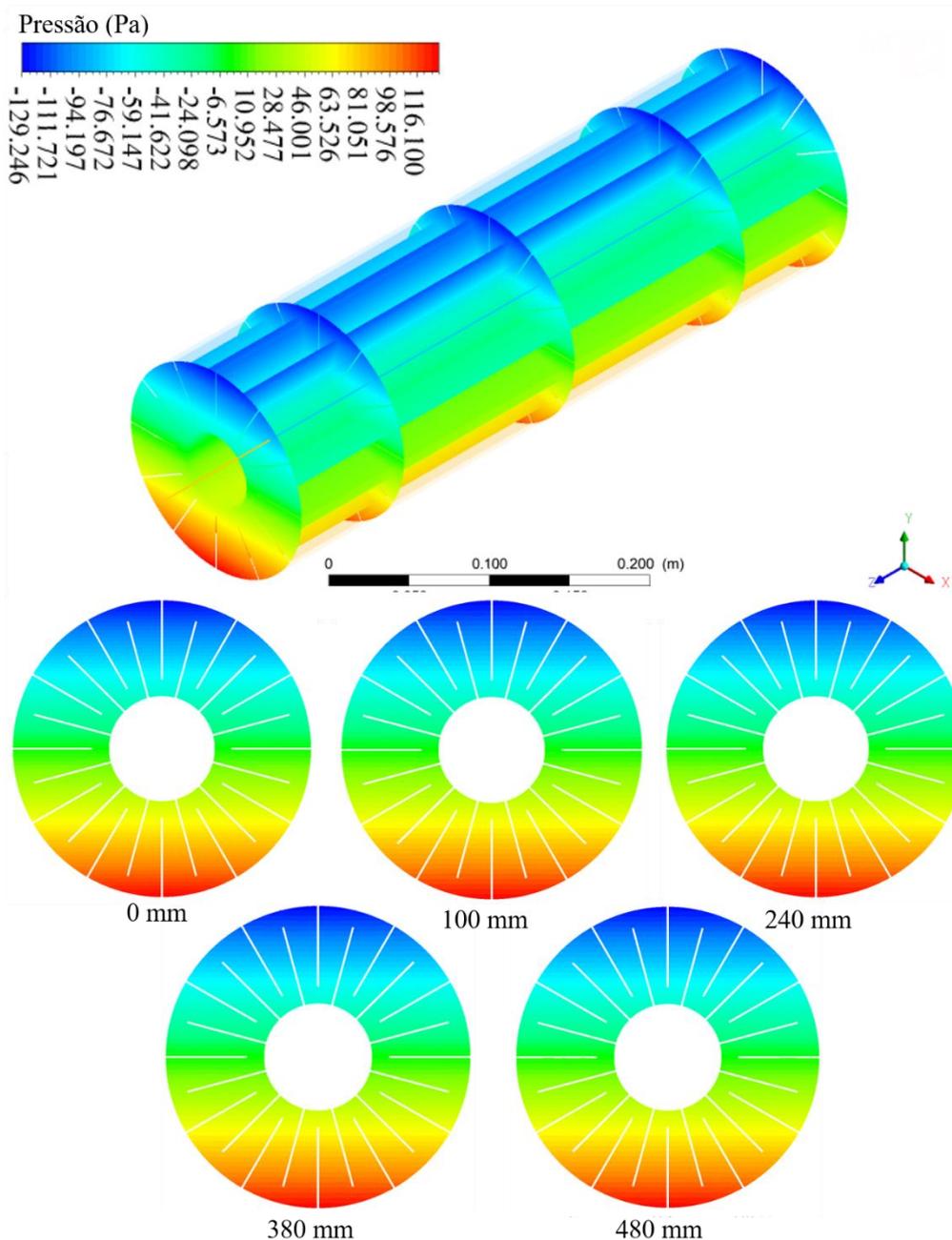


Figura 5.19 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 100% (4375 s) do seu volume fundido



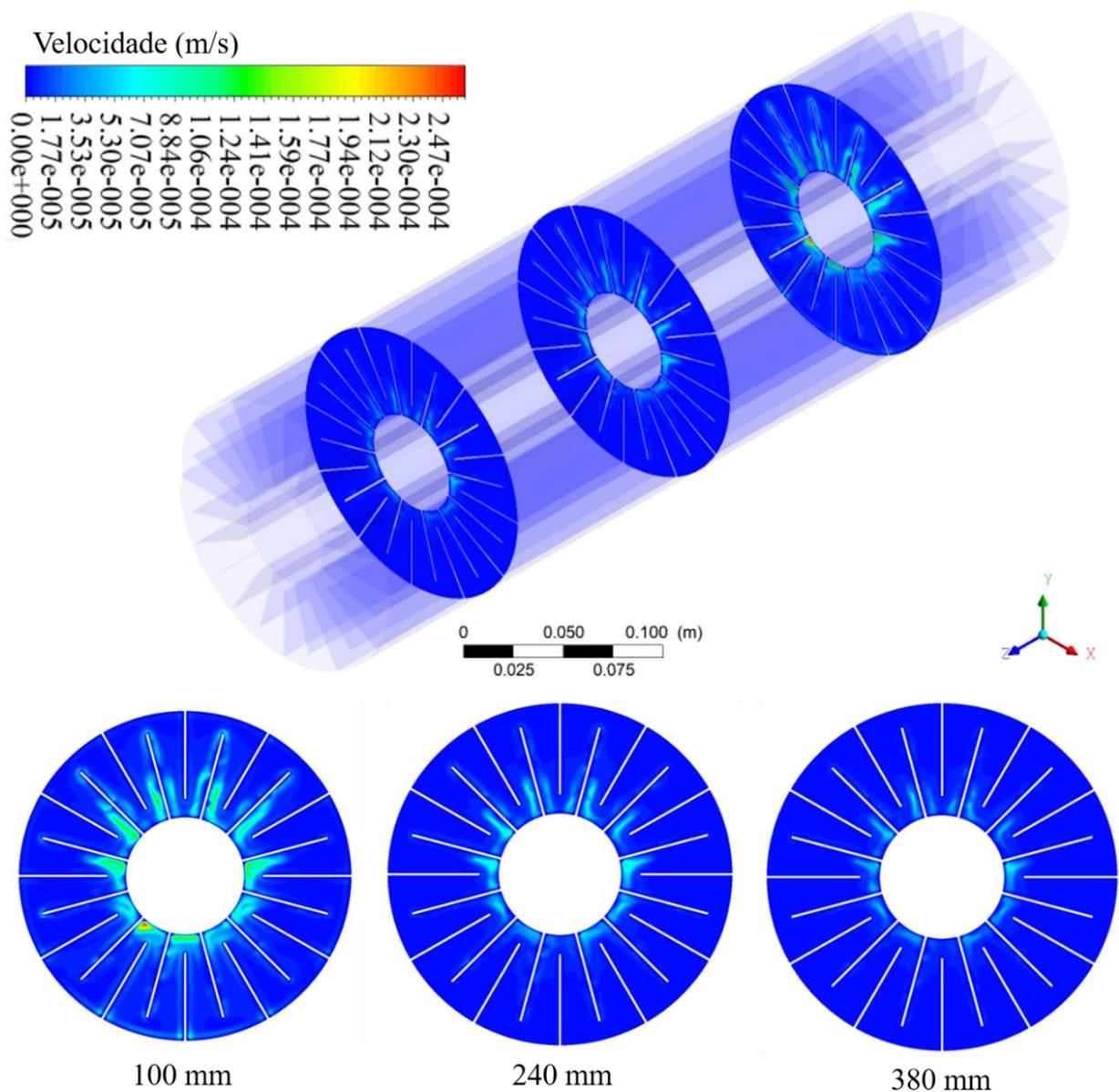
5.4.1.3.4 Distribuição de velocidades no PCM

Nas distribuições ilustradas nas Figuras 5.20 a 5.23, tem-se as velocidades desenvolvidas no PCM, devido as forças de empuxo recorrentes na estrutura do material, consequência das variações de densidades que o aquecimento do PCM proporciona. O mesmo inicia o processo de fusão, no estado totalmente solidificado, com velocidades nulas. À medida que o material tem sua temperatura elevada, reduz sua densidade, o que, em meio a força gravitacional, converte-se em deslocamentos

com velocidades cada vez maiores, de acordo com o grau de fusão existente no material. Estes deslocamentos, fazem com que, guardadas as suas proporções, o processo de transferência de calor, ocorra também por convecção natural ao invés de ser puramente difusivo.

Observa-se na Figura 5.20, velocidades que variam entre $2,5 \times 10^{-4}$ e 0 m/s. As velocidades diferentes de zero são concentradas, nas proximidades da superfície interna do anular preenchido com PCM e decrescem da seção a 100 mm da entrada para a seção a 380 mm, onde se observa um recuo das velocidades nas direções das aletas.

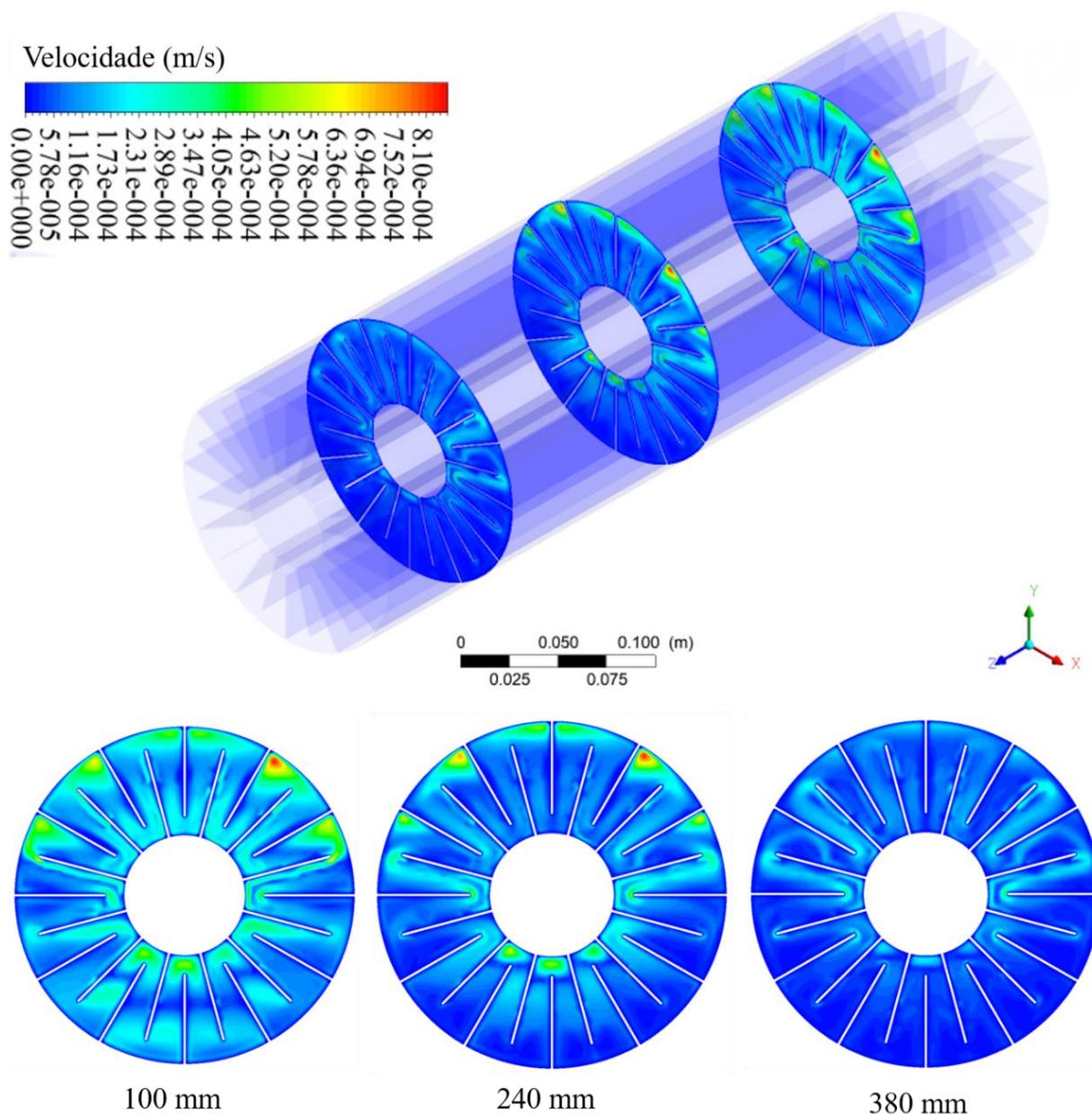
Figura 5.20 - Distribuição de velocidades no domínio PCM 10% (785 s) do seu volume fundido



Observa-se na Figura 5.20, velocidades que variam entre $2,5 \times 10^{-4}$ e 0 m/s. As velocidades diferentes de zero são concentradas, nas proximidades da superfície interna do anular preenchido

com PCM e decrescem da seção a 100 mm da entrada para a seção a 380 mm, onde se observa um recuo das velocidades nas direções das aletas.

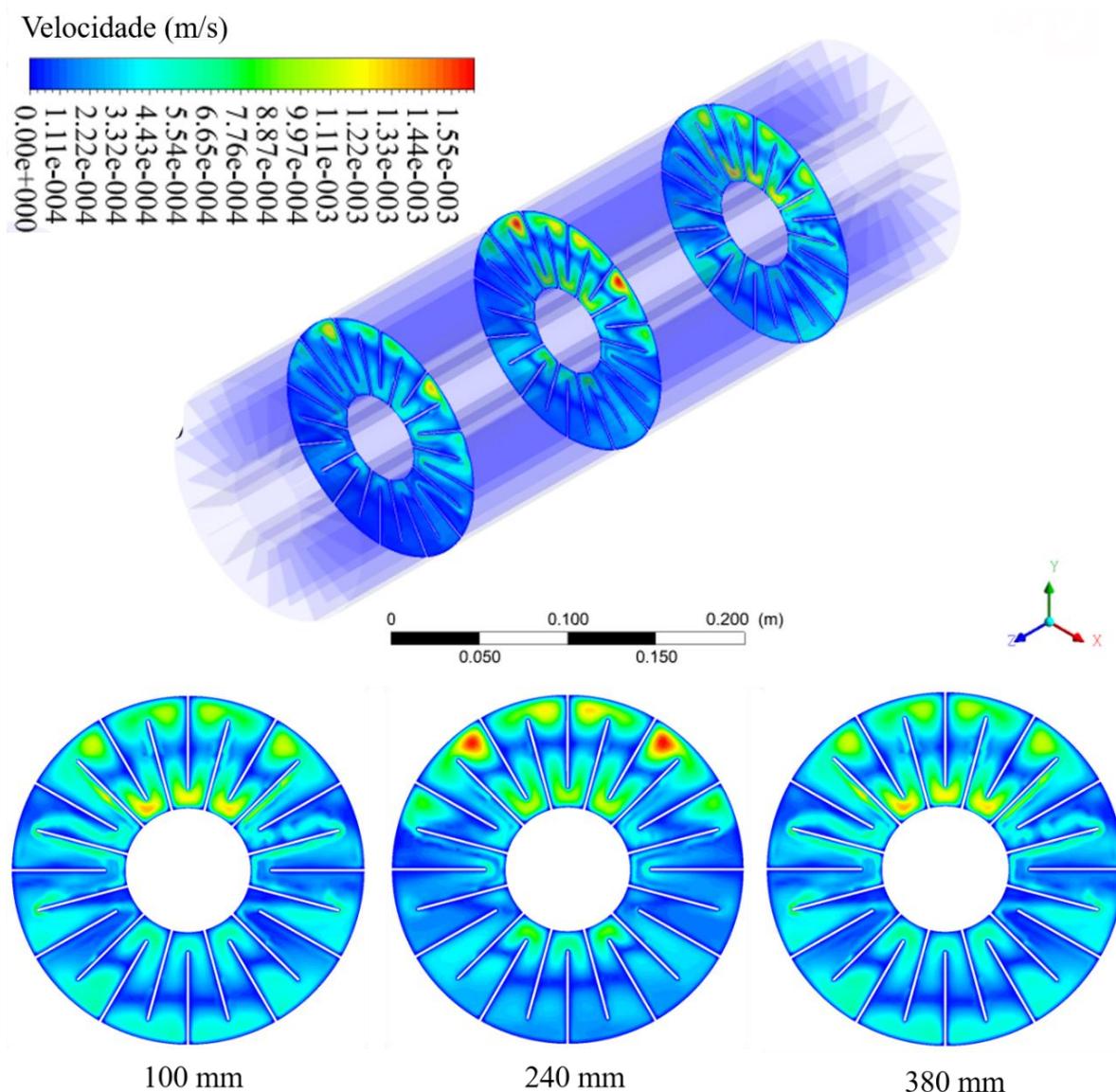
Figura 5.21 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 50% (1885 s) do seu volume fundido



Na Figura 5.21, observa-se que a gama de velocidades cresce para valores máximos de 8×10^{-4} m/s. Nesta ocasião, as velocidades se encontram mais distribuídas entre as superfícies externa e interna do anular, principalmente na seção a 100 mm da entrada do trocador, mais aquecida. Outra característica importante, destacadas principalmente nas seções a 240 e 380 mm, é a do movimento de ascensão das frações mais leves de fluido, algumas ficando retidas nas regiões próximas a parte

inferior da superfície interna do anular e outras contornando as aletas até se depositarem nas regiões próximas a parte superior da superfície externa do mesmo, onde se encontram os maiores valores de velocidade.

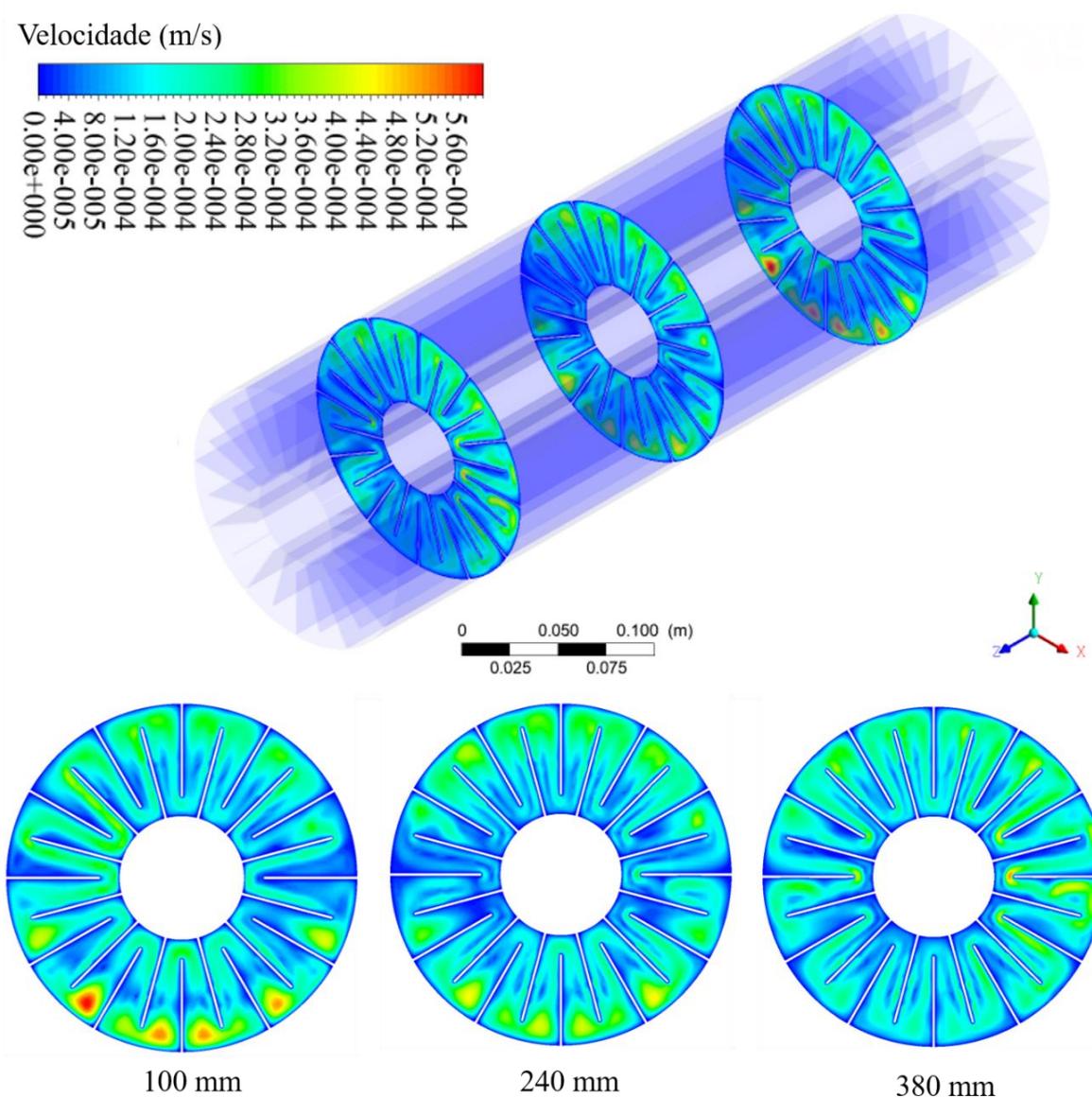
Figura 5.22 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 80% (2915 s) do seu volume fundido



Na Figura 5.22, a faixa de velocidades cresce para valores máximos de $1,55 \times 10^{-3}$ m/s e as distribuições de velocidades se encontram mais distribuídas, agora ao longo de todos os planos de análise. Uma característica importante vista nessa figura, é que na medida que o material se aproxima do estado completamente líquido, as velocidades tendem a ser reduzidas, haja visto que a força motriz das movimentações, são as variações de densidade, que neste sentido, vão deixando de

ocorrer. É por este motivo, que ao se comparar as seções a 100, 240 e 380 mm da entrada, chegou-se conclusão, que as maiores velocidades agora estão dispostas na seção a 240 mm. A seção com 100 mm da entrada, atingiu níveis de fusão suficientes para ser mais estável que a seção a 240 mm e com níveis de velocidade, muito parecidos com os da seção a 380 mm, a qual possui frações de líquido menores, relativamente as demais seções, o que ainda restringe maiores variações de densidades e consequentemente de velocidades, ao longo da mesma.

