



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

JOÃO FELIPE VITAL GONÇALVES DE SOUZA

**AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO DE
NANOFLUIDOS EM GEOMETRIA ESFÉRICA**

RECIFE
2016

JOÃO FELIPE VITAL GONÇALVES DE SOUZA

**AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO DE
NANOFLUIDOS EM GEOMETRIA ESFÉRICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos e Sistemas Térmicos.

**Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte
Henríquez Guerrero**

**Coorientador: Prof. Dr. José Claudino de
Lira Júnior**

**RECIFE
2016**

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S729a Souza, João Felipe Vital Gonçalves de.

Avaliação paramétrica do processo de solidificação de nanofluidos em geometria esférica/João Felipe Vital Gonçalves de Souza.- 2016.

72 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero.

Coorientador: Prof. Dr. José Claudino de Lira Junior.

Dissertação(Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Inclui Referências e apêndice.

02 de setembro de 2016

“AVALIAÇÃO PARAMÉTRICA DO PROCESSO DE SOLIDIFICAÇÃO DE
NANOFLUIDOS EM GEOMETRIA ESFÉRICA”

JOÃO FELIPE VITAL GONÇALVES DE SOUZA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR
COORDENADOR

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRÍQUEZ GUERRERO (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ CLAUDINO DE LIRA JÚNIOR (UFPE)

Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO (UFPE)

Prof. Dr. FERNANDO ROBERTO DE ANDRADE LIMA (UFPE)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me concedido a chance de viver até hoje e poder desfrutar de mais uma etapa da minha vida pessoal e profissional.

À minha família por todo incentivo fornecido durante toda minha vida, principalmente durante os últimos anos, especialmente aos meus pais João e Conceição que têm me ensinado não só com palavras, mas também com ações, e a minha irmã Ana Teresa, que mesmo distante, sempre demonstra seu apoio de alguma forma.

Aos professores Jorge Recarte Henríquez Guerrero e José Claudino de Lira Júnior, pela paciência e atenção que me foram prestadas ao longo dos últimos meses, e principalmente, nas últimas semanas. Além da sabedoria de vida e do conhecimento técnico que possuem e me foram fornecidos durante as incontáveis reuniões.

A todos os professores, companheiros de sala de aula, amigos profissionais e pessoais que contribuíram de alguma forma para que eu conseguisse cumprir esta etapa.

À CAPES pelo suporte financeiro durante o período de realização deste trabalho.

RESUMO

O fenômeno de fusão e solidificação está presente na natureza e em diversos processos industriais. Entre outros podem ser citados o crescimento de cristais; o congelamento do solo e lagos em ambientes de baixa temperatura; a fundição e solidificação de metais e ligas; o congelamento e descongelamento de alimentos; o controle térmico em edificações através do uso de paredes, janelas e tetos preenchidos com material de mudança de fase e o armazenamento de energia térmica por calor latente. É nesta última aplicação que o presente estudo tem a sua maior utilidade. A busca por novos materiais que possam ter propriedades vantajosas para o processo de termoacumulação tem voltado à atenção para os nanofluidos que são substâncias formadas por nanopartículas dispersadas num fluido. O presente trabalho pretende contribuir com informações técnicas para o estado da arte no processo de solidificação e nanofluidos por meio da integração destes dois temas num estudo que analisará o processo de transferência de calor com mudança de fase no interior de uma cápsula esférica que contém um nanofluido. O estudo foi realizado por meio de um modelo numérico construído com base no método de diferenças finitas com malha móvel e utilizando a plataforma Matlab para programação do algoritmo de simulação. Foram analisados nanofluidos a base de água e parafina C14 com nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cobre (CuO), nanotubos de carbono e grafeno, e para cada uma destas combinações foram geradas curvas de resfriamento e posição da interface sólido-líquido em função do tempo, assim como os tempos de solidificação completa para cada condição operacional em função da temperatura e vazão do fluido de resfriamento, diâmetro da capsula esférica e também em função do tipo de nanofluido. Os resultados indicam que a redução do tempo de solidificação é maior, dentre as simulações realizadas, quando a combinação é entre água e nanotubos de carbono e parafina C14 e grafeno.

Palavras-chave: Nanofluidos. Solidificação. Simulação numérica. Diferenças finitas. Termoacumulação.

ABSTRACT

The melting and solidification phenomenon is present in the Nature and some industrial processes. Growing crystals; freezing of lakes at low temperatures; melting and freezing of alloys and metals; freezing and thaw of food; thermal control in buildings through filling of windows, walls and roof with phase change materials; latent heat thermal energy storage. This paper focuses on this last mentioned application. The research on materials with improved properties for thermal energy storage aims nanofluids, that is, substances composed of nanoparticles dispersed in a base fluid. *A priori*, the same fluids used like phase change materials can play the role of nanofluids, dispersing nanoparticles with size and proportions proper. The present paper aims contribute with technical informations about art state of solidification process and nanofluids through the integration of these subjects in a study that will analyze the heat transfer process with phase change in a spherical capsule containing nanofluids. The study used a numerical model based on the finite differences method with mobile mesh in the MatLab. Water and paraffine C14 were the base fluids, and alumine oxide, cupper oxide, carbon nanotubes and graphene were the nanoparticles, and all combinantions were analyzed through curves of solid-liquid interface position versus time and the curves of complete solidification time considering temperature and flow rate of cooling fluid and diameter of spherical capsule being constant. The results indicate that the solidification time are reduced when the combinations are water and carbon nanotubes and paraffin C14 and graphene.