Figura 5.23 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 100% (4375 s) do seu volume fundido



Na Figura 5.23 observa-se o mecanismo de aumento da estabilidade ser preponderante em todas as seções, de modo que a faixa de velocidades, neste instante do processo em relação ao da

Figura 5.22, se reduz em cerca de 10 vezes. Agora, devido a todas as seções já estarem completamente liquefeitas, as variações de densidade ainda existem, porque o fluido continua a aquecer, mas em níveis muito pequenos. Observa-se, comparando as seções com 100, 240 e 380 mm da entrada, que existe uma tendência das regiões com maiores velocidades passarem a se concentrar nas regiões próximas a parte inferior da superfície externa do anular, que é onde se concentram as frações mais pesadas de fluido e onde poderá ocorrer, ainda as maiores variações de densidade com o aquecimento do PCM.

5.4.1.4 Processo de solidificação

Nesta seção analisou-se os resultados qualitativos referentes a fusão do PCM: distribuição de temperaturas, frações de líquido, pressão e velocidades.

5.4.1.4.1 Distribuição de temperaturas

Foram apresentadas as distribuições de temperaturas em todos os domínios estudados. Considerando a entrada do CHTF no trocador até a extração completa do fluido de troca térmica aquecido, que se encontra no interior do TTHX, bem como, todo o processo de solidificação, que ocorre no domínio do PCM.

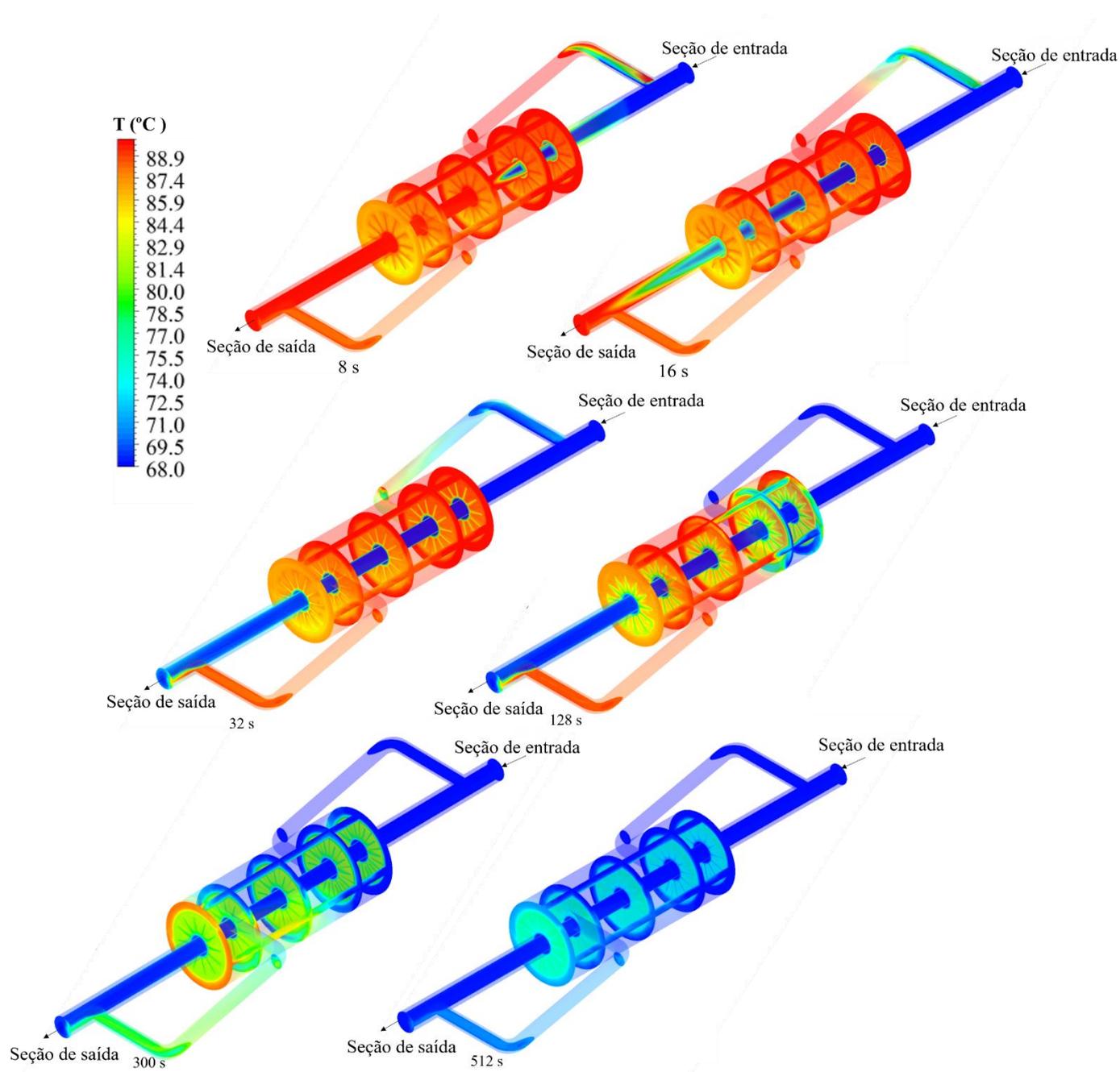
5.4.1.4.1.1 Entrada do fluido frio (CHTF)

O início do processo de solidificação, se dá, com o estado final processo de fusão. As distribuições de temperaturas, frações de líquido, pressão e velocidade, são as condições, sob as quais o processo de descarregamento do PCM deve se dar. Passa-se, portanto, a injetar fluido frio (CHTF) na entrada do TTHX, o qual expulsa o fluido quente (HHTF), contido nas tubulações, ao final do processo de fusão.

Como apresentado na Figura 5.24, o tempo total necessário para o HHTF, presente no trocador, ser repellido, é de 512 s. Nos 8 s iniciais, o CHTF adentra as tubulações e atinge a entrada do volume compreendido pelo tubo interno no TTHX, $z = 0$ mm. Na junta em T, destinada a separar o fluido para resfriar a superfície externa do PCM, observa-se misturas entre o HHTF e o CHTF, em valores por volta de 80°C . Em 16 s de processamento, observa-se, que a parte interna do HTF foi totalmente preenchida com fluido frio, enquanto a parte externa, ainda é possível encontrar

fluido, remanescente do processo de fusão. Em 32 s, o fluido escoando na parte interna do trocador é 100% frio. Em 128 s, o CHTF alcança o anular externo do trocador de calor e passa a expulsar HHTF existente nesse volume. Em 512 s, o domínio do fluido de resfriamento é completamente preenchido apenas com o CHTF.

Figura 5.24 - Distribuições de temperaturas durante o tempo necessário para repelir o HHTF do TTHX



5.4.1.4.1.2 Processo de solidificação do PCM

Nas Figuras 5.25 a 5.28, observa-se as distribuições de temperatura para o fluido de resfriamento, as tubulações e o PCM, nos quatro instantes específicos do processo de solidificação, a saber, quando a fração de líquido no volume do PCM corresponde a 80 (4942s), 50 (6522 s), 10 (10293 s) e 0% (14343 s), sendo o mesmo iniciado a partir da condição de 100% (4375 s) líquido, que foi obtida com o aquecimento do PCM descrito na seção 5.4.1.3. Todos os instantes tratados nesta seção, ocorrem após a extração do HHTF, contido no interior do TTHX, no início do processo, que dura 512 s, os quais somados ao tempo final de fusão, 4375 s, equivale a 4887 s do ciclo total (fusão-solidificação). Os cinco planos já especificados, ao longo do comprimento do trocador de calor, são analisados, além da vista isométrica, do problema físico inteiro.

Primeiramente, tomou-se uma análise geral do processo de solidificação: o CHTF entra a 68°C, nas entradas externa e interna do TTHX e sai do trocador com maiores temperaturas, à medida que este absorve energia térmica do PCM, o qual reduz gradativamente sua temperatura, até ser completamente solidificado. Ao longo do comprimento do TTHX, o CHTF aumenta sua temperatura, recebendo energia ao longo do comprimento do PCM.

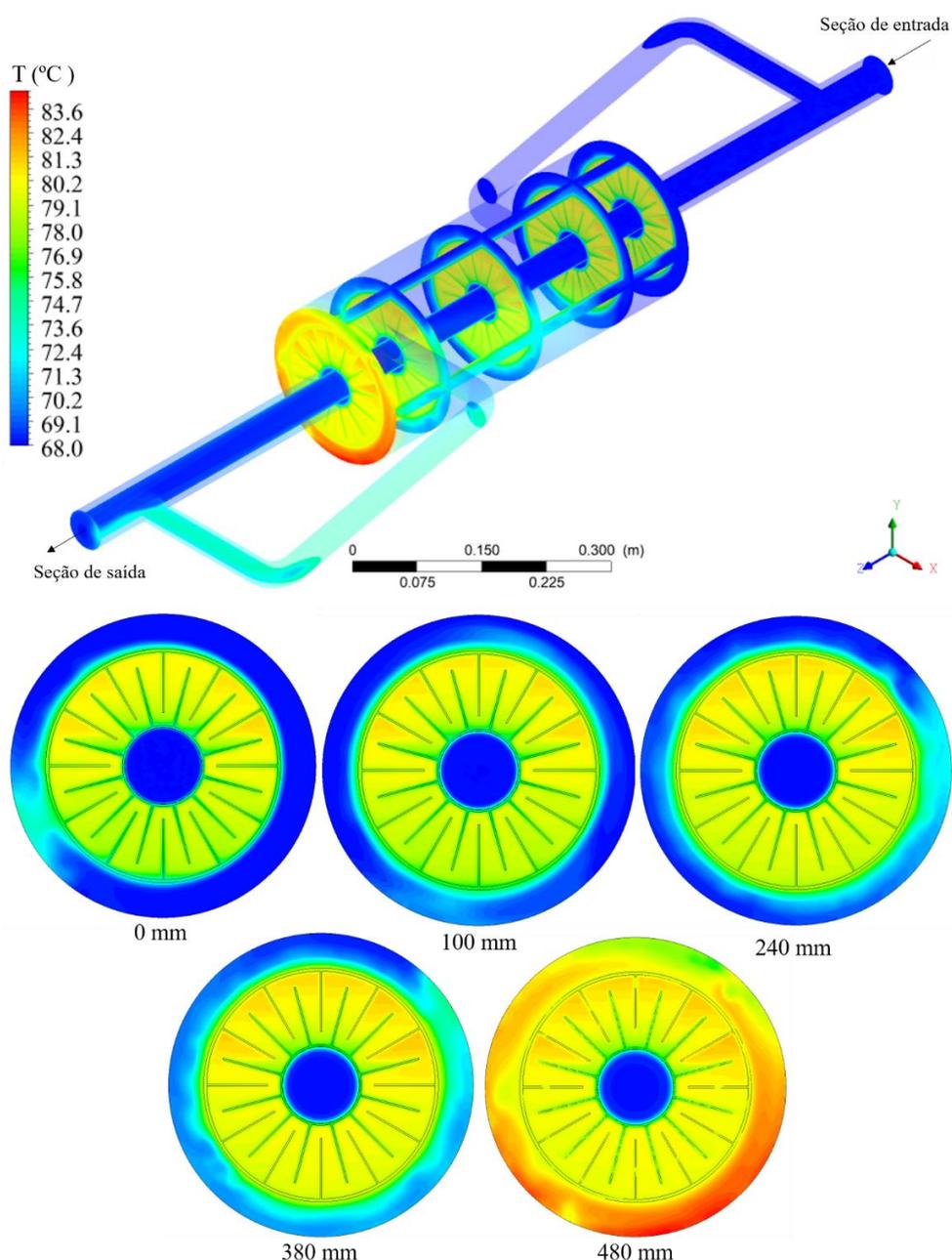
Na Figura 5.25, observa-se que o CHTF, que entra no trocador com 68°C, sai da região externa do domínio fluido com temperaturas, por volta de 75°C. Na região interna do trocador, as temperaturas, apenas nas regiões muito próximas a superfície interna do tubo interno, são aumentadas de 68, para valores em torno de 75°C, indicando, agora para o aquecimento CHTF, que a camada limite térmica nessa região, é muito fina. No mesmo sentido do processo de fusão, na região externa ao anular do PCM, tem-se uma área de troca térmica e tempo de contato do CHTF com a parede da tubulação, maiores, o que leva o fluido de troca térmica sair mais aquecido do anular externo do trocador.

Na parte interna, tem-se uma menor área de contato, mas níveis de velocidade consideravelmente mais altos, como apresentado na seção 5.4.1.2, que tratou das velocidades no HTF. Desta forma, tem-se uma transferência de calor por convecção, a partir da superfície interna do anular do PCM, com maior intensidade.

Com relação ao PCM, observa-se as seguintes características: na seção de entrada do TTHX ($z = 0$ mm) observa-se os maiores níveis de solidificação ao longo do comprimento do PCM. As regiões próximas a parte inferior da superfície externa do anular e a parte superior da superfície interna do mesmo, caracterizam-se com acúmulos de frações do material, com temperaturas próximas a 75°C, devido as frações mais pesadas, tenderem a se depositar nestas regiões; esse

comportamento é reduzido em intensidade, ao longo do comprimento do material, estando as seções a 100 e 240 mm da entrada, com distribuições de temperatura similares, predominantemente mantidas com valores próximos a 80°C; Observa-se razoável proximidade, entre as distribuições de temperatura referentes as seções a 380 e 480 mm da entrada do TTHX, onde, na metade superior do anular, um acúmulo de fluidos com temperaturas próximas a 81°C é constatado.

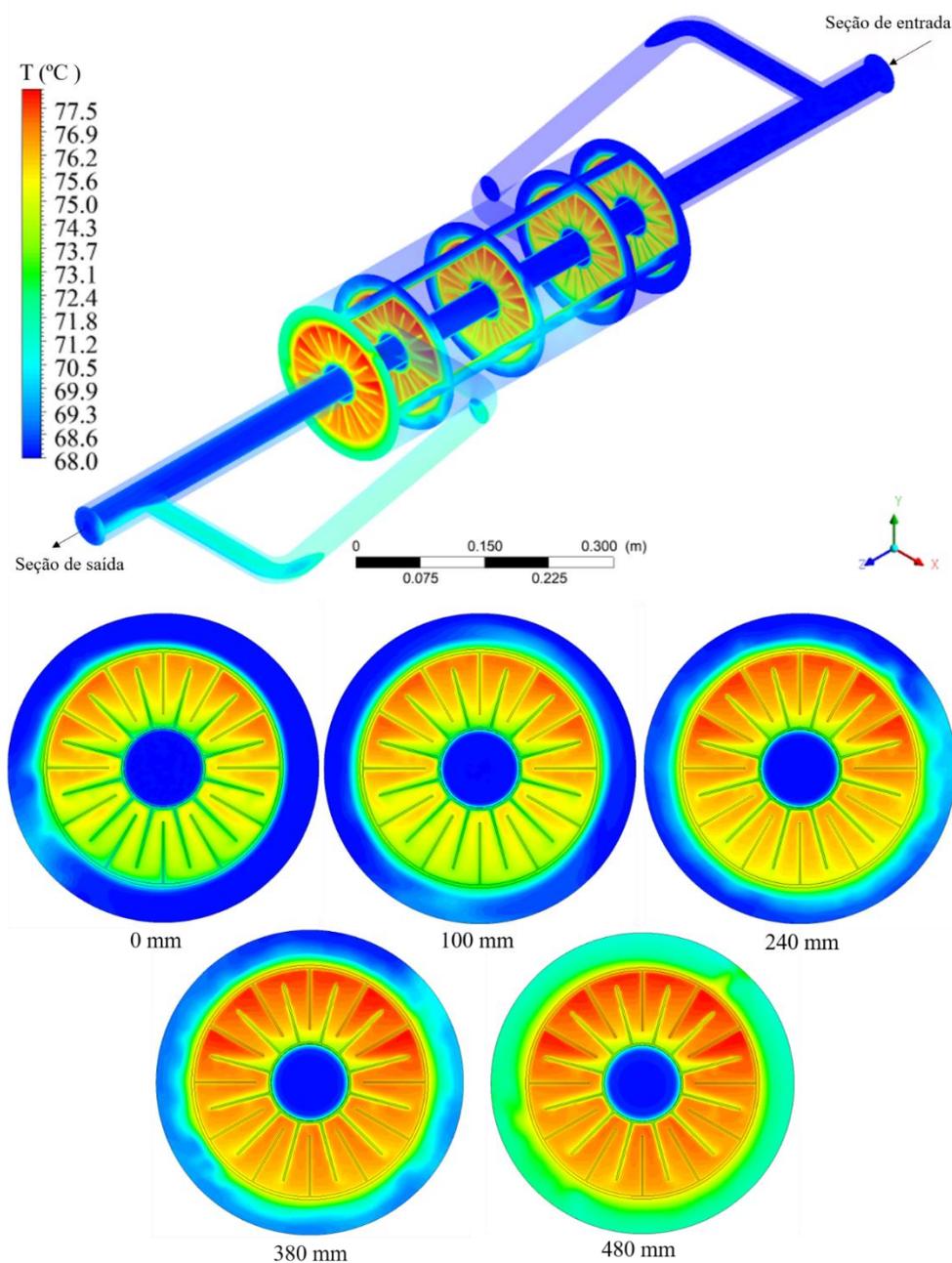
Figura 5.25 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 80% (4942 s) do PCM fundido



Na Figura 5.26, observa-se o CHTF saindo, por volta de 73°C, do anular externo e tubo interno do TTHX. O que se deve ao fato de que, à medida que o PCM é resfriado, o gradiente de

temperatura entre este e o CHTF é reduzido e de modo similar ao que ocorre no processo de fusão, na medida que o PCM é resfriado, a força motriz para transferência de calor vai sendo reduzida

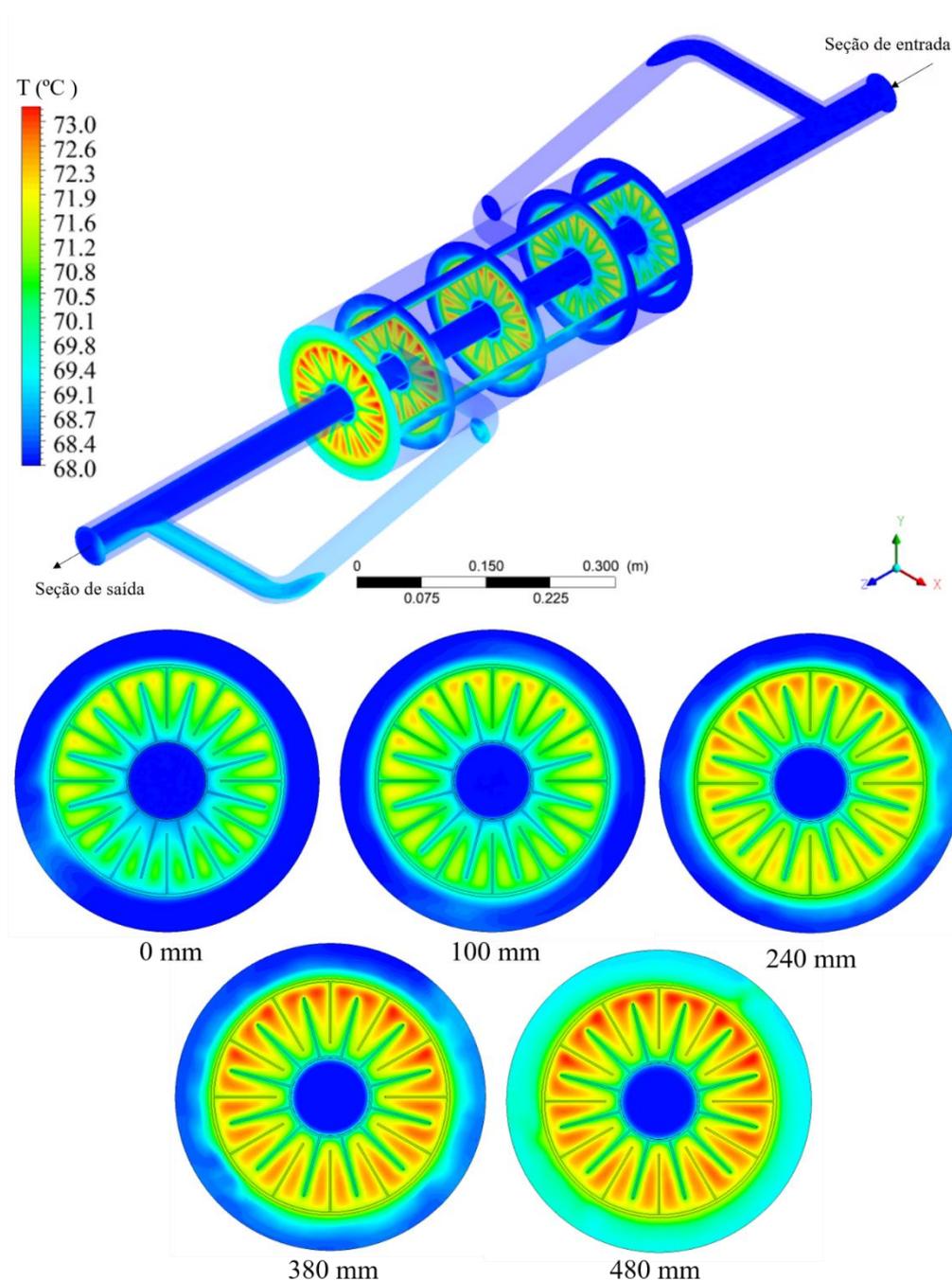
Figura 5.26 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 50% (6522 s) do PCM fundido



. Em relação ao PCM, verifica-se nos comprimentos de 100, 240, 380 e 480 mm da entrada, frações de PCM com mais baixas temperaturas, por volta de 73°C , são reduzidas nas regiões próximas a parte inferior da superfície externa do anular e a parte superior da superfície interna do mesmo. Isto se deve, ao aumento nas densidades, relativos à redução nas temperaturas do PCM.

Para 10% do volume de PCM fundido, Figura 5.27, tem-se o CHTF sendo retirado do anular externo e na superfície da região interna de mesmo, com temperaturas próximas a 69°C.

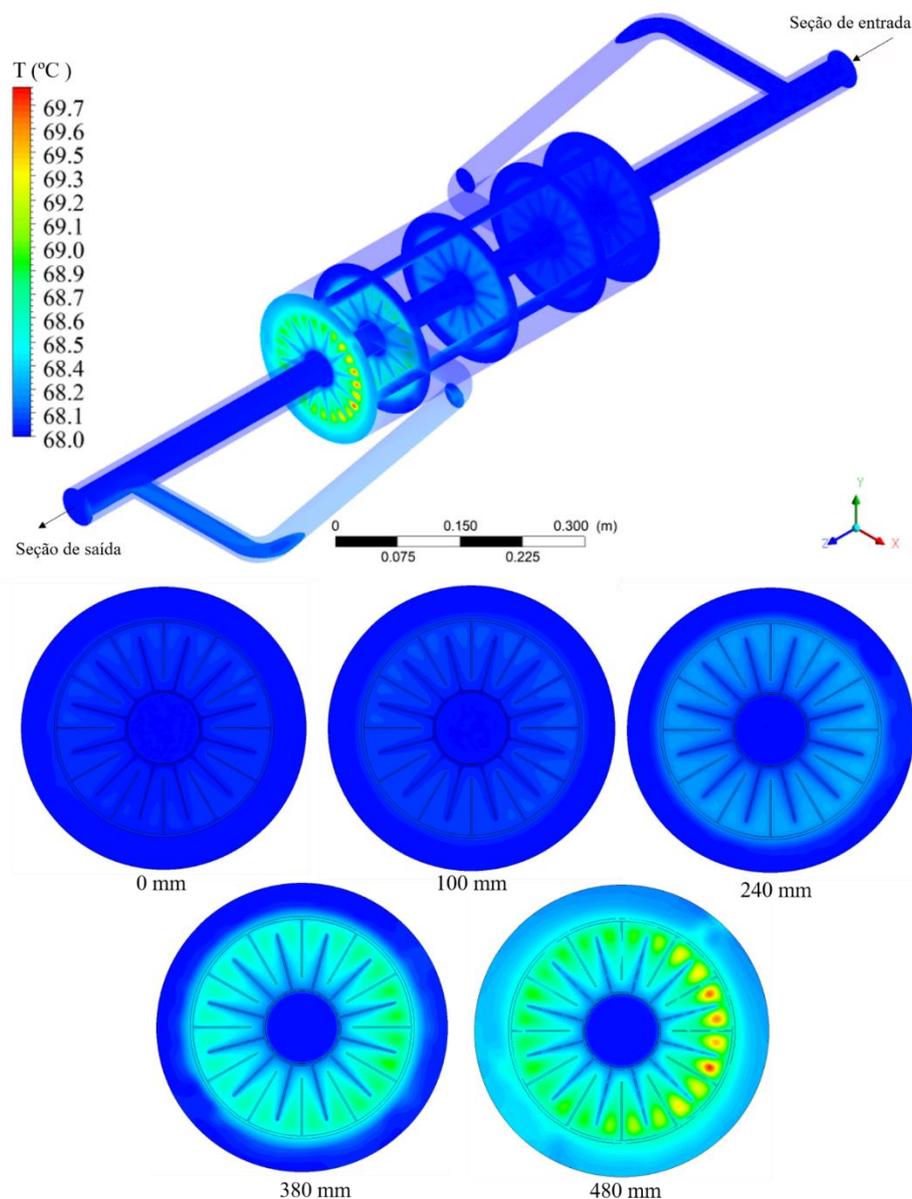
Figura 5.27 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 10% (10293 s) do PCM fundido



Já para o PCM, observa-se que o mesmo se encontra, ao longo dos planos de análise, com temperaturas referentes a região de transição de fases e abaixo da temperatura sólidos do material: até o comprimento de 100 mm, é possível observar regiões do PCM, próximas a superfície interna do anular, com níveis de temperatura abaixo da linha sólidos e nas regiões próximas da parte

superior da superfície externa do anular, valores acima desta temperatura. Para as seções com 240, 380, e 480 mm da entrada, tem-se acúmulos, respectivamente mais intensos de frações do PCM, com temperaturas próximas a 73°C e com mais homogeneidade, em relação a metade superior e inferior do anular.

Figura 5.28 - Distribuição de temperaturas em todos os domínios do TTHX para 0% (14343 s) do PCM fundido



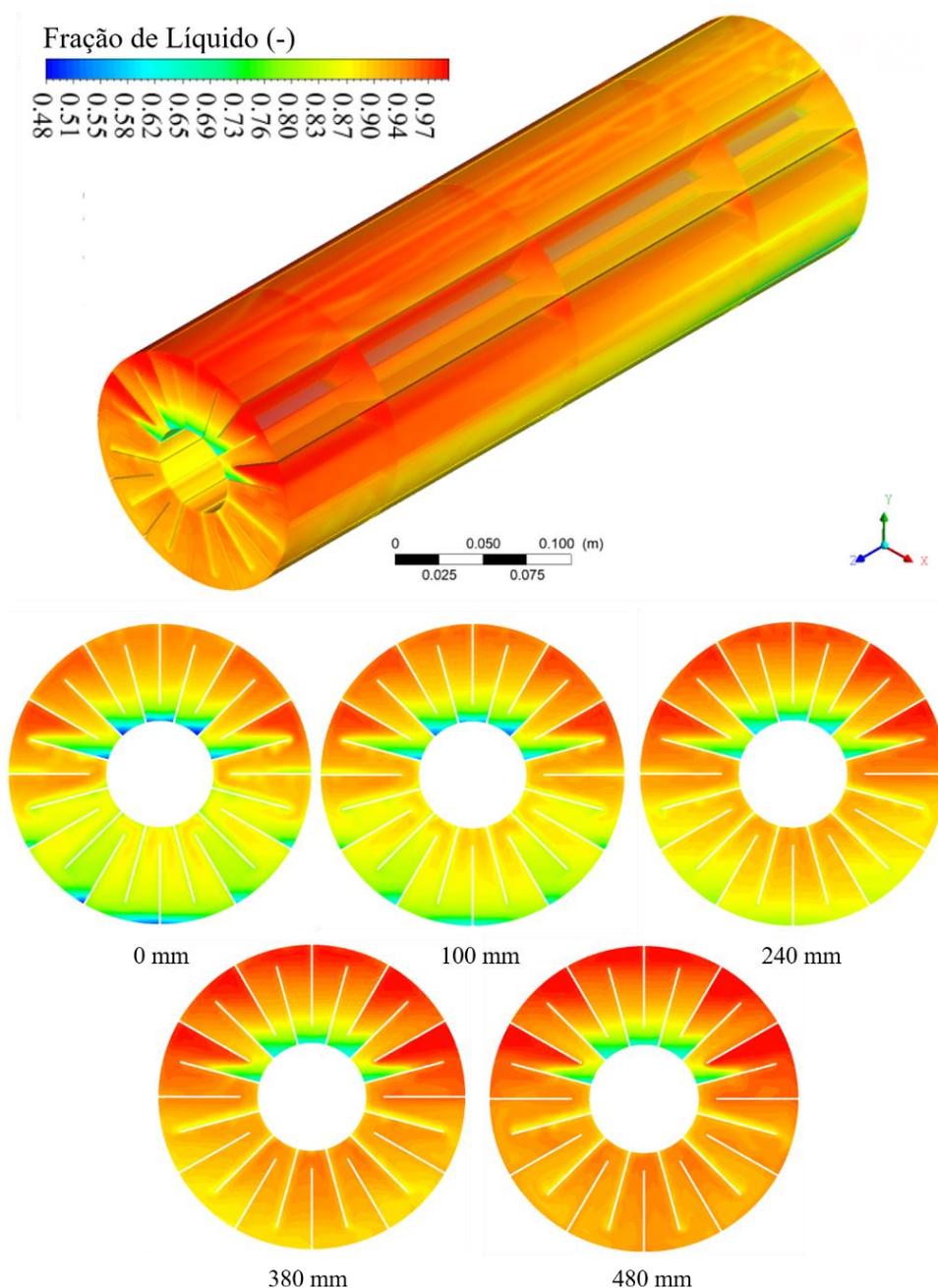
Estando o PCM com 0% de fração de líquido em seu volume, Figura 5.28, tem-se o CHTF saindo da região externa do TTHX e na superfície da região interna do mesmo, com 68°C, estando todos os planos com o PCM abaixo de 70°C, as seções de 380 e 480 mm da entrada, com temperaturas mais próximas a 69°C e as demais, com temperaturas praticamente estabilizadas em

68°C. Observa-se que o tempo total para fundir a 90 e solidificar 68°C foi de 14343 s (cerca de 4 horas) sendo 9968s (2h e 46min), apenas para o processo de solidificação.

5.4.1.4.2 Distribuição de fração de líquido

Nas Figuras 5.29 a 5.32, tem-se as distribuições de frações de líquido ao longo do processo de solidificação, com, respectivamente, 90 (4942s), 50, 80 e 10% do volume do PCM no estado líquido.

Figura 5.29 - Distribuição de fração de líquido no do PCM 90% (4942s) do seu volume fundido



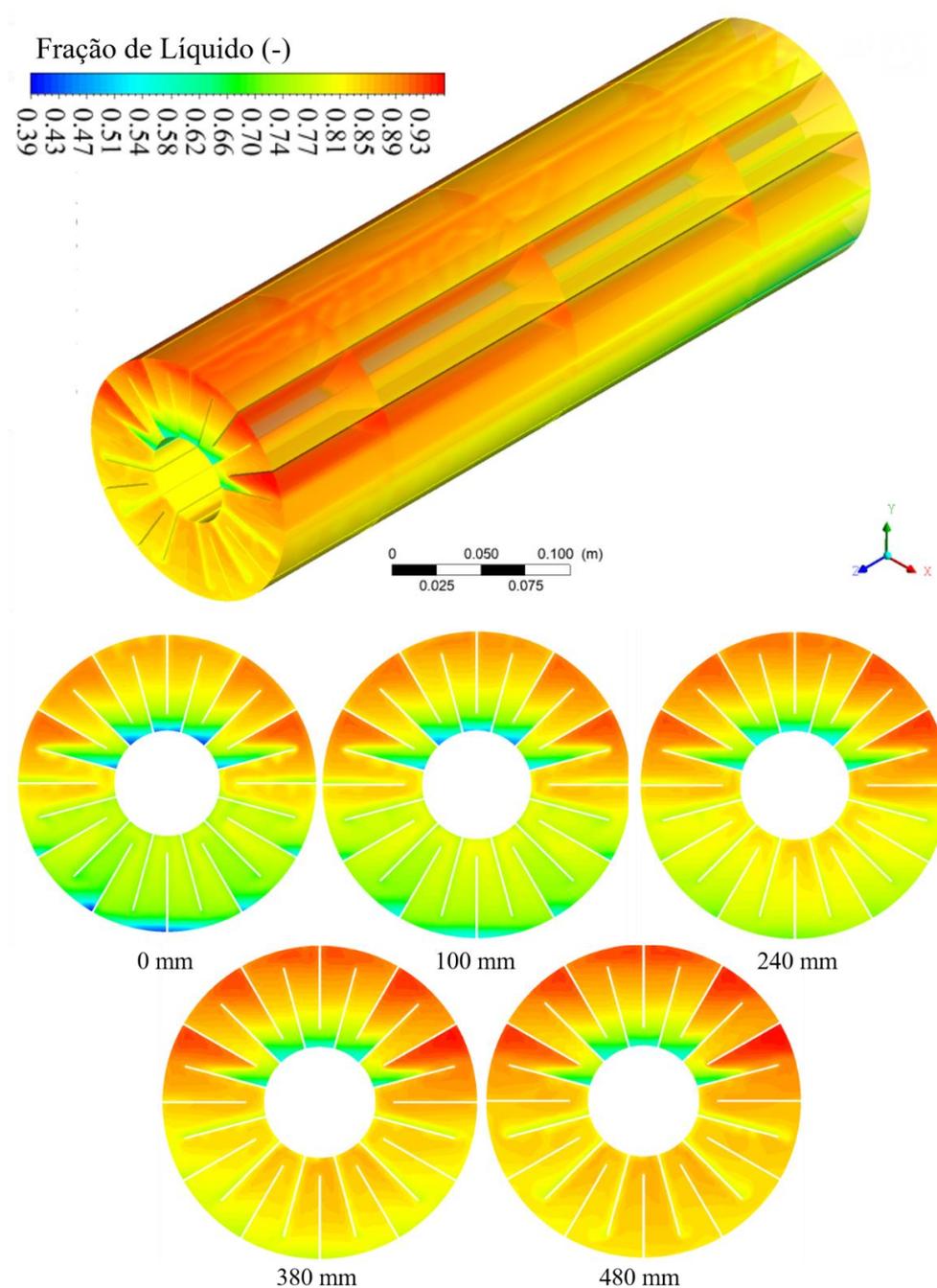
Na etapa referente a Figura 5.29, pode-se observar, dentro de uma faixa de 48 a 100% de fração de líquido, as seguintes características: na seção de entrada do TTHX ($z = 0$ mm), frações com 48% de líquido em sua composição, são depositadas nas regiões próximas a face superior da superfície interna e a face inferior da superfície externa do anular; na seção a 100 mm da entrada essas frações só se encontram nas regiões próximas a face superior da superfície interna do anular; na seção a 240 mm da entrada, apenas valores de fração de líquido superiores a 62% são encontrados; já para as seções a 380 e 480 mm, valores acima de 70%. Esse comportamento distinto ao longo do comprimento do material se deve ao processo de aquecimento do CHTF, o que diminui o gradiente de temperaturas entre este e o PCM, na medida que o mesmo atravessa as seções do TTHX. As duas últimas seções (380 e 480 mm), apresentaram configurações muito similares, indicando que essa redução no potencial de solidificação, para esse instante do processo, não tem efeito significativo, para os comprimentos das referidas seções.

Na Figura 5.30, dentro de uma faixa de 39 a 100% de fração de líquido, as seguintes características são observadas: na seção de entrada do TTHX ($z = 0$ mm), as regiões próximas a face superior da superfície interna e na face inferior da superfície externa do anular, acumulam frações de PCM com 39% de líquido em sua composição, o que é restrito, na seção com 100 mm, apenas nas regiões próximas a face superior da superfície interna do anular. Um comportamento semelhante a um escorrimento, nas regiões próximas as aletas são apresentadas nessas duas primeiras seções, devido as variações de densidades, em meio ao campo gravitacional. A 240 mm da entrada, tem-se na metade inferior do anular, valores de fração de líquido acima de 75 e abaixo de 81%; valores em torno 93%, nas regiões mais próximas a parte superior da superfície externa e em torno de 60%, nas regiões mais próximas a parte superior da superfície interna do anular, as quais, mesmo com frações mais pesadas, são retidas na metade superior, devido a geometria das aletas. Nas seções com 380 e 480 mm, os níveis mínimos de fração de líquido encontram-se em torno de 70% e a leve diferença entre elas é que a 380 mm, tem-se o surgimento inicial desses níveis de fração, na metade inferior do anular, enquanto a 480 mm os mesmos são limitados a parte superior.

Na Figura 5.31, dentro de uma faixa de 14 a 63% de fração de líquido, as seguintes características são observadas: na seção de entrada do TTHX ($z = 0$ mm), as regiões próximas a face superior da superfície interna e na face inferior da superfície externa do anular, acumulam frações de PCM com 14% de líquido em sua composição; na seção com 100 mm, tem-se valores mais homogêneos ao longo de toda a seção, variando entre 25 e 45%. Apenas nas regiões próximas a face superior da superfície externa do anular, encontram-se valores acima deste intervalo. Um comportamento semelhante, ocorre para a seção de 240 mm, tendo mais regiões preenchidas com

frações acima de 50%, na metade superior do anular. O escoamento das frações mais pesadas, com menores quantidades de líquido em sua composição, é apresentado nessas duas últimas seções, 380 e 480mm, sendo estas ainda as mais aquecidas, grande parte da sua geometria preenchida com valores acima de 50% de líquido.

Figura 5.30 - Distribuição de fração de líquido no PCM 80% (5272s) do seu volume fundido



Na Figura 5.32, dentro de uma faixa de 0 a 25% de fração de líquido, as seguintes características são observadas: na seção de entrada do TTHX ($z = 0\text{mm}$), as regiões próximas a superfície interna no anular já se encontram completamente solidificadas, enquanto nas regiões

próximas superfície externa, principalmente na metade superior, encontra-se frações de líquido em torno de 10%. Na seção a 100 mm, uma quantidade menor de regiões próximas a superfície interna do anular encontra-se com 0% de fração de líquido, o que se estende para a seção com 240 mm, surgindo nesta, frações de líquido por volta de 20% nas proximidades da face superior superfície externa do anular. Nas seções com 380 e 480 mm, observa-se que frações com 25% de líquido se distribuírem, quase que simetricamente nos entornos da superfície externa do anular, o que ocorre devido à restrição de movimentação que as frações solidificadas passam a impor naquelas, ainda no estado líquido, que nos instantes anteriores poderiam se deslocar para metade superior do anular.

Figura 5.31 - Distribuição de fração de líquido no do PCM 50% (6522s) do seu volume fundido

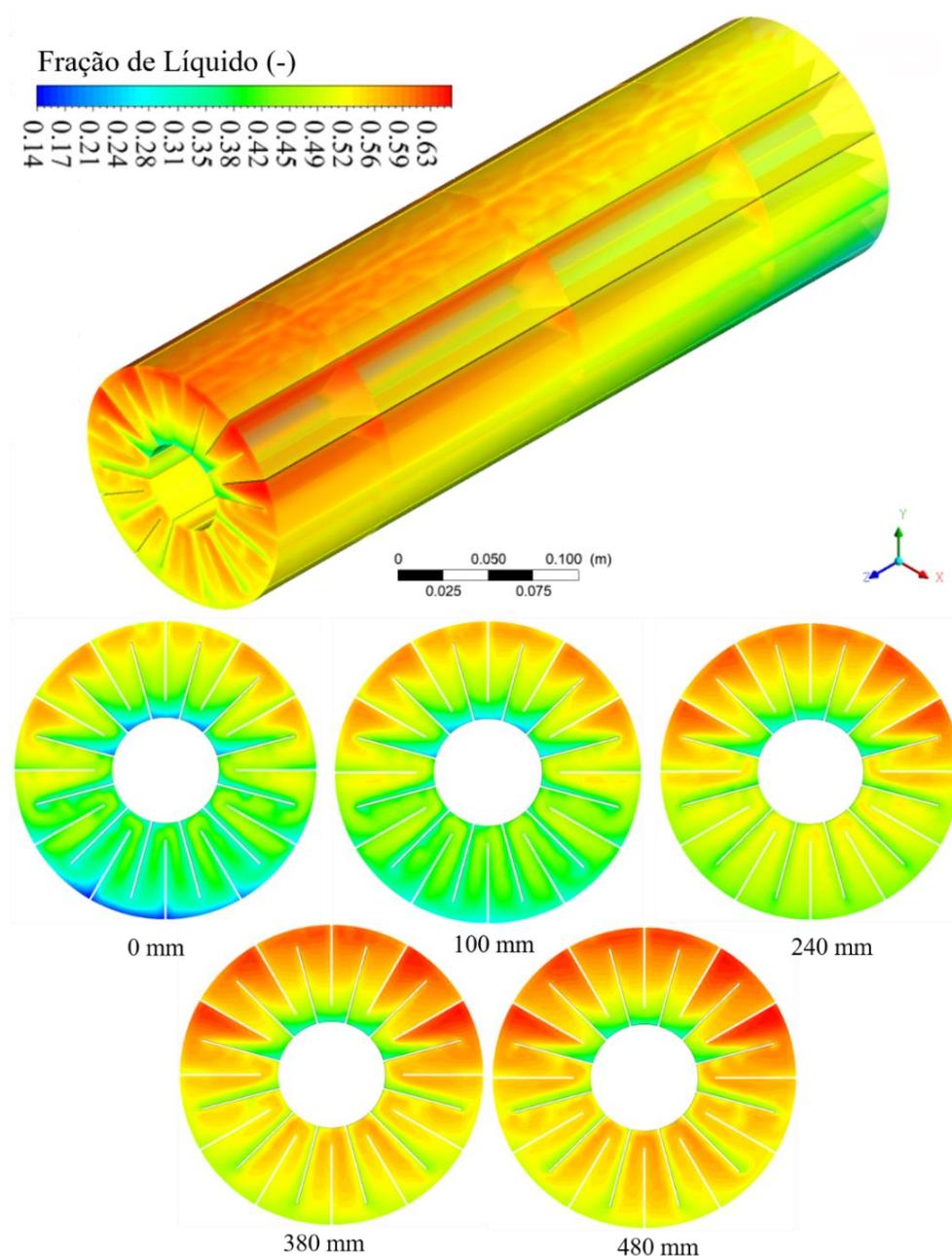
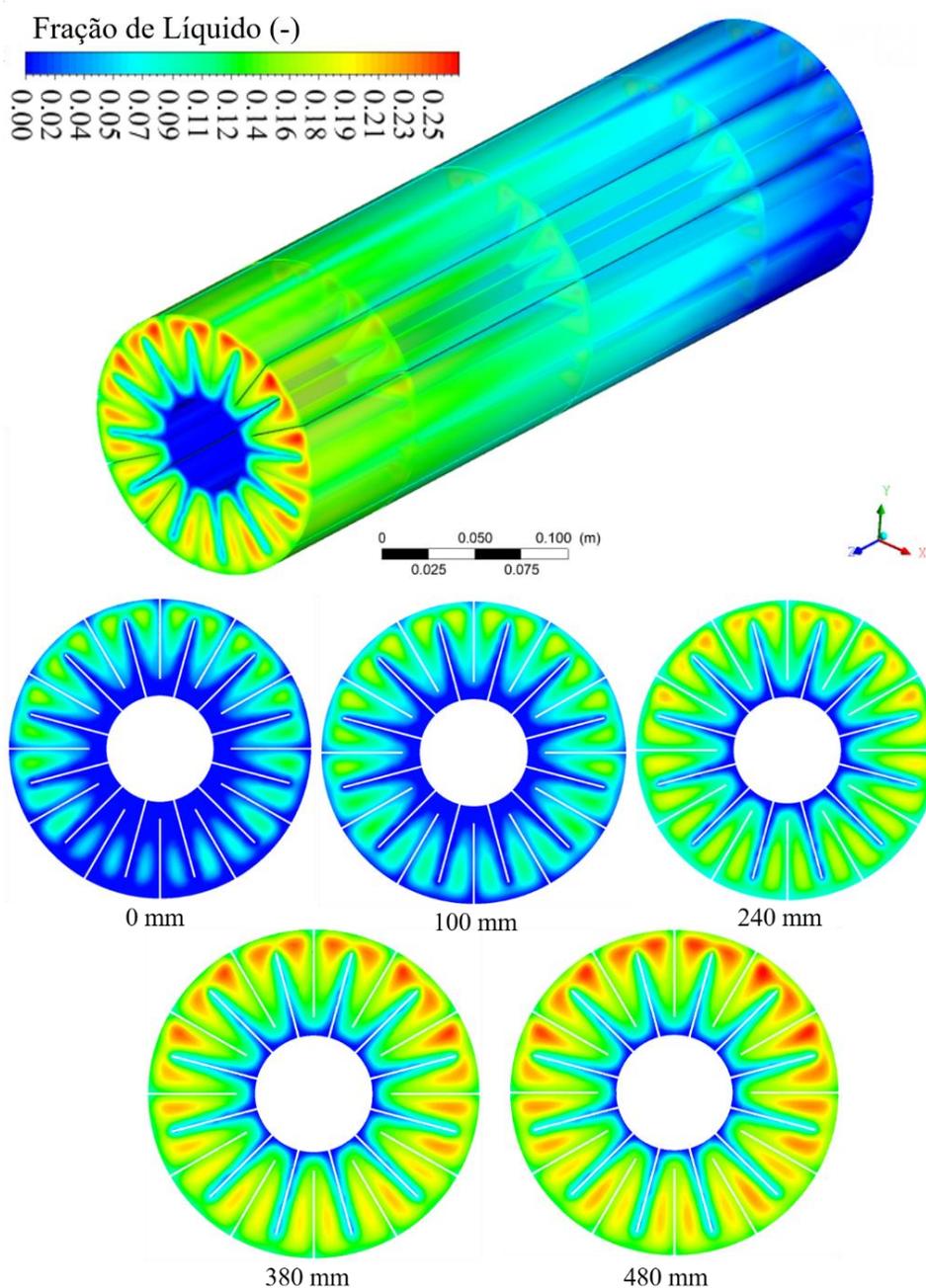