Keywords: Nanofluids. Solidification. Numerical simulation. Finite differences. Thermal energy storage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1- Nanofluido estável (esquerda) e nanofluido instável (direita).....	19
FIGURA 2.2- Diagramas típicos de sistemas de termoacumulação de calor latente: (a) chapa plana; (b) casco e tubo com fluxo interno; (c) casco e tubo com fluxo paralelo; (d) casco e tubo com fluxo cruzado; (e) leito de esferas empilhadas.....	25
FIGURA 3.1 –Cápsula esférica, fases do MMF e circuito térmico equivalente.....	29
FIGURA 3.2 - Posição da frente de solidificação variando conforme a intensidade do calor trocado no tempo.....	32
FIGURA 3.3 - Desenho com a divisão dos domínios sólido e líquido numa cápsula esférica durante a mudança de fase.....	35
FIGURA 3.4 - Desenho para análise concentrada da esfera com raio $\Delta r/2$.....	36
FIGURA 3.5 - Representação das resistências térmicas.....	38
FIGURA 3.6 -Fluxograma do algoritmo do programa do Matlab.....	45
FIGURA 3.7 - Comparação entre a distribuição de temperaturas em cada malha.....	46
FIGURA 3.8 - Comparação entre o modelo atual e os resultados de London e Seban....	48
FIGURA 3.9 - Comparação entre o modelo atual e os resultados de Milón e Braga (2000).....	49
FIGURA 4.1 - Efeito da temperatura do banho isotérmico.....	55
FIGURA 4.2- Comparação entre a água e o nanofluido com alumina em diferentes concentrações.....	55
FIGURA 4.3- Comparação entre a água e o nanofluido com cobre em diferentes concentrações.....	57
FIGURA 4.4- Comparação entre a água e o nanofluido com grafeno em diferentes concentrações.....	57
FIGURA 4.5- Comparação entre a água e o nanofluido com nanotubos de carbono em diferentes concentrações.....	57
FIGURA 4.6- Comparação entre as nanopartículas com a concentração de 10%.....	58
FIGURA 4.7- Comparação dos tempos de solidificação total.....	58

FIGURA 4.8- Comparação entre a parafina e o nanofluido com alumina em diferentes concentrações.....	59
FIGURA 4.9- Comparação entre a parafina e o nanofluido com cobre em diferentes concentrações.....	60
FIGURA 4.10- Comparação entre a parafina e o nanofluido com grafeno em diferentes concentrações.....	60
FIGURA 4.11- Comparação entre a parafina e o nanofluido com nanotubos de carbono em diferentes concentrações.....	60
FIGURA 4.12- Comparação dos tempos de solidificação total.....	61
FIGURA 4.13- Comparação entre as nanopartículas com a concentração de 10%.....	61
FIGURA 4.14- Perfis de temperatura da água variando com o tempo.....	62
FIGURA 4.15- Perfis de temperatura da água com alumina a 10% variando com o tempo.....	62
FIGURA 4.16- Perfis de temperatura da água com cobre a 10% variando com o tempo.....	63
FIGURA 4.17- Perfis de temperatura da água com grafeno a 10% variando com o tempo.....	63
FIGURA 4.18- Perfis de temperatura da água com nanotubos de carbono a 10% variando com o tempo.....	63
FIGURA 4.19- Comparação entre os perfis de temperatura das nanopartículas com água.....	64
FIGURA 4.20- Perfis de temperatura da parafina com alumina a 10% variando com o tempo.....	64
FIGURA 4.21- Perfis de temperatura da parafina com cobre a 10% variando com o tempo.....	65
FIGURA 4.22- Perfis de temperatura da parafina com grafeno a 10% variando com o tempo.....	65
FIGURA 4.23- Perfis de temperatura da parafina com nanotubos de carbono a 10% variando com o tempo.....	65
FIGURA 4.24- Comparação entre os perfis de temperatura das nanopartículas com parafina.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - Teste da malha física considerando o número de subdivisões de 10, 20, 50, 80 e 90.....	47
TABELA 4.1 - Testes dos parâmetros.....	50
TABELA 4.2 - Propriedades termofísicas.....	51
TABELA 4.3 - Propriedades termofísicas e fonte.....	52
TABELA 4.4 - Propriedades dos nanofluidos com água.....	53
TABELA 4.5 - Propriedades dos nanofluidos com parafina.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Variável	Denominação	Unidade (SI)	Página
A	Área	m ²	31
Bi	Número de Biot	-	40
c _p	Calor específico à pressão constante	J/kgK	40
h	Coefficiente de Convecção	W/m ² K	33
k	Condutividade Térmica	W/m.K	30
L	Calor Latente	J/kg	31
m	Massa	Kg	31
\dot{m}	Fluxo Mássico	kg/s	31
N	Número de nós da malha	-	36
Nu	Número de Nusselt	-	33
Pr	Número de Prandtl	-	33
\dot{Q}	Taxa de calor	W	30
R; r	Resistência Térmica; Raio	M	30
Re	Número de Reynolds	-	33
Ste	Número de Stefan	-	40
t	Tempo	S	30
T	Temperatura	°C	30
T _∞	Temperatura do fluido externo	°C	40
x	Posição da frente de solidificação adimensional	-	40
α	Difusividade térmica	m ² /s	36
ρ	Densidade	kg/m ³	30
φ	Concentração	%	32
τ	Tempo adimensional	-	40
θ	Temperatura adimensional	-	40
V	Volume	m ³	31
Subscritos			
bf	Fluido base		32
c	Cápsula esférica		30
ext	Externo		29
f	Frente de solidificação		31
ft	Fluido de trabalho		29
int	Interno		30
l	Fase líquida		30
nf	Nanofluido		32
np	Nanopartículas		32
s	Fase sólida		30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3	MODELO NUMÉRICO	29
3.1	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	29
3.2	MODELAGEM NUMÉRICO-COMPUTACIONAL.....	34
3.2.1	Material de Mudança de Fase Totalmente Sólido ou Líquido.....	35
3.2.2	Material de Mudança de Fase Parcialmente Sólido e Parcialmente Líquido dentro da Cápsula.....	38
3.2.3	Adimensionalização das Equações.....	40
3.2.4	Método da Malha Móvel.....	41
3.3	TESTE DE MALHA.....	46
3.4	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	47
4	ESTUDOS PARAMÉTRICOS	50
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	67
5.1	CONCLUSÕES.....	67
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS	68
	APÊNDICE	72
	ARTIGO PUBLICADO NO CYTEF 2016	72

1 INTRODUÇÃO

A termoacumulação, ou tecnologia de armazenamento de energia térmica, tem se mostrado muito útil em termos de aproveitamento de energia, considerando que ela possibilita armazenar uma energia disponível instantânea que não tem um uso, para que se use num momento posterior. A termoacumulação pode ser realizada, por exemplo, por meio do reaproveitamento de gases residuais para fornecer calor para um processo de refrigeração por absorção ou com um processo de refrigeração tradicional utilizando um horário fora do pico de consumo, quando a energia elétrica tem um custo menor.