Figura 5.32 - Distribuição de fração de líquido no do PCM 10% (10293s) do seu volume fundido

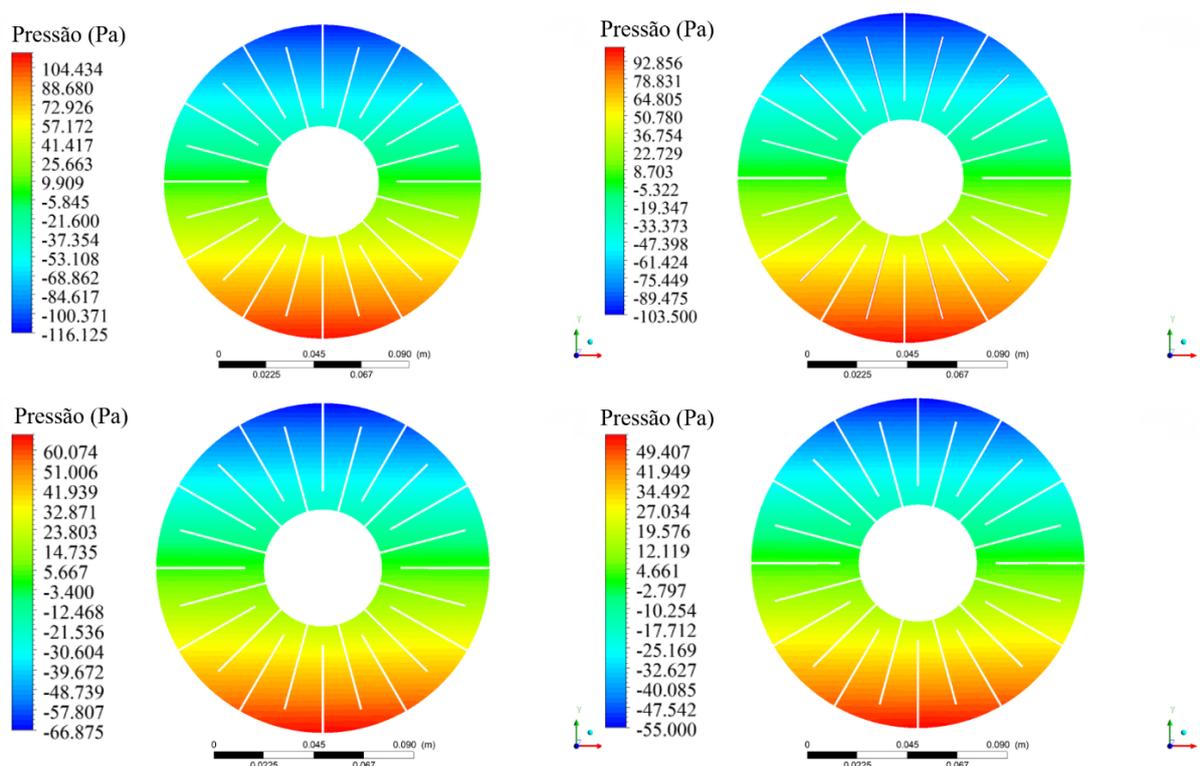


5.4.1.4.3 Distribuição de Pressão no PCM

Nas Figuras 5.33 a 5.36, são apresentadas as distribuições de pressão ao longo do volume do PCM, para os instantes onde 90, 80, 50, 40 (7112 s), 30 (7852 s), 20 (8862 s) e 10% do material encontra-se no estado líquido. Devido ao aumento na densidade do material, ao longo do processo de solidificação, observa-se reduções na variação de pressão, dentro do volume do PCM. Inicialmente, estando material totalmente líquido, as variações de pressão ao longo do volume são

máximas (aproximadamente ± 130 Pa), como foi apresentado para o estado com 100% de líquido, na análise do processo de fusão. À medida que o material passa pelo processo de solidificação, o mesmo tende a contrair o seu volume, reduzindo os níveis de pressão no seu interior. Tendo a linha do eixo do TTHX como o nível de pressão manométrica nula, ao longo do eixo y, pressões são desenvolvidas positiva, abaixo desta linha e negativamente, acima do eixo, com variações cada vez menores, até que não existam mais diferenças nos níveis de pressão entre a metade superior e inferior do anular.

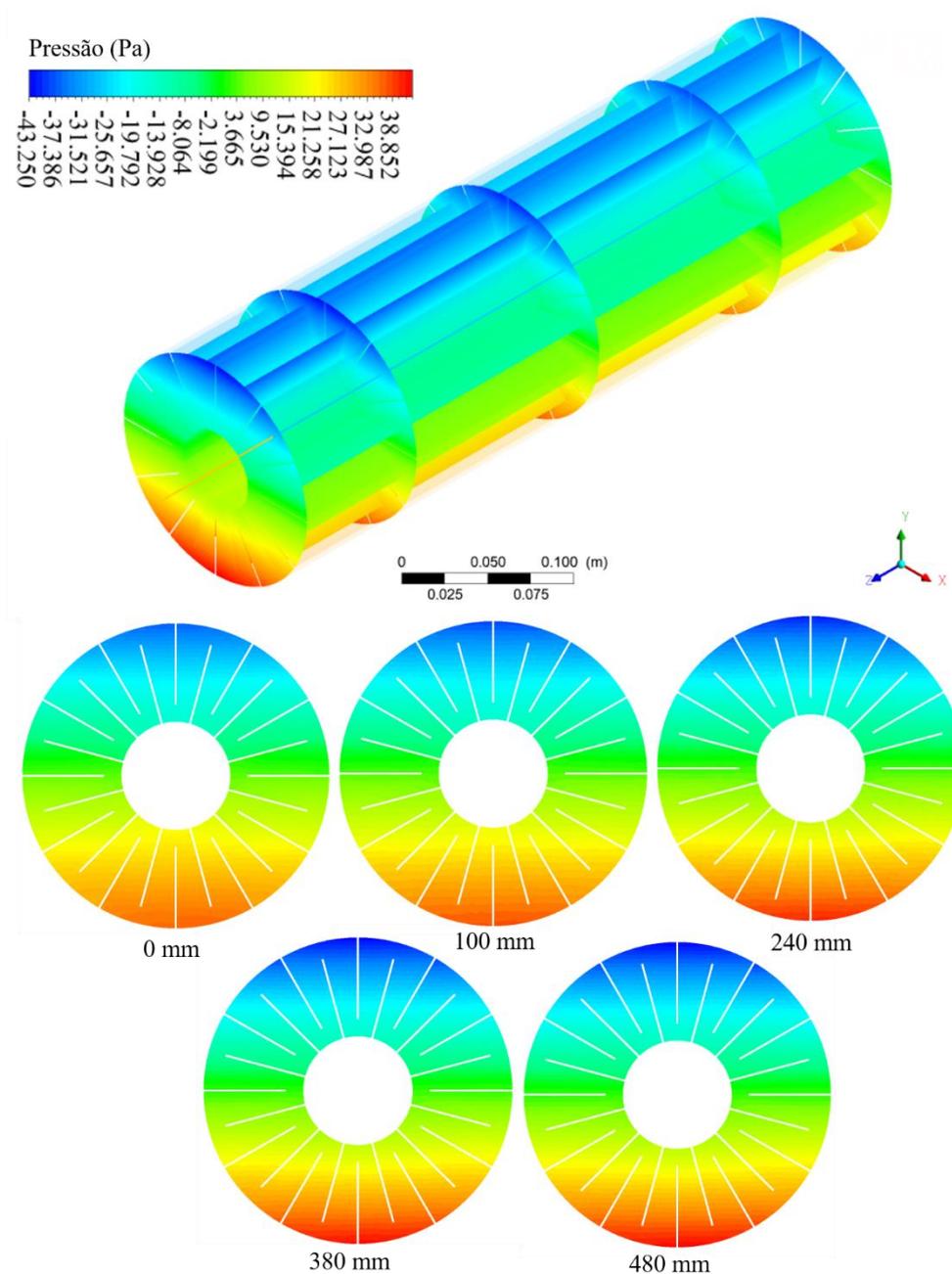
Figura 5.33 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 90 (4942 s), 80 (5272 s), 50 (6522 s) e 40% (7112 s) do seu volume fundido



Estando o material com 90, 80 50 e 40% de fração de líquido, se observou variações dos níveis de pressão ao longo do comprimento, indicando que o processo de solidificação ocorre de forma mais homogênea que a fusão onde, para valores de 50% de fração de líquido, ainda se observava pequenas variações nas configurações de pressão, ao longo do comprimento do material. Desta forma, a Figura 5.33 ilustra as configurações padrão, ao longo do comprimento, para os instantes onde 90 (faixa entre -116 e 120 Pa), 80 (faixa entre - 104 e 114 Pa), 50 (faixa entre -66 e 70 Pa) e 40% (faixa entre -55 e 55 Pa) do volume do PCM encontra-se no estado líquido. Os intervalos negativos são menores que os positivos, porque na metade inferior do anular encontram-se as frações mais pesadas, o que proporciona maiores colunas de pressão hidrostática nessa região.

Esta diferença é reduzida na medida que o material solidifica, onde todo o anular, passa a estar preenchido com frações pesadas do PCM.

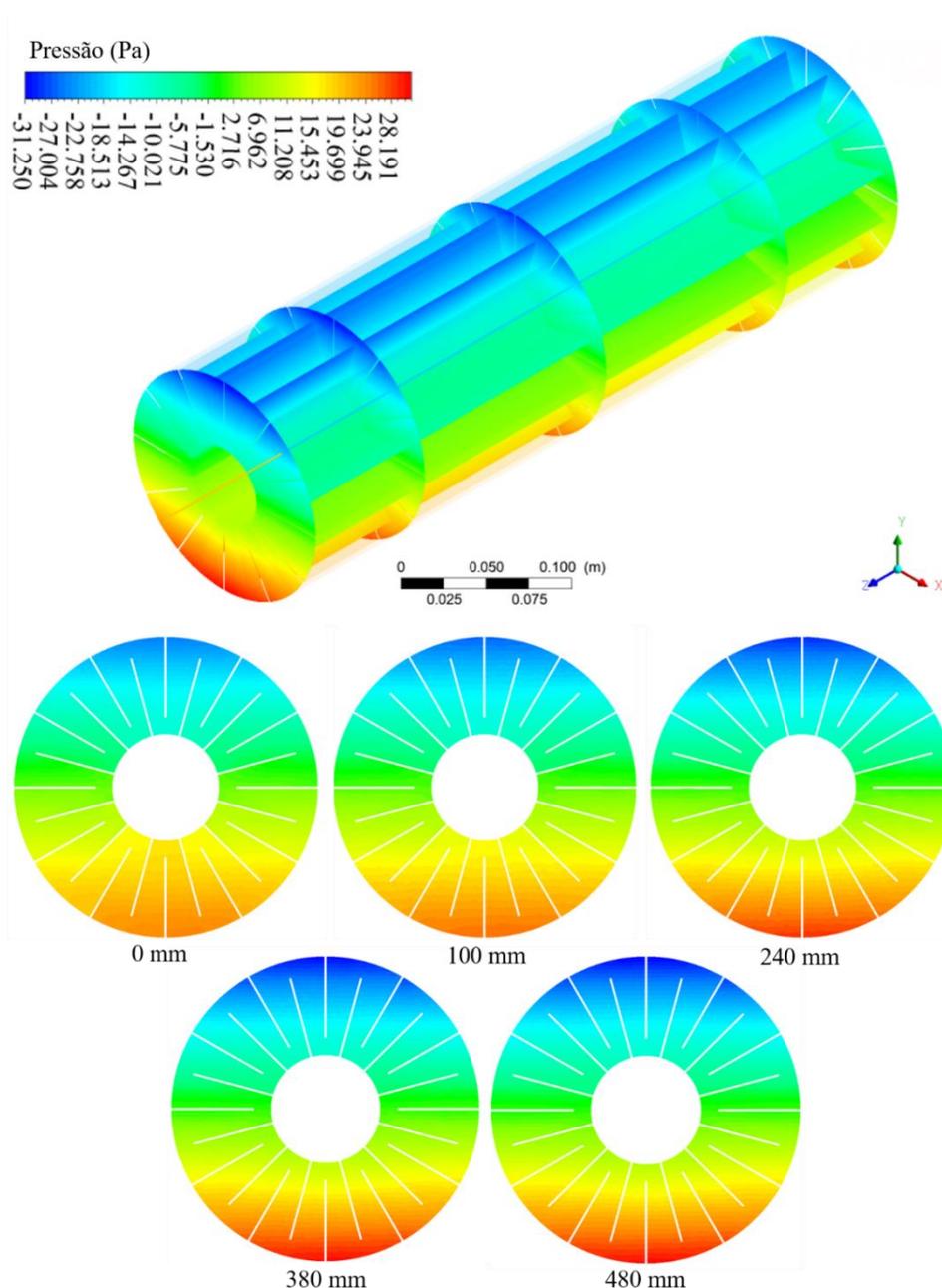
Figura 5.34 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 30% (7852 s) do seu volume fundido



Na Figura 5.34, observa-se as primeiras variações nos níveis de pressão, ao longo do comprimento do PCM, serem desenvolvidas. Dentro de um intervalo entre -43 a 44 Pa, observa-se as seções de 0 mm a 480 mm da entrada, com contornos mais definidos nessa direção. Isto é, na medida que as seções mais próximas a entrada são resfriadas, mais rapidamente que as seções subsequentes, as variações de pressão ao longo do comprimento do PCM, são menos intensas.

Comparando a seção de 0 mm com a de 480 mm, observa-se na parte superior do anular, pressões negativas tendendo a valores próximos a -25 Pa e a -43 Pa, respectivamente. Na metade inferior do anular, tem-se para a seção de 0mm, pressões positivas que tendem a valores próximos de 33 Pa e na seção com 480 mm, valores que se aproximam de 39 Pa.

Figura 5.35 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 20% (8862 s) do seu volume fundido



Na Figura 5.35, comparando as referidas seções, observa-se na parte superior do anular, pressões negativas tendendo a valores próximos de -18 Pa e -31 Pa e na metade inferior do anular, pressões positivas que tendem a valores próximos de 20 Pa e 28 Pa.

Figura 5. 36 - Distribuição de pressão no domínio PCM para 10% (10293 s) do seu volume fundido

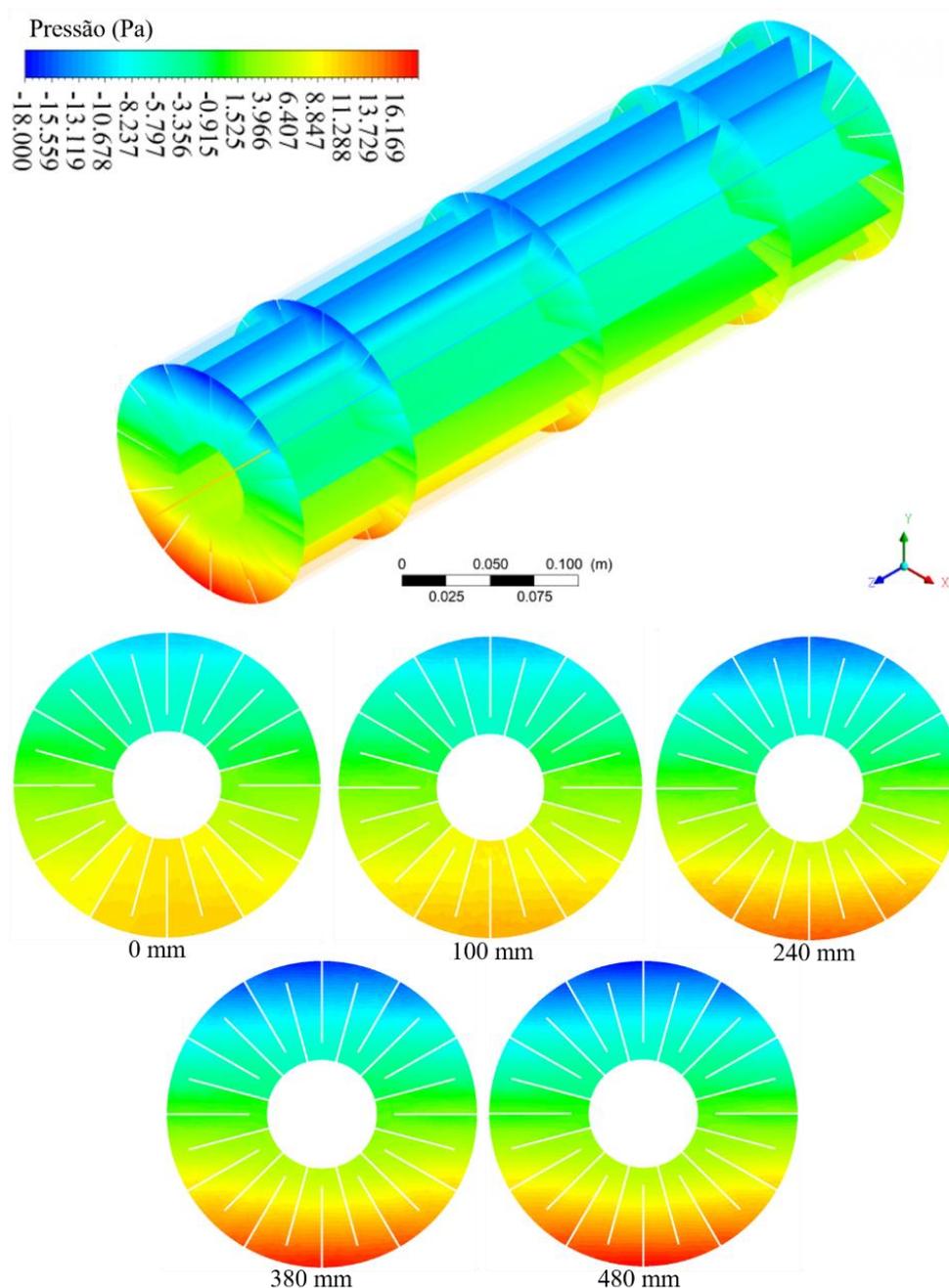


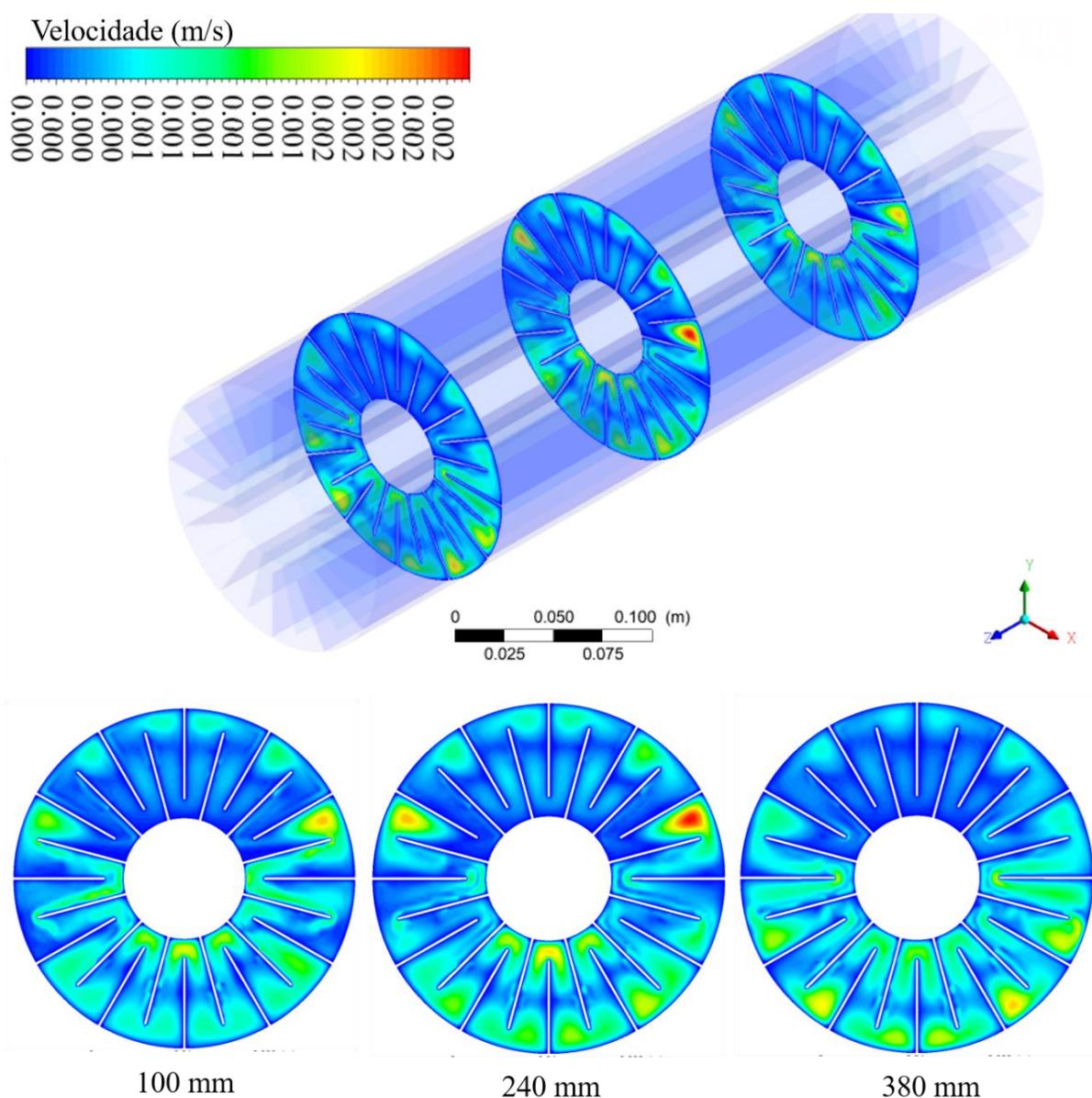
Figura 5.36, pressões negativas tendendo a valores próximos a -8 Pa e -18 Pa, na metade superior do anular e na metade inferior, pressões positivas que tendem a valores próximos de 8 Pa e 18 Pa, mostrando o alcance da simetria de pressões em relação ao eixo de referência, já para estes níveis de solidificação.