No que diz respeito à termoacumulação, existem duas possibilidades de se realizar um armazenamento térmico. A primeira prática é a aplicação de calor sensível, na qual não há mudança de fase de fluido usado na transferência de calor. A outra maneira de armazenar energia térmica é através do calor latente. Nesta técnica, a energia térmica é armazenada solidificando ou fundindo um material. Através das características do processo físico (fusão ou solidificação), a energia térmica é armazenada em uma temperatura constante igual à do material de mudança de fase. Para este fim, podem ser empregados materiais de mudança de fase encapsulados em formatos cilíndricos, esféricos, ou em outros formatos, ou sistemas que retiram calor de um fluido armazenado em um tanque até que ocorra o congelamento deste fluido. Este segundo tipo de sistema é mais usado através de tubos que conduzem um fluxo de uma substância a baixa temperatura, mergulhada em tanques de água. Estes tubos possuem várias geometrias (cilíndricos, serpentinas, placas, tubos aletados, etc.), onde o gelo é formado em torno do tubo, para se aproveitar o calor trocado. Posteriormente faz-se com que circule por dentro dos tubos um fluido em maior temperatura para se utilizar a energia armazenada.

A principal vantagem da acumulação de calor latente é a densidade de armazenamento elevada em intervalos de temperatura pequenos. A estocagem de calor latente pode ser usada para aquecimento e para resfriamento de edifícios e pode ser incorporada como sistemas passivos ou também como sistemas ativos.

Nanofluidos são substâncias obtidas a partir da dispersão de diferentes nanopartículas em um fluido-base com o objetivo de melhorar suas propriedades térmicas. Estes nanofluidos são a próxima geração de fluidos de transferência de calor que são usados como fluidos trocadores de calor. Os nanofluidos apresentam melhores propriedades térmicas do que os fluidos convencionais de transferência de calor. Passadas duas décadas, os nanofluidos

apresentaram uma notável melhora na condutividade térmica, estabilidade e coeficientes de transferência de calor, bem como uma redução no consumo médio geral da planta e nos custos. Os nanofluidos tem sido amplamente utilizados em diferentes trocadores de calor a fim de otimizar o consumo de energia. Consequentemente, a descoberta de nanofluidos adequados com propriedades de transferência de calor otimizadas e condutividade térmica superior tem se tornado um desafio para a engenharia.

Na última década vários estudos têm relatados os resultados da condutividade térmica de nanofluidos óxidos (óxidos de alumínio, óxido de silício, óxido de titânio e óxido de cobre). Estes estudos investigaram a evolução da condutividade térmica através de um conteúdo robusto. A melhoria da condutividade térmica dos nanofluidos depende da adição de nanopartículas e da relação de aspecto destas nanopartículas. Entretanto, a adição de nanopartículas aumenta a viscosidade dos nanofluidos, o que limita as vantagens térmicas de nanofluidos devido à necessidade de maior poder de bombeamento nos sistemas.

Juntamente com o comportamento térmico dos nanofluidos, a outra questão mais importante é a estabilidade dos nanofluidos, que consiste em manter as nanopartículas em suspensão no fluido; alcançar essa estabilidade desejada continua sendo um desafio nos dias de hoje.

O objetivo geral deste trabalho de dissertação é analisar o processo de transferência de calor com mudança de fase (solidificação) em nanofluidos encapsulados em cavidades esféricas.

Os objetivos específicos são:

- 1) Modelar o processo de transferência de calor em geometria esférica aplicado a cavidades contendo nanofluidos;
- 2) Modelar o processo de solidificação de nanofluidos em cavidades esféricas para determinar a posição da frente de mudança de fase com o tempo;
- 3) Construir um modelo numérico em MatLab para realização de estudos paramétricos.

A dissertação está formatada em cinco capítulos, sendo que no presente capítulo (Capítulo 1) foram apresentadas uma introdução do tema, as justificativas do trabalho, a definição dos objetivos e, finalmente, uma discussão resumida do que será encontrado em cada capítulo.

No capítulo 2, será apresentada uma revisão bibliográfica contemplando as principais e mais recentes publicações sobre o tema abordado, incluindo os modelos tomados por base para realização deste trabalho.

No capítulo 3, será apresentado o modelo matemático já adaptado com todas as considerações para aplicar nas simulações do processo de termoacumulação e o modelo numérico resultante das metodologias aplicadas, e também será apresentado o teste de malhas com os valores dos erros inerentes a cada uma delas, e a calibração do modelo através da posição da frente de solidificação e do resfriamento do material de mudança de fase.

No capítulo 4 serão apresentadas todas as simulações desenvolvidas, juntamente com os testes dos parâmetros, impondo diferentes condições de resfriamento tanto no material de mudança de fase, como no fluido externo.

No capítulo 5, serão apresentadas as conclusões obtidas e as sugestões de possíveis trabalhos futuro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As recentes preocupações globais com o meio ambiente e o aumento da eficiência energética, o que diz respeito à recuperação de calor, conduzem à uma busca por novos meios de reaproveitamento de energia, ou uma otimização do consumo de energia. Uma das alternativas é o uso de sistemas de termoacumulação, que podem ser através do calor sensível ou do calor latente.

Conforme MacDevette e Myers (2016), o desempenho dos sistemas de termoacumulação de calor latente baseia-se fortemente na utilização de materiais de mudança de fase que são responsáveis pelo armazenamento e liberação de energia. Além da aplicação em sistemas de termoacumulação de calor latente, os materiais de mudança de fase também são aplicados em sistemas de purificação, remoção de calor de componentes eletrônicos, entre outros.

Quanto a remoção de calor, ou produção de energia fria, Kumaresan et al. (2013) dizem que a termoacumulação de frio é uma técnica que é melhor descrita como ‘estocagem de energia fria para uso posterior a fim de cobrir o intervalo de tempo entre a disponibilidade da energia e o uso da energia’, além de possibilitar a produção de energia fria nas horas em que a tarifa da energia é reduzida. A termoacumulação de frio desempenha um papel vital no condicionamento central de ar em grandes construções, refrigerações em supermercados, aplicações de refrigeração eletrônica de alta potência e em aplicações de resfriamento de vários processos industriais. A operação eficiente de um sistema de termoacumulação de frio reduz o consumo de energia adicional durante suas operações cíclicas de carregamento e descarregamento.

Esses sistemas de termoacumulação de frio com materiais de mudança de fase (MMF) são preferíveis em várias aplicações comparados aos sistemas de acumulação de calor sensível, devido à sua capacidade de armazenagem superior dentro de uma pequena faixa de temperatura de transição de fase, dizem Kumaresan et al. (2013). Entretanto, os materiais de mudança de fase possuem uma condutividade térmica muito baixa especialmente no estado líquido e por isso é muito difícil recuperar a energia estocada.

Os pesquisadores têm tentado aumentar a condutividade térmica dos materiais de mudança de fase a fim de melhorar o desempenho térmico dos sistemas de termoacumulação de frio através de vários métodos, tais como (a) colocando aletas de vários tipos no sistema,

(b) inserindo uma matriz metálica, (c) dispersando partículas de alta condutividade nos materiais de mudança de fase e (d) encapsulando o núcleo com várias camadas de material isolante. Todas as práticas citadas anteriormente têm um impacto considerável no aprimoramento da condutividade térmica dos materiais de mudança de fase; embora, estes métodos aumentem o peso e o volume do sistema (Kumaresan et al., 2013).

Nos últimos anos, devido ao rápido avanço no campo da nanotecnologia, um novo conceito sobre aplicações de nanopartículas foi usado por pesquisadores com o intuito de aperfeiçoar as propriedades mecânicas, elétricas e térmicas. Esta tentativa resultou em grandes vantagens econômicas e de eficiência energética em várias aplicações. Estudos experimentais sobre a condutividade térmica e a capacidade de armazenagem de BaCl_2 com nanopartículas de TiO_2 dispersas, foram realizados por Liu et al. (2009). A condutividade térmica aumentou 15,65% e a variação foi linear com a fração de volume das nanopartículas e temperatura. O comportamento de armazenamento térmico dos nanofluidos Al_2O_3 -Água foi estudado experimentalmente por Wu et al. (2009). Nele foi mostrado que o tempo de solidificação e o sub-resfriamento dos nanofluidos foram reduzidos em 20,5% e 70,9%, respectivamente, com a adição de uma fração de peso de 0,2% de Al_2O_3 . Kumaresan et al. (2012) relatou uma redução no tempo de solidificação de 34% da parafina como fluido base de um nanofluido com material de mudança de fase (NMMF) contendo uma fração de volume de 0,6% de nanotubos de carbono com multi-camadas (NTCMC) devido ao aperfeiçoamento da condutividade térmica quando comparado com a parafina pura.

O foco principal da pesquisa com nanofluidos desde então tem sido desenvolver melhores fluidos de transferência de calor (Solangi et al., 2015). Os nanofluidos estabeleceram-se na história da nanociência e tem, portanto, atraído a atenção dos pesquisadores em todo o mundo.

Para Solangi et al. (2015), a nanotecnologia moderna permitiu a produção de nanopartículas metálicas e não-metálicas com tamanho médio inferior a 100 nm. As propriedades mecânicas, óticas, elétricas, magnéticas e térmicas das nanopartículas são melhores do que aquelas que são de materiais convencionais com estruturas de grão grosseiras. Essas características possibilitam melhor dispersão no fluido-base, considerando a estabilidade do nanofluido.

Considerando essas vantagens de propriedades geométricas e térmicas das nanopartículas, a nanotecnologia está relacionada com a produção e aplicação de materiais em

escala nanométrica e a integração das nanoestruturas resultantes acopladas em sistemas maiores. Dois principais fatores que afetam as propriedades dos materiais em escala nanométrica são o aumento relativo da área superficial e os efeitos quânticos, os quais mudam ou aprimoram substancialmente as propriedades óticas e elétricas e o comportamento magnéticos dos materiais, sua reatividade e força. À medida que o tamanho da partícula diminui, uma proporção maior de átomos é encontrada na superfície quando comparado com a parte interna do nanofluido (Angayarkanni e Philip, 2015). A procura por materiais eficiente para refrigeração levou ao surgimento de um novo campo de pesquisa chamado nanofluido.

Conforme Angayarkanni e Philip (2015), nanofluidos apresentam algumas características únicas que são completamente diferentes das dispersões com partículas em escala milimétrica ou picométrica. Comparado aos líquidos de resfriamento convencionais tais com querosene, água, etileno glicol e microfluidos, nanofluidos tem exibido uma condutividade térmica mais elevada. Além disso, os nanofluidos não bloqueiam os canais de fluxo e induzem apenas uma mínima queda de pressão durante o escoamento, o que é benéfico para aplicações em transferência de calor.

Stephen Choi et al. (apud Solangi et al., 2015) no Laboratório Nacional de Argonne (ANL) identificaram a oportunidade de aplicar a nanotecnologia na engenharia térmica e propuseram o conceito de nanofluidos em 1994 e investigaram questões relacionadas com os fundamentos e aplicações de nanofluidos. Pesquisadores japoneses e alemães também publicaram artigos que descrevem fluidos que se assemelham ao conceito de nanofluidos desenvolvido no Laboratório Nacional de Argonne.