5.4.1.4.4 Distribuição de velocidades no PCM

As distribuições ilustradas nas Figuras 5.37 a 5.40, tem-se as velocidades desenvolvidas no PCM, devido as forças de empuxo existentes na estrutura do material, quando das variações de

densidades, decorrentes do resfriamento do mesmo. O PCM, inicia o processo de solidificação, no estado totalmente líquido, com velocidades na ordem de 10^{-4} , como apresentado na análise da fusão. À medida que o material tem sua temperatura reduzida, o mesmo aumenta sua densidade, o que, em meio a força gravitacional, converte-se em deslocamentos, que variam de acordo com o grau de solidificação existente no material. Como ressaltado na seção 5.4.1.3.4, estes deslocamentos fazem com que, o processo de transferência de calor ocorra por convecção natural além da difusão térmica.

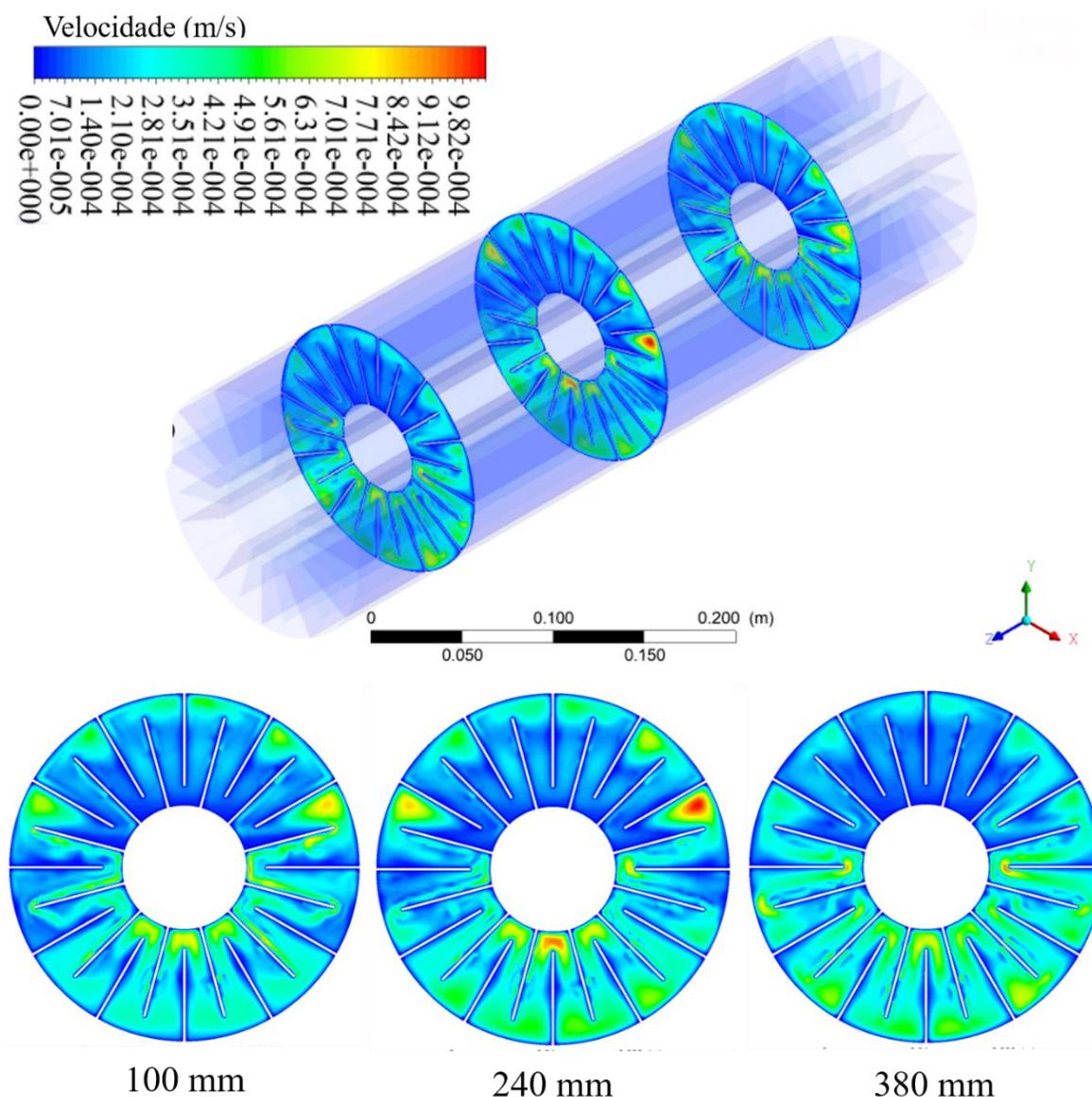
Figura 5.37 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 90% (4942 s) do seu volume fundido



Observa-se na Figura 5.37, velocidades que variam entre 2×10^{-3} e 0 m/s. Constate-se, que a perturbação do estado final da fusão, gera níveis de velocidades para 90% de fração de líquido, inferiores aos encontrados para essa mesma quantidade de líquido, quando no processo de fusão.

Isto ocorre devido a estabilidade física das frações de líquido no processo de fusão, ser atingida mais próximo ao final, o que são equivalentes aos valores iniciais do processo de solidificação. As três seções analisadas apresentam valores próximos em suas configurações, e observa-se regiões com velocidades nulas, distribuídas ao longo da seção, devido as frações de líquido estarem praticamente paradas, no final do processo de fusão, haja visto que nesse instante, são poucas as frações de sólido formadas, como foi ilustrado no processo de fusão.

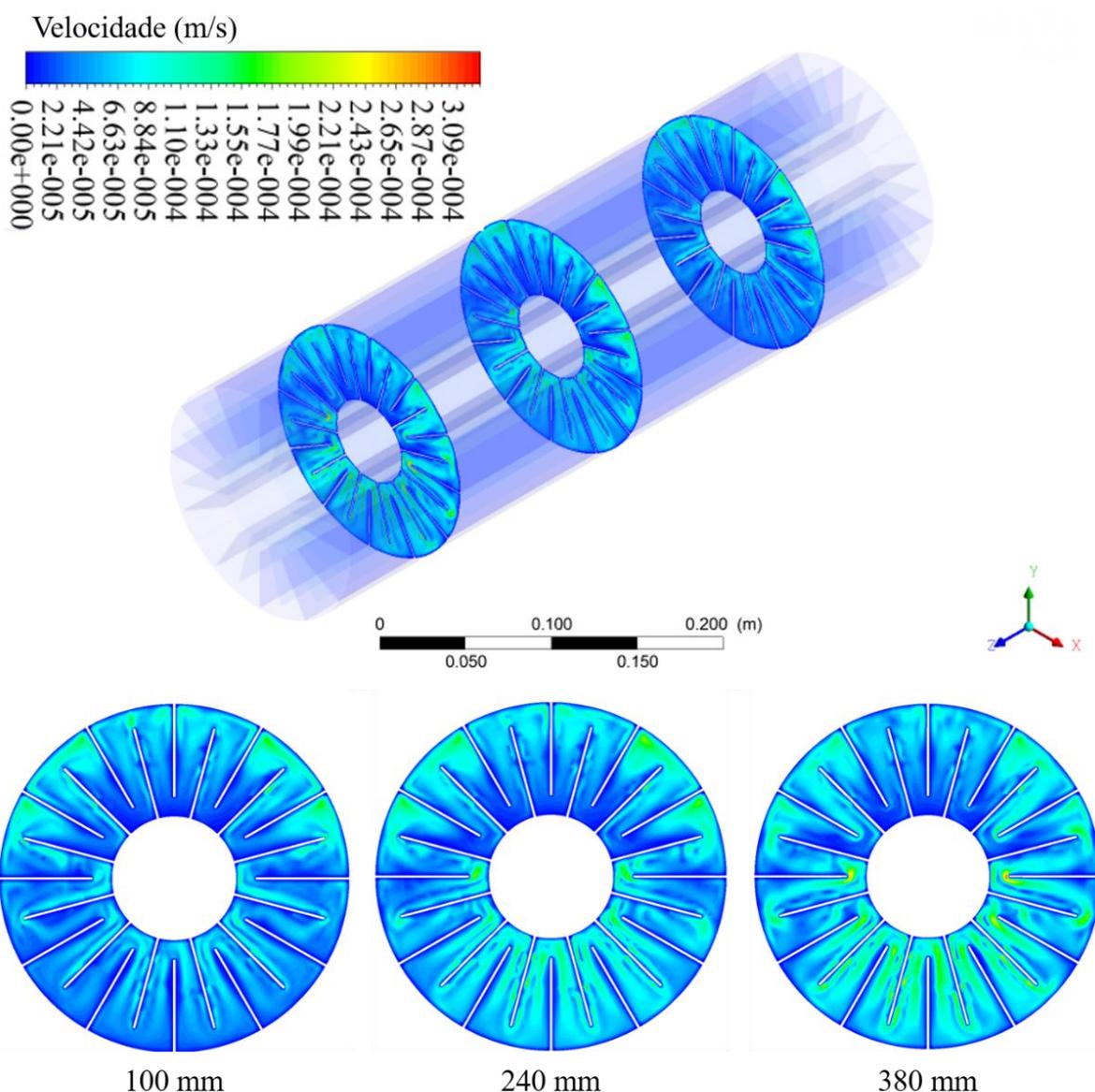
Figura 5.38 - Distribuição de velocidades no domínio PCM para 80% (5272 s) do seu volume fundido



Na Figura 5.38, observa-se que a faixa de velocidades é reduzido para valores máximos próximos a $9,8 \times 10^{-4}$ m/s. As velocidades iguais a 0 m/s, são concentradas na parte inferior da metade superior do anular, o que se deve a, neste instante de tempo, as frações mais pesadas estarem

se depositando nesta região a restringindo a movimentação dos fluidos. Encontra-se níveis mais elevados de velocidades na seção de 240 mm, devido a esta se caracterizar como uma linha limitante entre os dois mecanismos sumidouros de velocidade, a saber, a estabilidade inicial da fase líquida e a mudança desta para fase sólida.

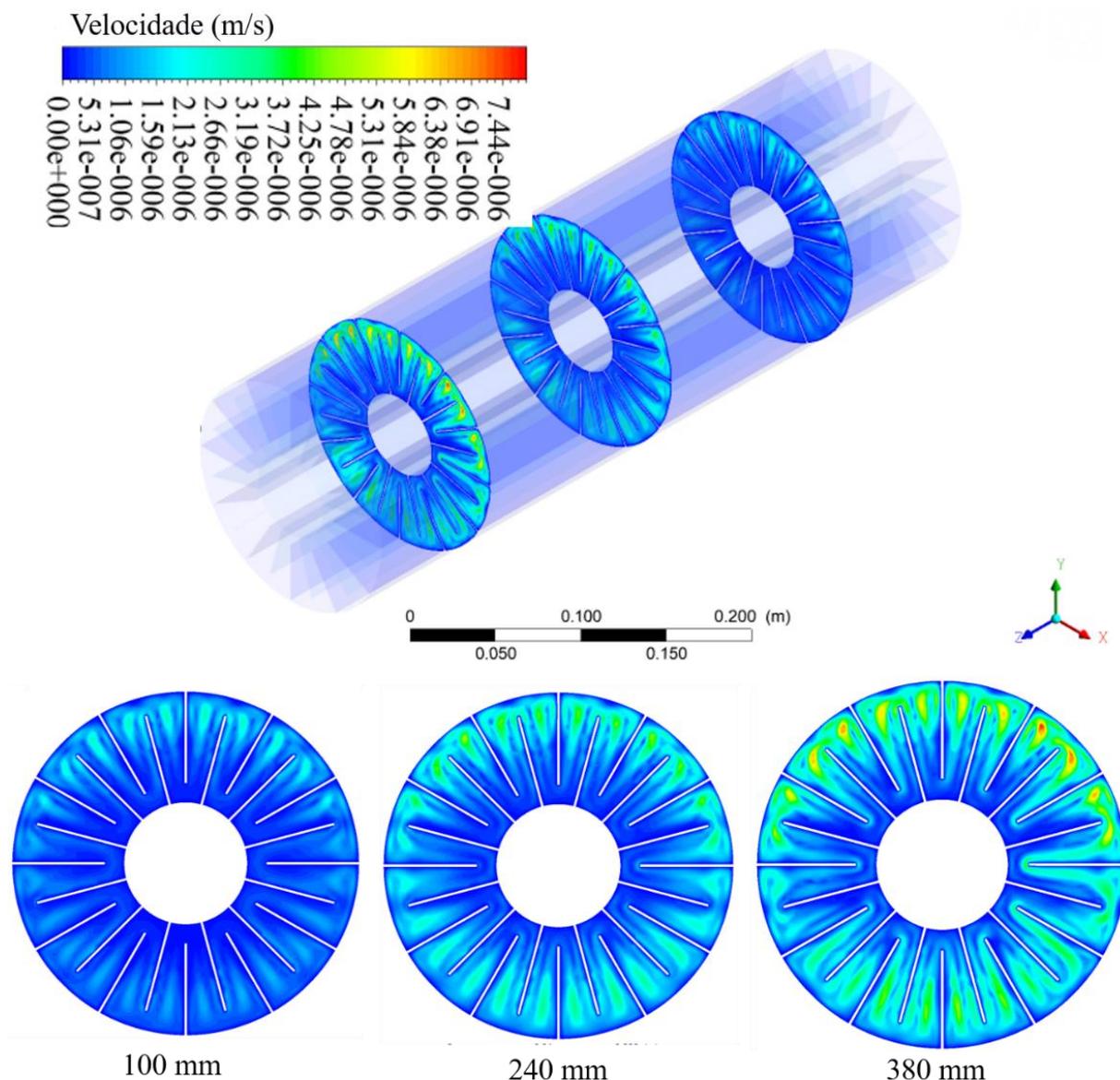
Figura 5.39 Distribuição de velocidades no domínio PCM para 50% (6522 s) do seu volume fundido



Na Figura 5.39, observa-se que a faixa de velocidades reduz-se para valores médios de $1,7 \times 10^{-4}$ m/s, as quais são distribuídas mais homogeneamente nas seções a 240 e 380 mm que na seção com 100 mm da entrada, onde nitidamente, observa-se um acumulo de velocidades diferentes de 0m/s, na metade superior do anular, o que se deve ao processo de solidificação, ter se desenvolvido mais intensamente na metade inferior do anular, nesta seção, que nas demais.

Ao se atingir 10% de fração de líquido no volume do PCM, Figura 5.40, observa-se velocidades máximas na ordem de 10^{-6} , para as referidas seções de análise. Conclui-se, portanto, que o material volta a estar praticamente estático neste instante do processo de solidificação.

Figura 5.40 Distribuição de velocidades no domínio PCM para 10% (10293 s) do seu volume fundido



5.5 Resultados quantitativos

Nesta seção, foram tratados os aspectos quantitativos dos casos estudados: energia latente e sensível, absorvida ou liberada pelo PCM, fluxos de calor provenientes das superfícies externa do tubo intermediário e interna do tubo externo, temperatura e fração de líquido médias do PCM, medidas nas 5 seções de análise, já referidas nos tópicos anteriores e temperatura média do HTF,

medida na seção de saída das tubulações, ao longo dos ciclos de carregamento e descarregamento do PCM.

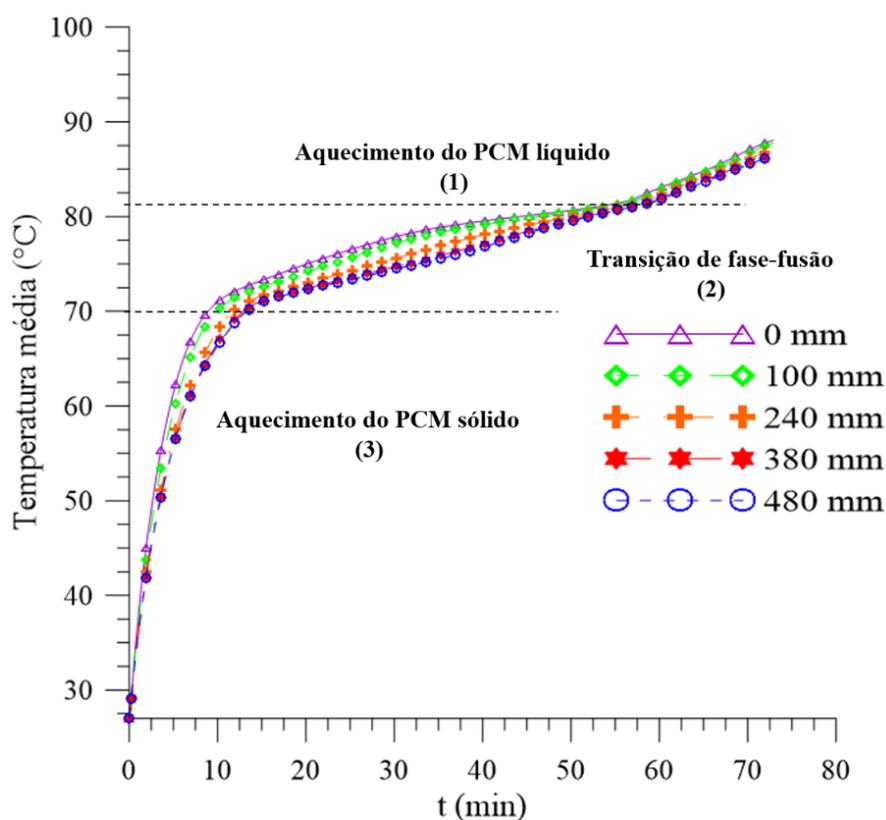
5.5.1. Análise em configuração proposta

Nesta seção foram discutidos os resultados quantitativos referentes a configuração proposta neste trabalho (Configuração 2). Propõe-se definir as variáveis quantitativas, criando parâmetros de análise que foram utilizados na seção 5.5.2 para comparar os processos de fusão e solidificação com a geometria utilizada na validação (configuração 1).

5.5.1.1 Temperatura

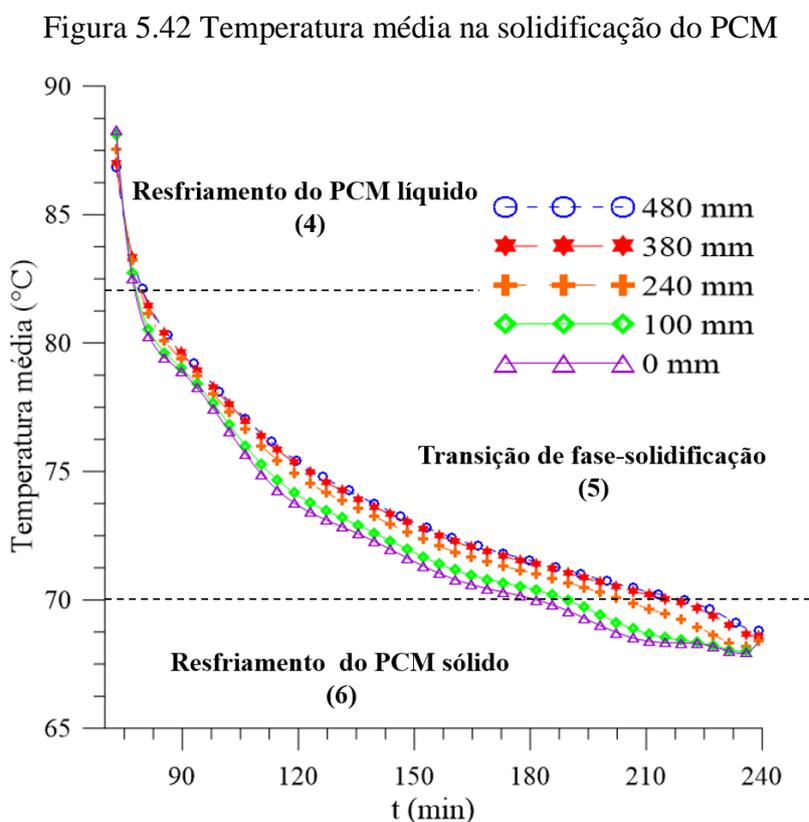
A Figura 5.41 ilustra, para valores médios, as temperaturas medidas no PCM- (média na superfície) nas seções a 0, 100, 240, 380 e 480 mm da entrada do TTHX, para o processo de fusão, estando o HHTF com 90°C e o PCM inicialmente a 27°C. Destaca-se no gráfico, três etapas distintas do processo de fusão: (1) o aquecimento do PCM líquido até a temperatura de fusão do material, 70°C; (2) a transição de fase que ocorre entre 70 e 82°C; (3) O aquecimento do PCM líquido para valores médios de temperatura acima de 82°C. Esta última etapa representa o tempo necessário, para que todas as frações no volume do material, sejam completamente fundidas.

Figura 5.41 - Temperatura média na fusão do PCM



A primeira etapa, ocorre dentro de aproximadamente 8 min, para a seção de entrada do TTHX, $z = 0$ mm, e por volta de 15 min, para seção $z = 480$ mm. A segunda etapa ocorre entre 15 e 60 min, apresentando variações máximas, entre as seções de 0 e 480 mm, por volta de 10°C , o que ocorre em, aproximadamente, 30 min do processo. Já a terceira etapa, se dá entre 60 e 72 min, com valores muito próximos para todas as seções. Como descrito, qualitativamente, na seção 5.4.1.3.1, essas diferenças nas temperaturas médias dos planos de análise, ocorrem devido ao aquecimento do PCM, ao longo do seu comprimento, ser paralelo ao resfriamento do HHTF, o que faz com que as seções mais a jusante da entrada, aqueçam mais lentamente.

A Figura 5.42 está representando a evolução da temperatura média no PCM, inicia-se o processo de solidificação, a partir dos 72 min, necessários para a fusão completa do PCM. Devido o CHTF ser injetado com temperatura (68°C) muito próxima a linha sólidos do material, tem-se um processo de solidificação mais lento que o de fusão, onde se tinha diferenças mais acentuadas entre as temperaturas inicial do PCM (27°C) e o do HHTF (90°C).

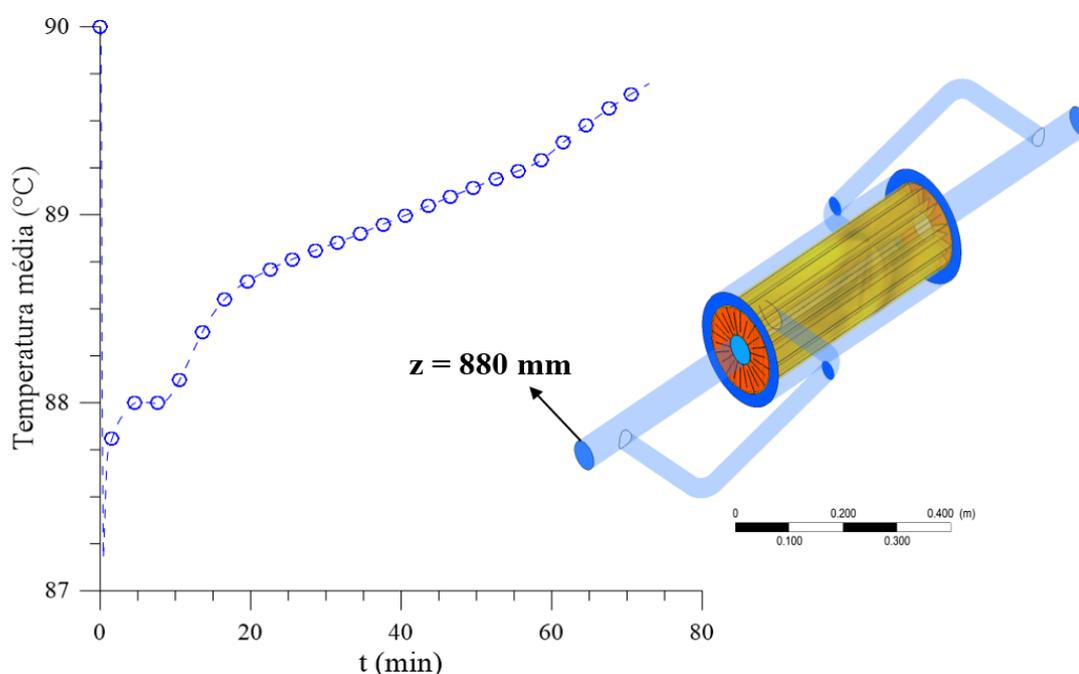


Desta forma, tem-se, as seguintes etapas ao longo da solidificação completa: (4) o resfriamento, a partir da temperatura final de fusão, 84°C , até a temperatura líquidos do PCM; (5) a

solidificação do material, que ocorre na faixa de temperaturas já referido; (6) o resfriamento do PCM até que todas as frações contidas no volume do mesmo, atinjam o estado sólido. Neste caso, a etapa 4 se dá, em menos de 10 min de resfriamento, o que equivale a 80min do tempo total do ciclo (fusão -solidificação). A etapa 5, ocorre entre 80 e 170 min, para a seção $z = 0$ mm e entre 80 e 200 min para a seção $z = 480$ mm; Na sequência, a etapa 6 ocorre, até que em 240 min atinge-se, para a seção mais a jusante da entrada, $z = 480$ mm, a temperatura sólidos, em todas as regiões da mesma, o que já tem ocorrido para as demais seções.

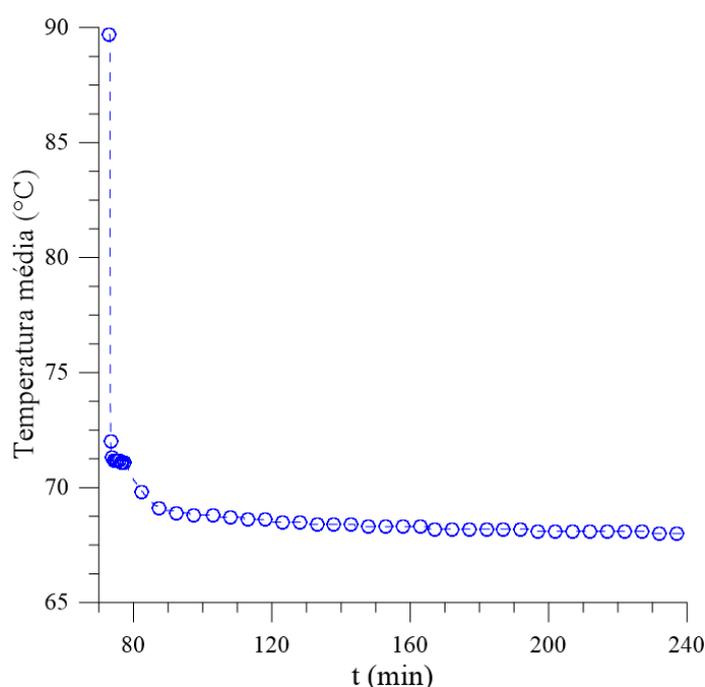
Na Figura 5.43, tem-se as medidas transientes de temperatura média do HHTF, ao longo do processo de fusão, retiradas na seção $z = 880$ mm. Inicialmente, a água que entra nas tubulações com temperatura de 90°C é bruscamente resfriado para valores próximos a 87°C . Na sequência, o mesmo passa a aumentar sua temperatura até 88°C , dentro dos primeiros 10 min de aquecimento, que é correspondente ao tempo levado para as temperaturas médias das seções do PCM atingirem a temperatura líquidos do mesmo. Entre 10 e 20 min, o HHTF aquece rapidamente para $88,5^{\circ}\text{C}$ e, posteriormente, segue aumentando sua temperatura de maneira constante até, no final do processo, atingir valores próximos a $89,75^{\circ}\text{C}$. A velocidade de aquecimento é reduzida, ao longo do tempo, devido as diferenças de temperaturas, entre o PCM e o HHTF, serem reduzidas ao longo do processo de fusão.

Figura 5.43 Temperatura do fluido de aquecimento na saída do trocador de calor (Média na superfície)



Na Figura 5.44, tem-se a mesma variável para o processo de resfriamento do PCM: neste caso, devido a injeção do fluido frio (CHTF) estando as tubulações do trocador preenchidas com água quente, do final do processo de fusão, tem-se inicialmente uma queda brusca na temperatura de saída, de 90 para 71°C e, nos primeiros 10 min de descarregamento o CHTF atinge valores próximos a 69°C o que, a partir de então, é lentamente reduzido até 68°C, no final do processo de solidificação.

Figura 5.44 - Temperatura média do fluido de resfriamento na saída do trocador de calor

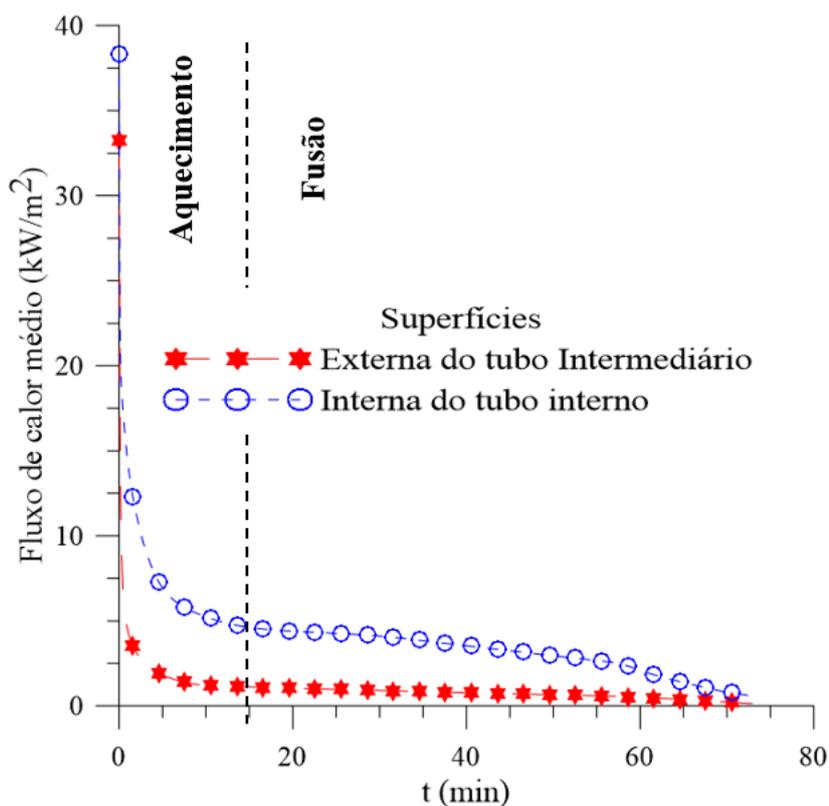


5.5.1.2 Fluxos

As Figuras 5.45 e 5.46, ilustram os resultados obtidos para os fluxos de calor médios, medidos na superfície interna do tubo interno e externa do tubo intermediário, durante os processos de fusão e solidificação, respectivamente. Esses resultados indicam as quantidades de energia associadas ao escoamento do HTF nas suas partes externa e interna. Observa-se na Figura 5.45, que um pico de fluxo de calor é apresentado no início do processo de carga do PCM, para as duas superfícies referidas, o que ocorre devido ao choque térmico entre as temperaturas do HHTF e do PCM, no início do processo de carga. Para superfície interna do tubo interno, o pico de fluxo é de aproximadamente 38 kW/m² e para superfície externa do tubo externo, de 33 kW/m². Esta diferença é decorrente da variação das velocidades existentes entre os tubos interno e anular externo do HTF. À medida que o PCM é aquecido, a intensidade dos fluxos, em ambas as superfícies é reduzida. Observa-se, que em aproximadamente 15 min, o fluxo médio na superfície externa encontra-se próximo a 0,5 kW/m² enquanto na superfície interna, tem-se 10 vezes esse valor, estando o mesmo

próximo a 5 kW/m^2 . Ao longo do processo de fusão, estes fluxos são reduzidos, de maneira aproximadamente constante, até o final da fusão quando os mesmos são nulos.

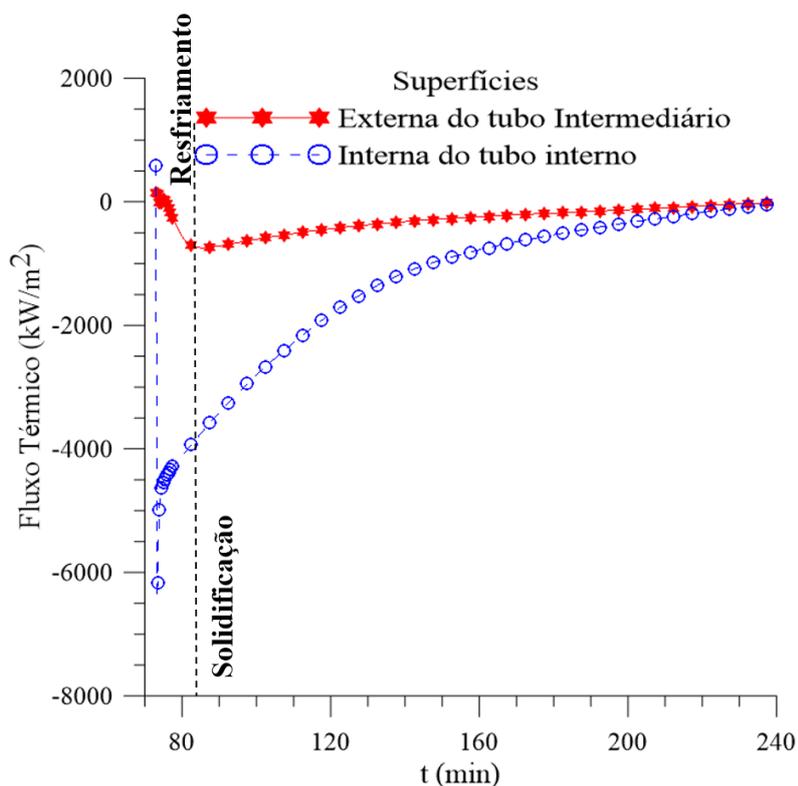
Figura 5.45 - Fluxo térmico para as superfícies externa do tubo intermediário e interna do tubo interno, ao longo do processo de fusão.



Na Figura 5.46, os fluxos ocorrem no sentido negativo, a saber, retirando-se energia térmica do PCM, o que se espera do processo de descarga. As variações entre os fluxos externo e interno continuam a ocorrer, devido aos regimes de velocidades permanecerem inalterados, em relação ao processo de fusão. Inicialmente, tem-se, o pico de fluxo negativo para a superfície interna, devido ao choque térmico entre o CHTF e a referida superfície. Com relação a superfície externa, constata-se que esta redução ocorre de forma mais gradativa, que quando observada no processo de fusão. Isto se dá, devido ao processo de retirada do fluido quente do TTHX, ocorrer lentamente para a parte externa do HTF. Misturando frações de líquido quente com frações mais frias até que o HHTF seja totalmente repellido do TTHX, em cerca de 512 s do processo de descarga. Comparando-se os valores absolutos dos fluxos no processo de fusão com os do processo de solidificação, constata-se que estes são cerca de 5 vezes menores, o que se dá, devido a diferença de temperaturas do CHTF em relação ao PCM ser equivalente a 25% da diferença entre as temperaturas do HTF e do PCM,

no início dos seus respectivos processos. Neste caso, observa-se os valores absolutos dos fluxos negativos, serem reduzidos a zero ao longo do processo de solidificação.

Figura 5.46 - Fluxo térmico para as superfícies externa do tubo intermediário e interna do tubo interno, ao longo do processo de solidificação.

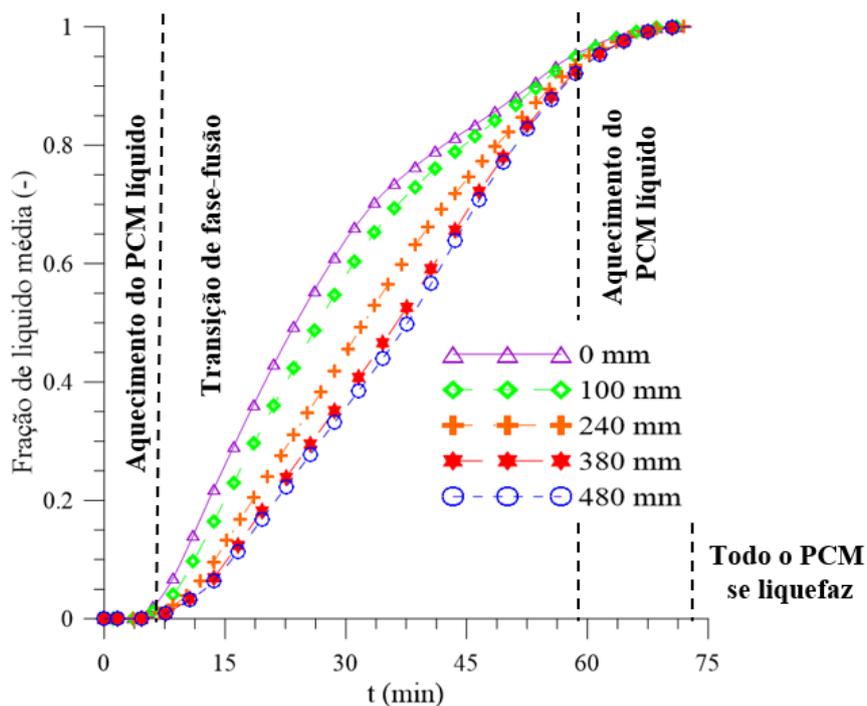


5.5.1.3 Fração de líquido média

As Figuras 5.47 e 5.48, descrevem as frações líquido médias, medidas nas seções de análise, a 0, 100, 240, 380 e 480 mm da entrada do TTHX, ao longo dos processos de carga e descarga do PCM.

Na Figura 5.47, observa-se, que leva cerca de 10 min para a seção mais distante, 480 mm, da entrada, atingir valores de fração de líquido diferentes de zero, quando o material entra na região de transição. Ao longo do carregamento, tem-se poucas diferenças em relação as seções a 380 e 480 mm da entrada, as quais são levadas ao estado de 80% de fração de líquido em sua composição em cerca de 50 min. Posteriormente, o aumento de fração de líquido se dá de maneira mais lenta, levando nesta ordem, o material a atingir os 100% de líquido em sua composição, em 72 min do processo.

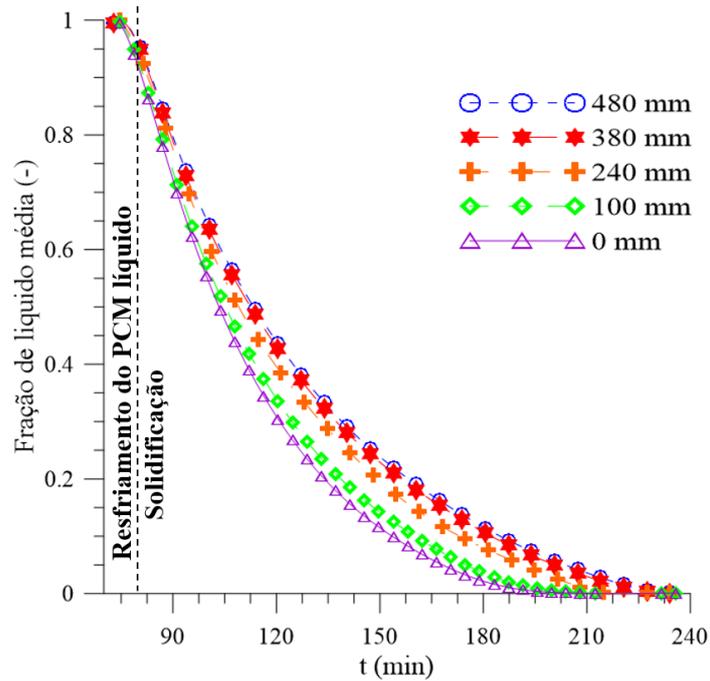
Figura 5.47 - Fração média de líquido para diferentes seções do PCM ao longo do processo de fusão.



Comparando estes resultados com as demais seções, observa-se que as maiores variações entre as curvas estão definidas entre o instante que todo o material entra na fase de transição, 10 min, e o estado de 90% de líquido, atingido em cerca de 60 min. Sendo o tempo necessário para o alcance de 60% de fração de líquido nas seções, os valores mais discrepantes, cerca de 22, 23, 27 e 40 min, para as seções a 0, 100, 240 e 380 mm da entrada, respectivamente. Após 90% de fração de líquido ter sido alcançado em cada seção, as variações entre estas, ao longo do comprimento, são desprezíveis.

Na Figura 5.48, tem-se as variações nos perfis transientes de fração de líquido média, medidas nas referidas seções, ao longo do processo de solidificação. Inicialmente, atingindo-se cerca de 80 min de descarregamento, PCM apresenta as primeiras frações de sólido, reduzindo as a partir de 100%, as frações de líquido no material, o que ocorre de maneira mais estável que para fusão, devido as já mencionadas diferenças de temperatura entre o CHTF e o PCM serem relativamente menores que no processo de fusão, levando o material a resfriar mais lentamente. No caso da solidificação, as maiores variações nas frações médias ao longo comprimento, encontram-se por volta de 20%, quando para seção de entrada, este valor é atingido em aproximadamente 130 min e para seção de saída (480 mm), este mesmo valor é atingido após 160 min. Diferentemente do processo de fusão, estas diferenças são levadas para o final do processo, quando na seção de entrada atinge-se 0% de fração de líquido, em um pouco mais de 210 min e em 240 min na seção de saída.