Keblinski et al. (2002) estudaram o fluxo de calor com nanopartículas suspensas. A pesquisa mostrou que os nanofluidos apresentaram condutividade térmica superior mesmo com baixas concentrações de nanopartículas suspensas. Por exemplo, os experimentos mostraram um acréscimo na condutividade térmica ao dispersar menos que 1% da fração volumétrica de nanopartículas de cobre (Cu) ou nanotubos de carbono (CNT) em etileno glicol ou óleo com 40% e 150%, respectivamente. Os pesquisadores também mostraram que a tecnologia dos nanofluidos fornece oportunidades para o desenvolvimento de fluido refrigerante baseado em nanotecnologia para várias inovações em engenharia e aplicações médicas.

Nanofluidos tem características incomuns que são essenciais para várias aplicações na engenharia. Estas qualidades especiais incluem:

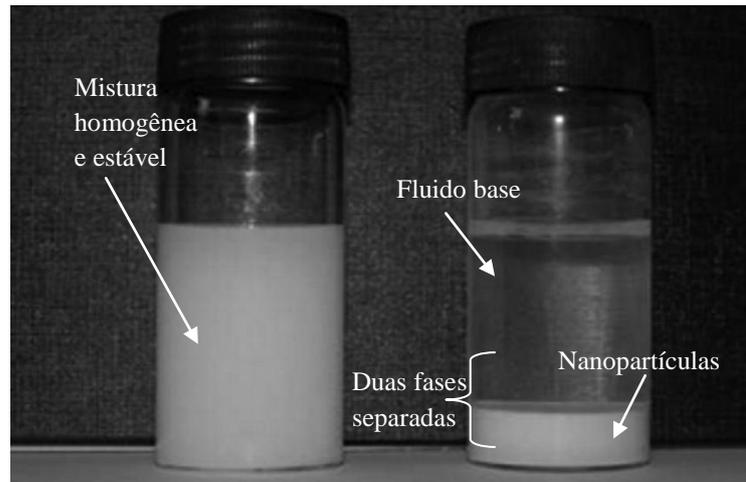
- Habilidade de transferir calor ultrarrápido;
- Condutividade térmica aumentada;
- Estabilidade melhorada com relação a outros colóides;
- Lubrificação superior;
- Coeficiente de atrito reduzido;
- Diminuição da erosão e de entupimento em micro canais.

Surfactantes melhoram a estabilidade das nanopartículas em fluidos. Embora, a funcionalidade dos surfactantes sob temperaturas elevadas é a preocupação principal, especialmente para aplicações de temperaturas extremas. O método da sedimentação, também chamado de cama de decantação, é a técnica mais decisiva e amplamente usada para avaliar a estabilidade de um nanofluido.

Para Solangi et al. (2015), o principal desafio na preparação de um nanofluido é a sua pobre estabilidade causada pela formação de aglomerados, que são gerados pelas grandes áreas de superfície e pelas forças de Van Der Waals entre as nanopartículas. A estabilidade dos nanofluidos requer uniformidade na dispersão das nanopartículas no fluido base, pois as propriedades termofísicas variam ao longo do tempo durante as aplicações práticas. A aglomeração de nanopartículas não apenas decanta e entope os microcanais, como também diminui a condutividade térmica dos nanofluidos. Baixos custos, estabilidade a longo prazo e boa fluidez são as três condições prévias mais importantes para os nanofluidos possuírem aplicações práticas no campo de transporte de calor. A Figura 2.1 mostra exemplos de nanofluidos onde um deles está visualmente estável, enquanto o outro mostra que as partículas estão visualmente separadas do líquido.

Sabe-se que os nanofluidos aprimoram algumas propriedades termofísicas, mas, mesmo existindo muita pesquisa sobre transferência de calor com mudança de fase de nano-suspensão e seus sistemas de desempenho, há uma ausência de análise detalhada de estocagem de energia térmica tais como o tempo de super resfriamento e congelamento. É importante saber acuradamente que os detalhes do controle do comportamento de super resfriamento de nanofluidos e suas aplicações de estocagem de energia térmica com grande precisão.(Wang et al., 2014)

Figura 2.1 - Nanofluido estável (esquerda) e nanofluido instável (direita).



Fonte: Solangi et al.(2015). (Adaptado).

O comportamento de super resfriamento é indesejável em sistemas de armazenagem de calor. Isto se deve ao fato do alto grau de super resfriamento, ou a taxa de nucleação ou a taxa de crescimento destes núcleos ser muito lenta. Portanto, como a fusão é resfriada, ela não se solidifica até o ponto de derretimento termodinâmico, o que resulta em tempos de resfriamento muito longos. Por outro lado, a adição de nanopartículas poderia melhorar a condutividade térmica e a taxa de resfriamento, o que pode melhorar o desempenho dos sistemas de estocagem de energia térmica baseados em MMF através do fornecimento de uma densidade de energia térmica maior com uma diferença de temperatura muito menor entre a estocagem e a recuperação.

Angayarkanni e Philip (2015) afirmam que o vigoroso movimento Browniano de nanopartículas suspensas em fluidos base faz dos nanofluidos mais estáveis quando comparados aos microfluidos, o que é um dos atrativos dos nanofluidos para aplicações de transferência de calor. Três propriedades que faz dos nanofluidos serem fluidos refrigerantes promissores são a condutividade térmica aumentada, a transferência de calor aumentada e o fluxo de calor crítico aumentado. Estudos mostram que quantidades relativamente pequenas de nanopartículas podem aprimorar a condutividade térmica de fluidos base em grande medida. Duas características que são muito importantes para sistemas de transferência de calor são a estabilidade extrema e a alta condutividade térmica.