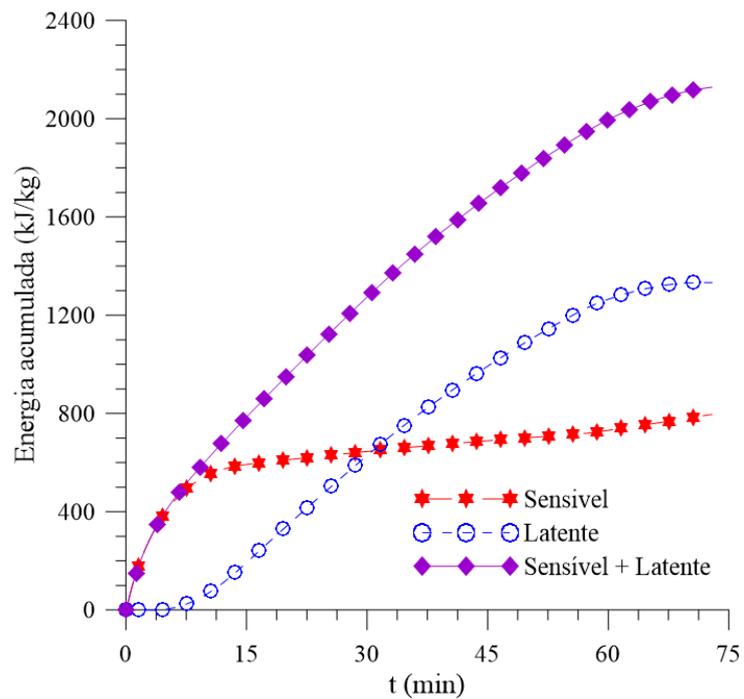
Figura 5.48 - Fração média de líquido para diferentes seções do PCM ao longo do processo de solidificação



5.5.1.4 Energia

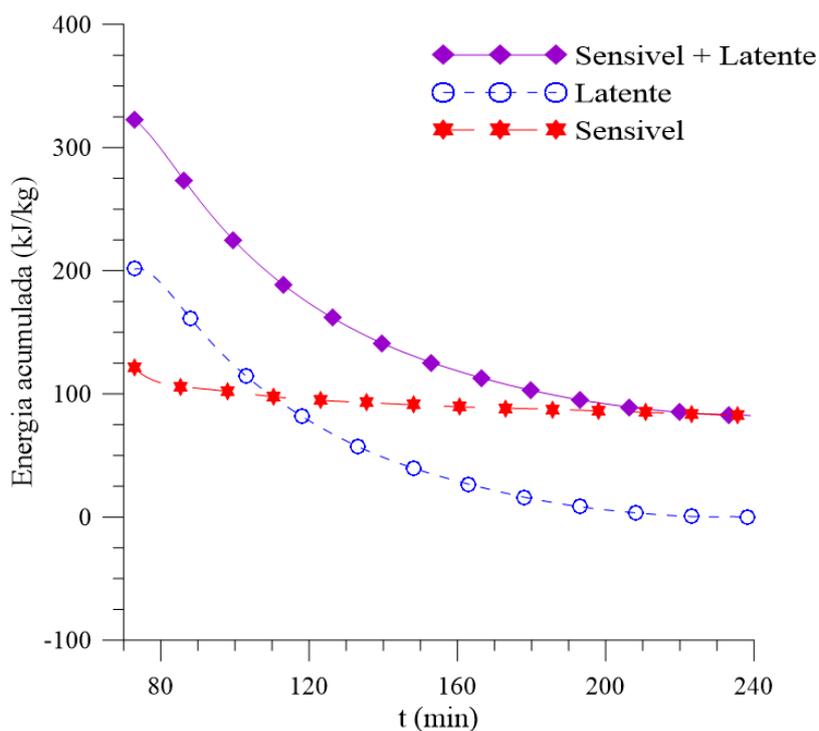
Na Figura 5.49 e 5.50 são descritos, respectivamente, os níveis de absorção e liberação de energia, médias volumares, associados aos processos de fusão e solidificação do PCM.

Figura 5.49 - Energia térmica latente e sensível absorvida pelo PCM ao longo do processo de fusão.



Na Figura 5.49, tem-se a absorção de energia sensível sendo predominante até, cerca de 25 min de operação do TTHX: o material leva em torno de 10 min para começar as transformações de fases e passar a absorver energia térmica latente, antes disso a única forma de absorção de energia é via calor sensível, o que dentro deste intervalo, atinge valores próximos a 50 kJ/kg de material. Por isso, que as curvas, referentes a soma da energia absorvida, via calor sensível mais latente e apenas sensível, são praticamente idênticas até este ponto. Na sequência, tem-se a absorção de energia latente sendo desenvolvida até ultrapassar a curva de calor sensível em aproximadamente 100 kJ/kg, valor onde a energia sensível permanece constante, até 60 min de fusão, quando tem um leve aumento, devido à grande parte do material, nesse instante, já estar no estado líquido e passar a aumentar a temperatura, para valores acima do ponto de fusão (82°C). A curva de energia latente é aumentada, a uma taxa constante, até aproximadamente 60 min quando a mesma atinge valores próximos a 200 kJ/kg, onde apenas poucas frações do PCM restam para serem fundidas, o que implica em um aumento, quase que nulo, nesta curva. Ao final de 72 min, atinge-se a fusão completa do material e um total de energia cumulada de 322 kJ/kg, sendo 122 kJ/kg via calor sensível e 200 kJ/kg via calor latente.

Figura 5.50 - Energia térmica latente e sensível liberada pelo PCM ao longo do processo de solidificação.



Na Figura 5.50, tem-se que a energia acumulada 322 kJ/kg no processo de fusão, sendo liberada do PCM para o CHTF. Como o PCM termina o processo de fusão com uma temperatura média de aproximadamente 84°C, rapidamente o mesmo retorna ao intervalo de transição de fases,

82-70°C, onde se caracteriza o início da redução de energia latente acumulada no PCM. Em paralelo a isto, a energia sensível acumulada é reduzida de 122 kJ/kg para aproximadamente 100 kJ/kg, dentro dos primeiros 10 min de resfriamento, instante a partir do qual, esta energia reduz-se, com taxas muito baixas até valores próximos a 80 kJ/kg no final dos 240 min do processo, o que ocorre devido a diferença entre a temperatura do CHTF (68°) em relação a temperatura sólidos (70°), atingida no final da solidificação, ser relativamente baixa. Tem-se, portanto, que a soma das energias ao final do processo de solidificação é igual a energia sensível. A energia latente é completamente liberada, devido, ao final do processo de solidificação, o material ter atingido o estado de 100% sólido.

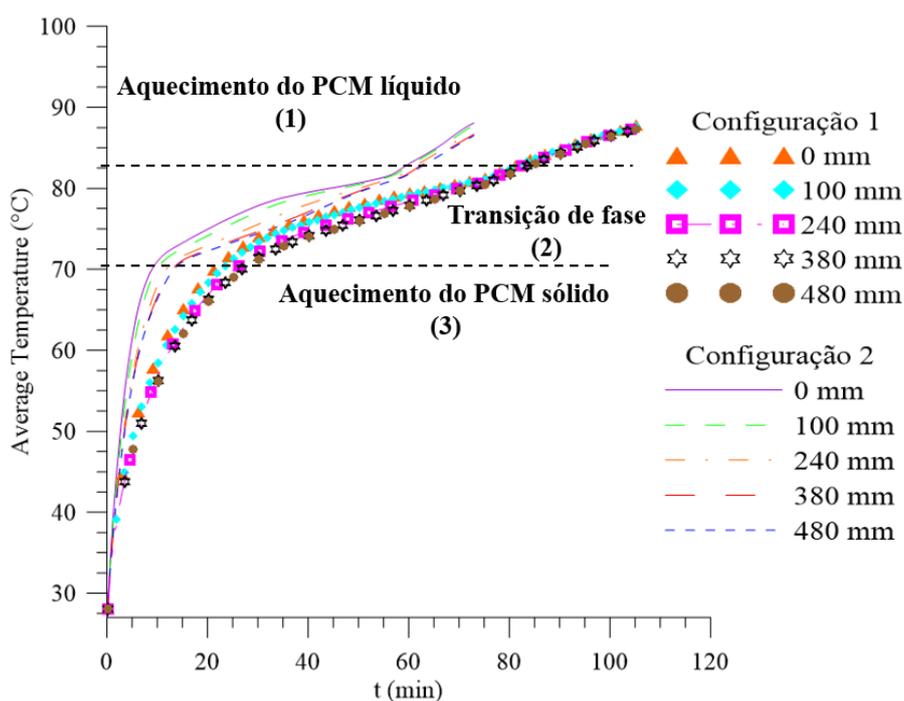
5.5.2 Comparação entre as configurações analisadas

Nesta seção foram comparados os resultados para fusão referentes as duas geometrias simuladas: A configuração 1 com oito aletas, utilizada para validação do modelo numérico utilizado nesta pesquisa e a configuração 2 com 24 aletas, que já foi abordada na seção anterior, de modo a avaliar a influência da área de troca térmica nos processos de absorção de energia desenvolvido no PCM.

5.5.2.1 Temperatura média

Observa-se na Figura 5.51 as curvas relativas à temperatura média, medidas nas seções de referência, ao longo do comprimento do PCM, para as configurações geométricas 1 e 2.

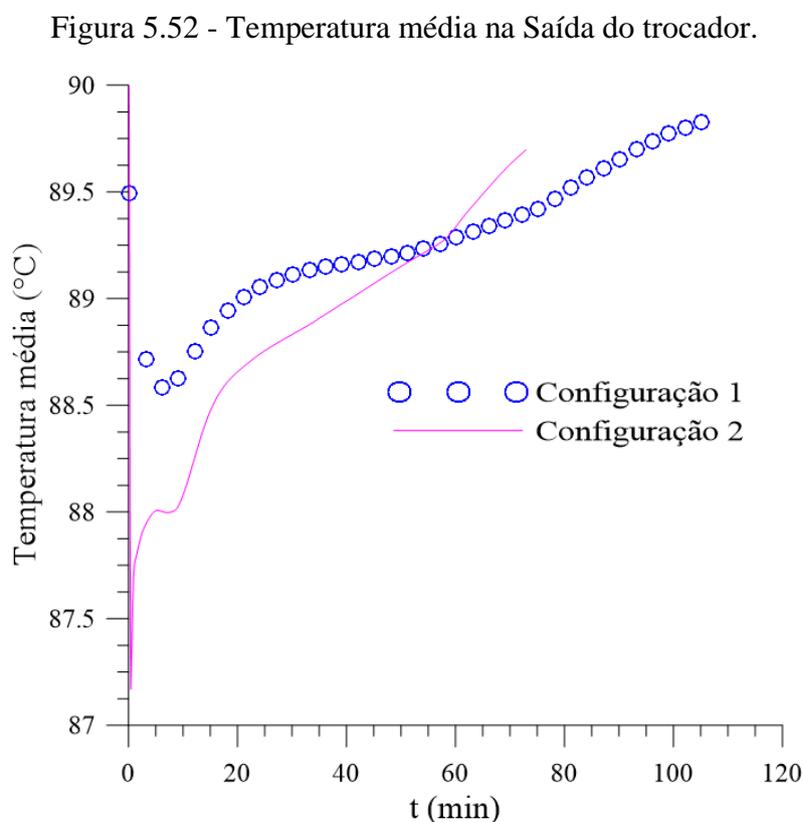
Figura 5.51 - Temperatura média para as configurações 1 e 2.



Pode-se constatar que o processo de fusão se dá mais lentamente na configuração 1: O PCM é aquecido até o limite entre a fase sólida e a região de transição, cerca de 15 min antes no trocador com 24 aletas; a região de aquecimento de PCM líquido é alcançada na configuração 2 em cerca de 60 min do processo de fusão enquanto que na geometria com 8 aletas esse ponto só é atingido próximo de 80 min.

Constata-se que na geometria com 24 aletas, as diferenças nas temperaturas médias na região de transição, medidas nos planos de referência, são mais acentuadas: as curvas de temperatura referentes as 5 seções estão mais próximas na configuração 1, indicando que existe uma tendência de heterogeneidade no processo de fusão ao longo do comprimento do PCM, à medida que a área de troca térmica é aumentada.

A Figura 5.52 descreve os valores transientes de temperatura média tomada na seção de saída do TTHX ($z = 880$ mm). Observa-se que na configuração com 8 aletas as temperaturas na referida região são sempre mais altas que as medidas para geometria com 24 aletas.



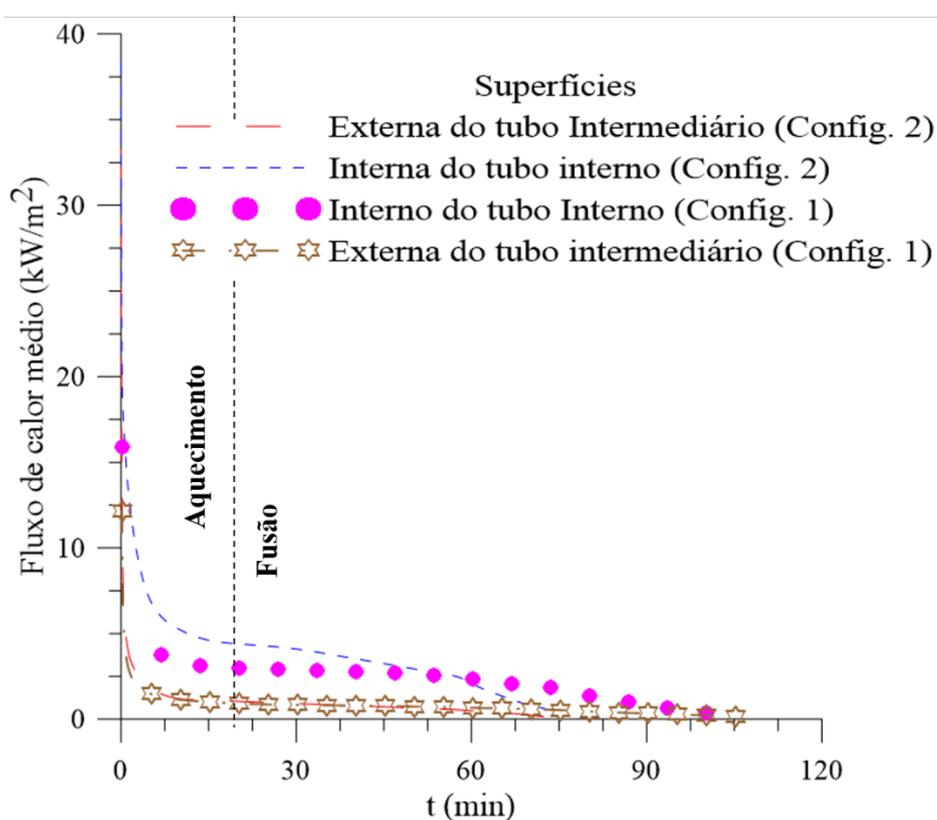
Isto se dá porque na configuração 2, o HHTF troca mais calor com o PCM ao longo do processo de fusão, Figura 5.55, fazendo com que a temperatura da água apresente menores valores na seção de saída. No decorrer do tempo, o PCM aumenta sua temperatura reduzindo a diferença

em relação ao HHTF, levando o mesmo a sair do trocador com valores próximos a temperatura de injeção (90°C).

5.5.2.2 Fluxos

A Figura 5.53, ilustra os fluxos de calor médios, medidos na superfície interna do tubo interno e externa do tubo intermediário, para as configurações com 8 e 24 aletas. Observa-se que os picos de fluxo de calor iniciais devido ao choque térmico entre as temperaturas do HHTF e do PCM, para as duas superfícies referidas, são inferiores na configuração com oito aletas: para superfície interna do tubo interno tem-se aproximadamente 38 kW/m² na configuração 2 e 16 kW/m² na configuração 1; para superfície externa do tubo intermediário tem-se aproximadamente 33 kW/m² na configuração 2 e 12,5 kW/m² na configuração 1.

Figura 5.53 - Fluxos médios para configurações geométricas 1 e 2.



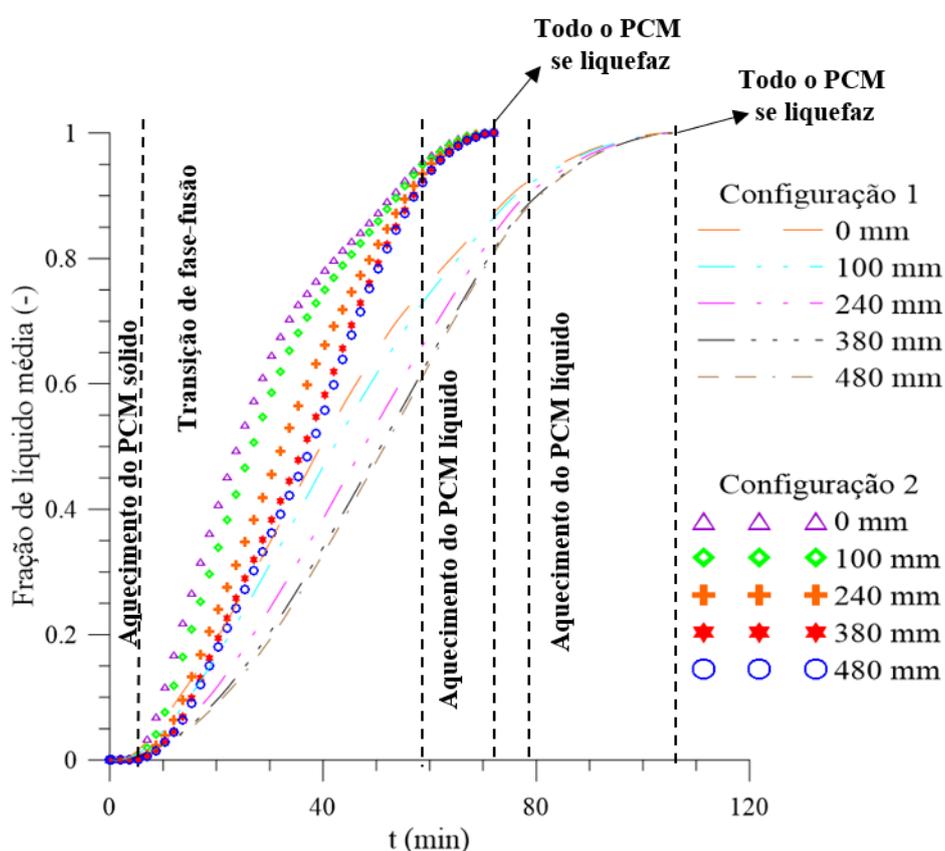
Esta variação é decorrente do calor transferido pelas superfícies estendidas dispostas na configuração 2, sendo esta efetiva no sentido de acelerar o processo de troca térmica. Os fluxos de calor nas superfícies da configuração 2, são superiores ao longo do processo de fusão até próximo de 60 min, quando na geometria com 8 aletas o processo de mudança ainda está ocorrendo, devido

menor velocidade que o mesmo apresenta nessa configuração, e na geometria com 24 aletas os fluxos são reduzidos pois as temperaturas do HHTF e do PCM já estão próximas da igualdade.

5.5.2.3 Fração de líquido

A Figura 5.54 ilustra as frações de líquido médias, medidas nas seções de análises, a 0, 100, 240, 380 e 480 mm da face de entrada do TTHX, para o processo de fusão nas configurações com 8 e 24 aletas. Observa-se que os tempos necessários para que o PCM entre na zona de transição de fases nas duas configurações estão próximos de 5 min de processamento.

Figura 5.54 - Fração de líquido média ao longo do tempo.



A partir da zona de transição, os comportamentos das curvas de fração de líquido nas duas geometrias se distinguem: A configuração 1 leva de 80 min para fundir completamente as primeiras seções no comprimento do PCM e finaliza todo processo de liquefação por volta de 107 min, além de as curvas de frações de líquido pra as diferentes seções desta configuração apresentarem comportamento mais próximo que na configuração 2. Nesta, observa-se um tempo necessário para atingir as primeiras frações 100 liquefeitas em torno de 60 min e um processo total de liquefação

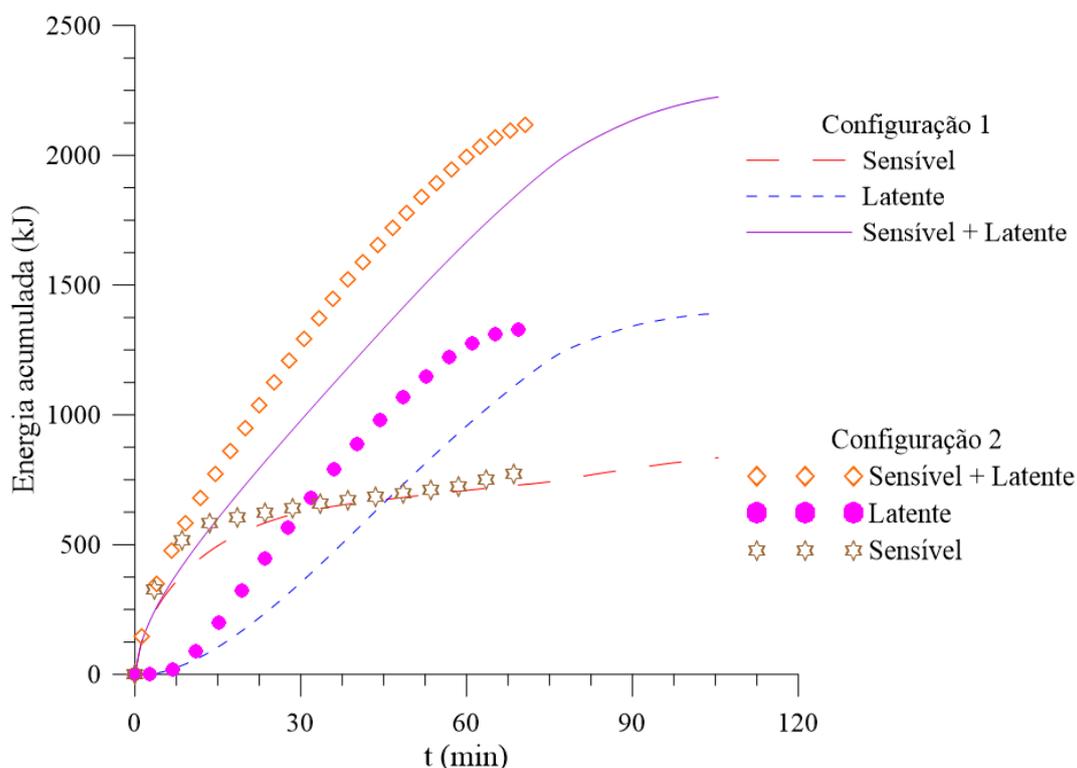
em 72 min, o que é cerca 32% mais rápido que o tempo necessário para fusão completa do PCM na configuração geométrica com 8 aletas.