A introdução das nanopartículas aprimora significativamente o desempenho da transferência de calor dos fluidos. Os fluidos base podem ser água, líquidos orgânicos (etileno, trietileno-glicol, refrigerantes, etc.), óleo e lubrificantes, bio-fluidos, soluções

poliméricas e outros líquidos comuns. O material das nanopartículas incluem metais quimicamente estáveis (ouro, cobre), óxidos metálicos (alumina, sílica, zircônia, titânia), óxidos cerâmicos (Al_2O_3 , CuO), carbonos metálicos (SiC), nitrosos metálicos (AlN , SiN), carbonos em várias formas (diamante, grafite, nanotubos carbônicos, fulereno) e nanopartículas funcionalizadas (Sarkar et al., 2015).

A maioria dos trabalhos de pesquisa está focada, principalmente, nos nanofluidos baseados em água e etileno glicol, muito poucos relatórios da síntese de nanofluidos baseados em óleo foram encontrados, segundo Sarkar et al. (2015). Xuan e Li (2000) descobriram que nanofluidos baseados em óleo exibiram um melhor aproveitamento das características de transferência de calor quando comparados com os nanofluidos baseados em água, e a viscosidade do óleo poderia ser crucial para a dispersão e estabilidade dos nanofluidos. Hwang et al. (2007) também mostraram conclusões similares de que um melhoramento superior na condutividade térmica pode ser obtido se o fluido base de uma condutividade térmica inferior for usado. Portanto, nanofluido com base em óleo contendo nanotubos de carbono, TiO_2 , CuO , Al_2O_3 , AlN e SiO_2 , para aplicações industriais e engenharia, tem atraído um pouco mais de atenção nos anos recentes.

Segundo Sarkar et al. (2015), uma significativa quantidade de pesquisa tem sido conduzida sobre nanofluidos ao longo das últimas décadas incluindo preparação, caracterização, modelagem, transferência de calor convectiva e evaporativa e aplicações, entre outros. Mas os nanofluidos híbridos são um tipo muito recente, que pode ser preparado ao provocar a suspensão de (i) diferentes tipos (dois ou mais) de nanopartículas num fluido base, e (ii) nanopartículas híbridas (composto) em um fluido base. Um material híbrido é uma substância que combina propriedades físicas e químicas de diferentes materiais simultaneamente e fornece algumas propriedades em uma fase homogênea. Nanomateriais sintéticos híbridos exibem propriedades físico-químicas destacáveis que não existem nos componentes individuais. Uma quantidade significativa de pesquisa tem sido realizadas considerando as propriedades destes compostos e materiais híbridos constituídos de nanotubos de carbono (CNT) tem sido usados em sensores eletroquímicos, biossensores, etc. mas o uso destes nanomateriais híbridos em nanofluidos não tem se desenvolvido tanto. Trabalho sobre nanofluidos híbridos é muito limitado e uma grande quantidade de estudos experimentais ainda está sendo realizado.

O principal objetivo da sintetização dos nanofluidos híbridos é obter as propriedades dos seus materiais constituintes. Um único material não possui todas as características necessárias para um propósito particular; ele deve ter algumas boas propriedades térmicas e propriedades reológicas. Mas na maioria das aplicações práticas, é necessário um ajuste entre várias propriedades e que é onde o uso de nanofluidos híbridos surge (Sarkar et al., 2015). Além disso, do nanofluido híbrido espera-se obter uma condutividade térmica melhor quando comparado aos nanofluidos individuais devido ao efeito sinérgico.

Nanotubos de carbono apresentam uma variedade de propriedades peculiares como sua força física, estabilidade química, resistência mecânica, condutividades térmicas e elétricas muito elevadas, etc. Estas características têm atraído os pesquisadores em direção aos nanotubos de carbono bem como o desenvolvimento de uma nova categoria de nanomateriais híbridos constituídos de um composto de nanotubos de carbono com nanopartículas metálicas, semicondutoras e não-condutoras.

Diferentes tipos de nanofluidos têm sido adaptados para uma ampla variedade de aplicações de engenharia tais como em automóveis, fluidos refrigerantes, fluidos de freio, refrigeradores domésticos, dispositivos solares, cosméticos, sensores de defeitos, filtros óticos e selantes.

Wang et al. (2014) ainda afirmam que a transferência de calor com mudança de fase de nano-suspensões e seus sistemas de desempenho tem sido relatados experimentalmente. Por exemplo, Elgafy et al. (2005) preparam um composto com nanotubos de carbono dispersadas em parafina. Observou-se que o composto não apenas melhorou a condutividade térmica, mas também aumentou a taxa de resfriamento das suspensões. Estudos experimentais foram realizados por Wu et al. (2009) sobre a condutividade térmica e tempo de congelamento de água com nanopartículas de Al_2O_3 dispersadas. Este estudo mostrou que o tempo total de congelamento do nanofluido com Al_2O_3/H_2O foi reduzido em 20,5% com a adição de 0,2% da fração do volume de nanopartículas. Mais recentemente, tanto o desempenho de fusão como de congelamento de parafina com nanopartículas de cobre foram investigadas por Wu et al. (2010). Um decréscimo destacado nas taxas de ambos processos (fusão e congelamento) foi observado, na ordem de 30% com uma suspensão de 1% da fração de volume das nanopartículas de cobre. Liu et al. (2009) calculou a capacidade de estocagem dos nanofluidos $TiO_2/BaCl_2$, e a capacidade de estocagem/fornecimento foi maior naqueles que continham $BaCl_2$ em solução aquosa do que aqueles que não tinha nanopartículas em

suspensão. Fan e Khodadadi. (2012) realizou um estudo experimental de melhoria da condutividade térmica e no congelamento unidirecional acelerado com nanofluidos de CuO/ciclohexano. Xiang e Drzal(2011) e Yavari et al. (2011) dispersaram grafeno em diferentes soluções e encontraram uma melhoria da condutividade e da estocagem de calor latente.

MacDevette et al. (2016) asseguram que indubitavelmente, qualquer melhoria no desempenho térmico de um material de mudança de fase (MMF) terá implicações de grande alcance. Técnicas comuns para melhorar a condutividade térmica incluem o uso de aletas, inserção de uma matriz metálica e favos de metal. Uma abordagem recente e inovadora é dispersar nanopartículas que possuem propriedades altamente condutivas no material de mudança de fase (MMF), que é, usar nanofluidos como materiais de mudança de fase, também conhecida como material de mudança de fase reforçado por nanopartículas (MMFRN).

Devido ao fato de que este é um campo de estudo relativamente novo, pouca teoria e trabalho experimental dizem respeito aos nanofluidos como um material de mudança de fase (MMF). A maioria dos estudos mostra que com a adição de nanopartículas, taxas superiores de liberação de energia podem ser obtidas.

Jourabian et al. (2013) estudaram a mudança de fase em um anel cilíndrico horizontal através do método de Boltzmann baseado na entalpia que demonstrou que o material de mudança de fase reforçado por nanopartículas (MMFRN) teve uma redução no tempo de derretimento quando comparado os materiais de mudança de fase convencionais. Khodadadi e Hosseinizadeh (2007) investigaram o congelamento de um nanofluido contendo cobre e água em uma cavidade quadrada aquecida diferencialmente onde eles mostraram que com a adição de nanopartículas a taxa de liberação de calor é maior em um material de mudança de fase reforçado por nanopartículas (MMFRN) em relação aos materiais de mudança de fase convencionais (MMFs). Eles explicaram o aumento nas taxas de liberação devido ao aumento da condutividade térmica. Kumaresan et al. (2013) mostrou que com uma pequena fração de volume, 0,6% de nanotubos de carbono de paredes múltiplas suspensos em parafina líquida, o aumento na transferência de calor resulta em uma redução do tempo de solidificação de 33,64%. Sebti et al. (2011) também mostraram que com a adição de nanopartículas, o tempo de solidificação é reduzido e a taxa de transferência de calor é aumentada. Estes estudos sugerem que os nanofluidos tem potencial para melhorar os sistemas de termoacumulação.

Outra notação de MacDevette et al. (2016) é que existe muito debate sobre se a temperatura de fusão do MMFRN varia com a fração de volume de nanopartículas e como isso poderia ser modelado. Xie et al. (2008) afirmam que um modelo linear, diminuindo com o diâmetro, pode prever a temperatura de derretimento. Embora, estudos experimentais com nanofluidos com água e Al_2O_3 mostram que o impacto de ϕ no ponto de congelamento é insignificante. Wu et al. (2009) também sugerem que a temperatura de mudança de fase será independente da fração de massa das nanopartículas, contudo a presença de nanopartículas deve afetar o grau de super resfriamento e o tempo de fusão/congelamento. Num estudo numérico, Khodadadi e Hosseinizadeh (2007) assumiu que a temperatura de derretimento seria constante em diâmetro e mostrou que o tempo de congelamento diminuía à medida que a fração de volume de partículas sólidas aumentava.

Regin et al. (2008) corroboram que um bom projeto de termoacumulação de calor latente demanda conhecimento sobre os materiais de mudança de fase (MMF's) e os processos de troca de calor, especialmente os processos de derretimento e de solidificação.

Um sistema de termoacumulação de calor latente tem os seguintes componentes principais:

- (i) Um material de mudança de fase adequado para o intervalo de temperatura desejado;
- (ii) Um recipiente para o material de mudança de fase (encapsulação dos MMF's);
- (iii) Uma superfície de troca de calor necessária para transferir calor da fonte de calor para o MMF e do MMF para o sumidouro.

Os MMF's são materiais de armazenamento de energia que possuem capacidades consideravelmente superiores para termoacumulação quando comparados com os materiais de armazenamento de energia de calor sensível, e são capazes de absorver ou lançar grande quantidade de energia a uma temperatura constante quando submetidos ao processo de mudança de fase.

O projeto e a operação de armazenamento de calor latente são dependente das características químicas e físicas do MMF usado. Quanto maior for a densidade energética do MMF, menor será o volume necessário para estocagem demandado para cada aplicação proposta. Isto implica em custos menores para a estrutura de troca de calor ou uma capacidade de armazenamento térmico total superior do sistema considerando o mesmo volume global.

Regin et al. (2008) também esclarecem que a utilização com sucesso de MMF e fluidos de transferência de calor depende do desenvolvimento de meios de contenção (encapsulação). A encapsulação do MMF com diferentes geometrias de cápsulas tem suas próprias vantagens e desvantagens.

Uma contenção de MMF deve:

- (i) Atender às demandas de força, flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica;
- (ii) Agir como barreira para proteger o MMF de uma interação danosa com o ambiente;
- (iii) Fornecer superfície suficiente para transferência de calor;
- (iv) Fornecer estabilidade estrutural e manuseio fácil.

Os tipos de contenção estudados são o armazenamento em massa em tanques trocadores de calor, macroencapsulação e microencapsulação. A Figura 2.2 mostra vários diagramas esquemáticos de contenções usadas em sistemas de termoacumulação de calor latente.