5.5.2.4 Energia

Na Figura 5.55 foram comparados os níveis de absorção de energia pelo PCM referentes as duas configurações geométricas.

Como apresentado na seção 4.1.1, devido a inserção de aletas na estrutura geométrica do trocador, tem-se uma redução no volume ocupado por PCM, e conseqüentemente uma redução no armazenamento total de energia. Na tabela 4.1 consta os valores dos volumes ocupados por PCM nas duas configurações estudadas: na configuração 1 tem-se 0,00725707 m³ de PCM e na configuração 0,00695444 m³. Convertendo esses valores para massa, em função da densidade do PCM, tem-se respectivamente, 6,89 kg e 6,61 kg.

Figura 5.55 - Energia acumulada durante processo de fusão



Observa-se na Figura 5.55, que os níveis de energia absorvidos são 2220 kJ para configuração 1 e 2130 kJ para configuração 2, em termos de energia total. Isso corresponde a uma diferença de 4,3 %. A depender da aplicação o aumento na velocidade de processamento, cerca 35

minutos mais rápido, na configuração 2 em relação a configuração 1, pode ou não compensar a perda de energia total acumulada.

Para que se atinja o estado de completa fusão ao longo de todo o volume do PCM, permite-se que as seções alocadas nos comprimentos iniciais do anular fundam e ainda aqueçam para valores de temperaturas superiores a temperatura de fusão do PCM, haja visto que a água de aquecimento está a 90°C e a temperatura de fusão do PCM é 82°C. Desta forma como o processo de fusão é mais lento na configuração 1, estas seções já fundidas possuem mais tempo para elevar suas temperaturas, fazendo com que o calor sensível acumulado nessa configuração supere o da configuração 2, como mostra a Figura 5.55.

CAPÍTULO VI

Neste capítulo foram apresentadas as conclusões desta pesquisa, mediante os resultados obtidos e discutidos no CAPÍTULO V. Segue-se das considerações finais e de sugestões para pesquisas futuras.

6.0 Conclusões

Diante dos resultados apresentados foi possível concluir que:

Comparados com os referidos dados experimentais, os resultados numéricos apresentaram no processo de fusão, o erro máximo de 10,22°C (16,32 %) e o erro médio foi de 6,22°C (9,14%) e no processo de solidificação, o erro máximo de 5,02°C (7,17%) e o erro médio de 3,09°C (4,2%).

No processo de fusão, o material de mudança de fase aquece, ao longo do comprimento do trocador, mais lentamente, desde a entrada até a saída do mesmo.

O aumento nas temperaturas do PCM, foi traduzido em reduções na densidade o que fez surgirem forças de empuxo no interior do material que deslocaram as frações mais leves para as partes superiores, do anular que confinou o PCM. Já o resfriamento, elevou as densidades das frações de PCM.

Ao longo do derretimento, foi possível observar o surgimento de gradientes de pressão no volume material, que eram aumentados à medida que maiores frações de líquido eram distribuídas no mesmo. Estas variações eram reduzidas a valores desprezíveis ao final da solidificação do PCM.

Observou-se que a energia latente, acumulada ao longo do processo de fusão para configuração geométrica 2, 200 kJ/kg, é quase o dobro da energia acumulada via calor sensível, 120 kJ/kg.

Fluxos médios correspondentes a superfície interna do tubo interno foram cerca de 10 vezes os fluxos correspondentes a superfície externa do tubo intermediário.

Foram comparados os resultados relativos ao processo de fusão para as duas configurações propostas e foi constatado que a configuração 2 reduz o tempo total de fusão em cerca de 32% em relação a configuração 1, mas devido ao aumento no número de aletas e redução no volume ocupado

por PCM, a energia total acumulada no material de mudança de fase é reduzida em 4,3% na configuração 2.

6.1 Considerações finais

O modelo matemático proposto, foi capaz de prever o comportamento do PCM durante os processos de carga (fusão) e descarga (solidificação). Nos casos estudados, o material de mudança de fase foi inserido em um trocador de calor do tipo Tubo *Triplex* (*Tube Heat Exchanger-TTHX*). Através do sistema de tubulações de cobre, do TTHX, água quente (HTF) ou fria (CHTF) circulava de modo a permitir a mesma trocar calor, carregando e descarregando o PCM. Para modelar numericamente tal sistema, foi necessário a associação de modelos de turbulência ($k-\omega$ -SST), de energia e mudança de fase, os quais foram habilitados no âmbito do software ANSYS FLUENT®.

Malhas híbridas foram utilizadas, as quais associaram a capacidade adaptativa dos elementos tetraédricos, com a qualidade dos elementos hexaédricos. Foram utilizadas, condições de contorno de paredes acopladas nas interfaces sólido-fluido, referentes as tubulações e o PCM ou HTF, condições de isolamento para as paredes externas do trocador, fluxos mássicos na entrada e condição *outflow* na saída das tubulações. Estas características associadas, permitiram, ao longo do tempo, descrever, tridimensionalmente, o funcionamento do trocador de calor de mudança de fase.

Foram realizados estudos de malha e passo de tempo, com os quais foi possível encontrar limites mínimos de elementos de malha e máximos de passo de tempo, onde não se observasse variações significativas nos resultados, em função da variação destes parâmetros. Atingindo-se, portanto, os estados de independência de malha e de passo de tempo.

Dado as várias simplificações utilizadas e as próprias medições experimentais, sujeitas a erros de precisão, foi possível concluir, com boa aproximação, que os resultados numéricos foram validados experimentalmente.

Foram avaliadas de forma qualitativa, as temperaturas, frações de líquido, distribuições de pressão e velocidades ao longo dos processos de fusão e solidificação e de forma quantitativa foram analisadas as temperaturas e as frações médias, ao longo do comprimento do trocador de calor, os fluxos de calor provenientes das faces interna e externa, dos tubos interno e intermediário, respectivamente.

Escolheu-se a configuração geométrica 2 para se analisar os resultados qualitativos. Esta terá composta de 24 aletas longitudinais de cobre, com 1 mm de espessura, 42 mm de altura e 480 mm de comprimento, distribuídas simetricamente ao longo das superfícies interna do tubo intermediário

e externa do tubo interno. Durante o processo de fusão, o HHTF entrava no trocador com 90°C e o PCM iniciava o carregamento, estando o mesmo no estado sólido, a temperatura ambiente (27°). No processo de solidificação injetou-se fluido frio (CHTF) no trocador a 68°C, utilizando os resultados do final do processo de fusão, como condição inicial do processo de solidificação. Nas etapas de carga e descarga, o PCM foi levado aos estados completamente líquido e completamente sólido, respectivamente. Observou-se características importantes ao longo dos ciclos térmicos:

Ao aquecimento mais lento ao longo do comprimento do PCM se deu devido ao resfriamento do HTF caminhar no mesmo sentido do aquecimento do PCM. Fazendo com que a diferença entre as temperaturas do PCM e HHTF sejam reduzidas ao longo do comprimento, reduzindo os potenciais de transferência de calor nesta direção. No processo de solidificação, o CHTF aquece, ao longo do comprimento do trocador, os potenciais de descarga também são reduzidos neste sentido, o que fez com que as seções mais a jusante da entrada do TTHX fossem as últimas a solidificar.

Conforme as regiões mais próximas as superfícies internas externam do anular que continha o material, tinham sua energia térmica retirada, estas eram depositadas nas partes inferiores da metade inferior e superior do anular. A geometria das aletas reteve algumas frações mais leves de PCM na parte inferior do anular e outras mais pesadas na parte superior, ao longo dos processos de fusão e solidificações, respectivamente. Próximo aos estados finais dos referidos processos, as velocidades desenvolvidas com as forças de empuxo eram reduzidas a valores desprezíveis, devido a todas as frações, ao longo do volume do material, apresentarem densidades muito próximas.

A redução nas densidades, quando inseridas nas equações de Navier-Stokes, se refletem-se em um aumento de pressão: o material tende a se expandir mais como o mesmo está confinando por paredes solidas, a pressão no seu interior é aumentada. Devido as frações mais leves do material se concentrarem na porção superior do PCM, e a linha de referência, de pressão manométrica nula, foi estabelecida ao longo do eixo do TTHX, desenvolve-se pressões positivas, abaixo do eixo e pressões negativas acima deste.

Variações significativas, ao longo do comprimento do material, nos resultados para frações de líquido e temperaturas foram observadas. Para um mesmo intervalo de temperaturas, observou-se variações nos tempos referentes a esse intervalo, para as diferentes faces ao longo do comprimento: entre as faces de entrada e saída do TTHX, cerca de 20 min para fusão e 30 min para solidificação foram destacados nos resultados para temperatura média. Essas variações também foram destacadas para as frações de líquido, com as mesmas discrepâncias nos intervalos de tempo, as quais foram observados quando a fusão o material atinge cerca de 60% de líquido em sua

composição e na solidificação quando a fração de líquido atinge cerca de 20%. Estas variações apenas foram passíveis de serem analisadas devido ao modelo 3D utilizado.

Em aplicações onde o tempo de absorção de energia é limitado, devido a variações climáticas que restrinjam a disponibilidade da fonte de calor que mantém o fluido de troca térmica é aquecido, pode-se implementar configurações geométricas com elevado percentual volumétrico de aletas. A redução na energia total absorvida é relativamente baixa em relação ao aumento na velocidade de armazenamento de energia térmica.

6.2 Sugestões para pesquisas futuras

Diante dos resultados óbitos, as seguintes sugestões para atividades futuras podem ser apresentadas:

Avaliar a influência das diferentes geometrias de aletas. Como foi observado, a área de troca térmica é um parâmetro importante, para definição dos tempos de absorção e liberação de energia. Desta forma, pode-se avaliar diferentes configurações de aletas, inclusive a com nenhuma podem ser comparadas, levando em consideração a constância do volume de PCM a ser trabalhado. Vários trabalhos estudaram a influência da geometria das aletas, mas sem considerar que a sua variação, automaticamente influencia no volume de PCM dentro do anular.

Avaliar a influência das variações das velocidades e temperaturas do HTF para os diferentes aspectos dos processos de fusão e solidificação, descritos no capítulo 5. Com o modelo tridimensional proposto nesta pesquisa, pode-se avaliar diferentes configurações de processamento, injetando água no trocador com diferentes níveis de fluxo mássico e temperaturas.

Avaliar influência do método de troca térmica. Como foi observado, os fluxos de calor provenientes da parte interna do trocador são muito maiores que aqueles advindos do domínio externo do HTF. Desta forma, pode-se analisar casos em que o PCM é aquecido e resfriado, apenas pela superfície interna do anular e apenas pela superfície externa, mantendo o mesmo volume de PCM.

REFERÊNCIAS

ABDULATEEF, A. M.; MAT, S.; ABDULATEEF, J.; SOPIAN, K.; AL-ABIDI, A. A. Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 1. Feb. 2018.

ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. **Solar Energy**, v. 30, n. 4, p. 313–332, 1983.

AL-ABIDI, A. A.; MAT, S. BIN; SOPIAN, K.; SULAIMAN, M. Y.; LIM, C. H.; TH, A. Review of thermal energy storage for air conditioning systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 8, p. 5802–5819, 2012.

AL-ABIDI, A. A.; MAT, S. BIN; SOPIAN, K.; SULAIMAN, M. Y.; MOHAMMED, A. T. CFD applications for latent heat thermal energy storage: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 20, p. 353–363, 2013.

AL-ABIDI, A. A.; MAT, S.; SOPIAN, K.; SULAIMAN, M. Y.; MOHAMMAD, A. T. 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.; MAT, S.; SOPIAN, K.; SULAIMAN, M. Y.; MOHAMMAD, A. T. 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, 2013b.

AL-ABIDI, A. A.; MAT, S.; SOPIAN, K.; SULAIMAN, M. Y.; MOHAMMAD, A. T. Experimental study of melting and solidification of PCM in a triplex tube heat exchanger with fins. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 33–41, 2014.

ANDERSON, W. K.; BONHAUS, D. L. An implicit upwind algorithm for computing turbulent flows on unstructured grids. **Computers & Fluids**, v. 23, n. 1, p. 1–21, 1994.

ANSYS INC. ANSYS FLUENT Theory Guide. **Release 15.07**, 2015.

ANTUNES, P. F. Estudo numérico de unidades de armazenamento de energia térmica com materiais de mudança de fase para a termorregulação de painéis fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

ARSHAD, A.; ALI, H. M.; ALI, M.; MANZOOR, S. Thermal performance of phase change

material (PCM) based pin-finned heat sinks for electronics devices: Effect of pin thickness and PCM volume fraction. **Applied Thermal Engineering**, v. 112, p. 143–155, 2017.

BAHRANI, S. A.; ROYON, L.; ABOU, B.; OSIPIAN, R.; AZZOUZ, K.; BONTEMPS, A. A phenomenological approach of solidification of polymeric phase change materials. **Journal of Applied Physics**, v. 121, n. 3, 2017.

BARTH, T.; JESPERSEN, D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. In: 27TH AEROSPACE SCIENCES MEETING, 1989, **Anais...**, 1989. p. 366.

CABEZA, L. .; MEHLING, H. **Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications - Publisher:Springer; ISBN:978-3-540-68557-9.** 2008.

COSTA, S. Armazenamento de Energia Térmica Através de Materiais de Mudança de Fase, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Porto, 2014.

DOUGLAS, J. A uniqueness theorem for the solution of a Stefan problem. **Proceedings of the American Mathematical Society**, v. 8, n. 2, p. 402–408, 1957.

DUTIL, Y.; ROUSSE, D. R.; SALAH, N. BEN; LASSUE, S.; ZALEWSKI, L. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 1, p. 112–130, 2011.

ESAPOUR, M.; HOSSEINI, M. J.; RANJBAR, A. A.; PAHAMLI, Y.; BAHRAMPOURY, R. Phase change in multi-tube heat exchangers. **Renewable Energy**, v. 85, 2016.

EVANS, G. W. A note on the existence of a solution to a problem of Stefan. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 9, n. 2, p. 185–193, 1951.

GARCÍA-VALLADARES, O. Numerical simulation of triple concentric-tube heat exchangers. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 43, n. 10, p. 979–991, 2004.

GE, H.; LI, H.; MEI, S.; LIU, J. Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 331–346, 2013.

HASNAIN, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: Heat storage materials and techniques. **Energy Conversion and Management**, v. 39, n. 11, p. 1127–1138, 1998.

HIMRAN, S.; SUWONO, A.; MANSOORI, G. A. Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium. **Energy Sources**, v. 16, n. 1, p. 117–128,

1994.

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

JIAN-YOU, L. Numerical and experimental investigation for heat transfer in triplex concentric tube with phase change material for thermal energy storage. **Solar Energy**, v. 82, n. 11, p. 977–985, Nov. 2008.

JMAL, I.; BACCAR, M. Numerical study of PCM solidification in a finned tube thermal storage including natural convection. **Applied Thermal Engineering**, v. 84, p. 320–330, 2015.

JOULIN, A.; YOUNSI, Z.; ZALEWSKI, L.; ROUSSE, D. R.; LASSUE, S. A numerical study of the melting of phase change material heated from a vertical wall of a rectangular enclosure. **International Journal of Computational Fluid Dynamics**, v. 23, n. 7, p. 553–566, 2009.

KARTHIKEYAN, S.; RAVIKUMAR SOLOMON, G.; KUMARESAN, V.; VELRAJ, R. Parametric studies on packed bed storage unit filled with PCM encapsulated spherical containers for low temperature solar air heating applications. **Energy Conversion and Management**, v. 78, p. 74–80, 2014.

KONG, X.; LU, S.; LI, Y.; HUANG, J.; LIU, S. Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application. **Energy and Buildings**, v. 81, p. 404–415, 2014.

KOŚNY, J. Short history of PCM applications in building envelopes. . **PCM-Enhanced Building Components**. Springer, 2015. 21–59 p.

LAMÉ, G.; CLAPEYRON, B. P. Mémoire sur la solidification par refroidissement d'un globe liquide. In: ANNALES CHIMIE PHYSIQUE, 1831, **Anais...**, 1831. p. 250–256.

LANE, GEORGE ASHEL. **Solar heat storage: background and scientific principles**. CRC, 1983.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **Mathematical models of turbulence**. Academic press, 1972.

LEONARD, B. P.; MOKHTARI, S. ULTRA-SHARP nonoscillatory convection schemes for high-speed steady multidimensional flow, 1990.

- LI, W. Q.; QU, Z. G.; HE, Y. L.; TAO, W. Q. Experimental and numerical studies on melting phase change heat transfer in open-cell metallic foams filled with paraffin. **Applied Thermal Engineering**, v. 37, p. 1–9, 2012.
- LI, Z.; WU, Z. G. Analysis of HTFs, PCMs and fins effects on the thermal performance of shell-tube thermal energy storage units. **Solar Energy**, v. 122, 2015.
- LIN, Y.; JIA, Y.; ALVA, G.; FANG, G. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2018.
- LIU, L.; SU, D.; TANG, Y.; FANG, G. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2016.
- LIU, M.; SAMAN, W.; BRUNO, F. Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 2118–2132, 2012.
- LONGEON, M.; SOUPART, A.; FOURMIGUÉ, J. F.; BRUCH, A.; MARTY, P. Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection. **Applied Energy**, v. 112, p. 175–184, 2013.
- MASTANI JOYBARI, M.; HAGHIGHAT, F.; SEDDEGH, S. Numerical investigation of a triplex tube heat exchanger with phase change material: Simultaneous charging and discharging. **Energy and Buildings**, v. 139, p. 426–438, 2017.
- MAT, S.; AL-ABIDI, A. A.; SOPIAN, K.; SULAIMAN, M. Y.; MOHAMMAD, A. T. Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 223–236, 2013.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994.
- NITHYANANDAM, K.; PITCHUMANI, R. Computational studies on a latent thermal energy storage system with integral heat pipes for concentrating solar power. **Applied Energy**, v. 103, p. 400–415, 2013.
- OYA, T.; NOMURA, T.; OKINAKA, N.; AKIYAMA, T. Phase change composite based on porous nickel and erythritol. **Applied Thermal Engineering**, v. 40, p. 373–377, 2012.

PENG, S.; FUCHS, A.; WIRTZ, R. A. Polymeric phase change composites for thermal energy storage. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 93, n. 3, p. 1240–1251, 2004.

PIZZOLATO, A.; SHARMA, A.; MAUTE, K.; SCIACOVELLI, A.; VERDA, V. Design of effective fins for fast PCM melting and solidification in shell-and-tube latent heat thermal energy storage through topology optimization. **Applied Energy**, 2017.

SHABGARD, H.; BERGMAN, T. L.; SHARIFI, N.; FAGHRI, A. High temperature latent heat thermal energy storage using heat pipes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 15–16, p. 2979–2988, 2010.

SHARIF, M. K. A.; AL-ABIDI, A. A.; MAT, S.; SOPIAN, K.; RUSLAN, M. H.; SULAIMAN, M. Y.; ROSLI, M. A. M. Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 557–568, 2015.

SHARMA, A.; CHEN, C. Solar Water Heating System with Phase Change Materials. **International Review of Chemical**, v. 1, n. July, p. 297–307, 2009.

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, n. 2, p. 318–345, 2009.

SHARMA, R. K.; GANESAN, P.; TYAGI, V. V.; METSELAAR, H. S C; SANDARAN, S. C. Developments in organic solid-liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. **Energy Conversion and Management**, v. 95, p. 193–228, May. 2015.

SHARMA, S. .; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R. .; SHARMA, A. Design, development and performance evaluation of a latent heat storage unit for evening cooking in a solar cooker. **Energy Conversion and Management**, v. 41, n. 14, p. 1497–1508, 2000.

SOARES, N.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P.; COSTA, J. J. Experimental study of the heat transfer through a vertical stack of rectangular cavities filled with phase change materials. **Applied Energy**, v. 142, p. 192–205, 2015.

STEFAN, J. Uber einige probleme der theorie der warmeleitung. **Sitzer. Wien. Akad. Math. Naturw.**, v. 98, p. 473–484, 1889.

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.

TRISTÃO, P. Encapsulação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) para Aplicações no Armazenamento de Energia., Dissertação de Mestrado, Energias Renováveis e Eficiência Energética, Instituto Politécnico de Bragança, 2014.

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.

WAQAS, A.; KUMAR, S. Phase change material (Pcm)-based solar air heating system for residential space heating in winter. **International Journal of Green Energy**, v. 10, n. 4, p. 402–426, 2013.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. DCW industries La Canada, CA, 1998.

XU, Y.; HE, Y. L.; LI, Y. Q.; SONG, H. J. Exergy analysis and optimization of charging-discharging processes of latent heat thermal energy storage system with three phase change materials. **Solar Energy**, v. 123, p. 206–216, 2016.

YOUSSEF, W.; GE, Y. T.; TASSOU, S. A. CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes. **Energy Conversion and Management**, v. 157, p. 498–510, Feb. 2018.

ZALBA, B.; MARÍN, J. M.; CABEZA, L. F.; MEHLING, H. **Review on thermal energy storage with phase change: Materials, heat transfer analysis and applications**. 2003.

ZHANG, P.; XIAO, X.; MA, Z. W. A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement. **Applied Energy**, v. 165, p. 472–510, 2016.

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.