Armazenamento em massa

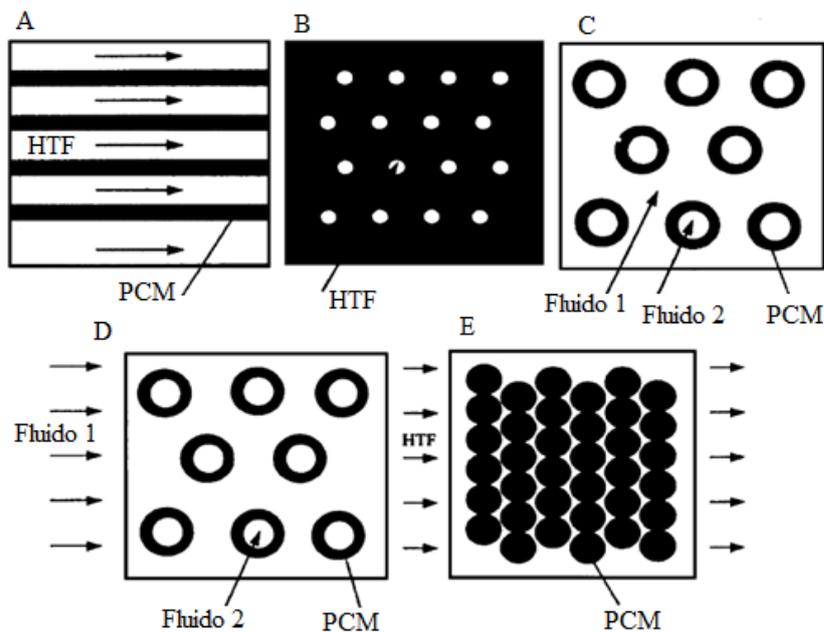
Consiste de um tanque com trocadores de calor para MMF's com projetos semelhantes aos tanques convencionais usados para armazenar energia por calor sensível, mas com algumas diferenças significativas. A característica principal deste sistema é a necessidade de uma troca de calor maior do que a encontrada em tanques convencionais devido a densidade de calor armazenado no MMF, que é superior ao calor armazenado nos tanques tradicionais.

Macroencapsulação

O tipo mais comum de contenção de MMF é a macroencapsulação, na qual uma quantidade significativa de MMF é encapsulada em uma unidade discreta. A massa de MMF por unidade pode abranger uma faixa que varia entre poucos gramas até quilogramas. A vantagem da macroencapsulação é a sua aplicabilidade tanto para líquido quanto para o ar sendo fluidos de transferência de calor e mais fácil de transportar e manusear. O formato das macrocápsulas varia desde painéis retangulares até esferas ou bolsas sem um formato definido. A chave para o sucesso da macrocápsula é projetar a macrocápsula de tal forma que ela se adeque bem à aplicação pretendida. A macroencapsulação de MMF pode: (i) evitar

grandes separações de fases; (ii) aumentar a taxa de transferência de calor e (iii) fornecer uma estrutura de auto-sustentação para o MMF. Os recipientes com melhor custo-benefício são as garrafas plásticas (garrafas de polietileno de alta e baixa densidade, garrafas de polipropileno), latas de metal banhado a estanho e latas de aço leve. Entretanto, a corrosão poderia levar a consequências desastrosas se os acabamentos em laca internos e externos não forem aplicados apropriadamente às latas de aço leve.

Figura 2.2 - Diagramas típicos de sistemas de termoacumulação de calor latente: (a) chapa plana; (b) casco e tubo com fluxo interno; (c) casco e tubo com fluxo paralelo; (d) casco e tubo com fluxo cruzado; (e) leito de esferas empilhadas.



Fonte: Reginet al, (2008)

Microencapsulação

A microencapsulação refere-se à técnica na qual um grande número de pequenas partículas de MMF são inseridas numa matriz contínua e selada. A menos que a encapsulação da matriz tenha uma condutividade térmica elevada, o sistema de microencapsulação apresenta uma taxa de transferência de calor reduzida. A rigidez da matriz previne correntes convectivas e força toda transferência de calor a ocorrer por meio de condução. Isto pode reduzir seriamente as taxas de transferência de calor, especialmente na etapa de carregamento. Atualmente, o custo de sistemas de microencapsulação é alto quando comparado a outros métodos de armazenamento de energia, e é usado apenas em aplicações de controle térmico.

Projeto de leitos de MMF para termoacumulação

É essencial encontrar meios eficientes e econômicos de atingir a transferência de calor necessária para congelar e derreter o meio de armazenamento em um sistema de armazenamento de energia de calor latente. O leito consiste de MMF macroencapsulado, um tanque e o fluxo de fluido de transferência de calor através dos espaços vazios do leito. Os principais fatores a ser considerados no projeto de unidade de estocagem contendo MMF são: (1) limites de temperatura dentro do qual a unidade está operando; (2) a temperatura de congelamento e derretimento do MMF; (3) o calor latente do MMF; (4) a carga térmica; e (5) configuração do leito de estocagem.

A transferência de calor eficiente entre o fluxo de fluido e as partículas sólidas nos leitos é necessária para melhor operação do leito adequado para estocagem de energia. Existem inúmeras variáveis que podem afetar o desempenho de uma unidade de estocagem de energia térmica em leito. Essas variáveis podem ser divididas nos três grupos seguintes:

- (i) Aquelas que estão ligadas com a construção do leito tais como tamanho, formato e a arrumação dos elementos materiais, comprimento do leito e a configuração geométrica do recipiente;
- (ii) Aquelas que descrevem as características do fluxo tais como propriedades do fluido e a velocidade da massa;
- (iii) Aquelas associadas com a resposta transiente do material do leito tais como o estado térmico inicial do leito, a temperatura de entrada do fluido, as propriedades físicas e térmicas do material do leito e o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Por fim, Regin et al. (2008) concluem que, no geral, os parâmetros governantes principais para um projeto de um leito de MMF são o tipo da partícula, tamanho médio e formato, fração vazia dentro do leito, propriedades de transporte e térmica do fluido, tamanho geral do leito (área e comprimento), taxa do fluxo e a temperatura de entrada do fluido. Uma unidade de estocagem de calor latente típica consiste de um número de cápsulas organizadas em um padrão particular dentro do recipiente como um leito adequado, mostrado na figura a seguir:

A maioria dos desafios tecnológicos na maior parte das indústrias tais como refrigeração, condicionamento de ar, indústria de transporte, química, resfriamento eletrônico

e de manufatura, diz respeito a alcançar um resfriamento eficiente para várias aplicações. Além disso, a energia necessária para várias aplicações depende do tempo bem como uma fase e padrão diferente, principalmente nas aplicações de resfriamento de construção. Esse desencontro entre o fornecimento de energia e sua demanda provocou a necessidade de sistemas de termoacumulação (Zalba et al., 2003), estocar, recuperar o calor e produzir energia térmica fria também na forma de calor sensível e latente ao usar um meio de estocagem adequado. A integração dos sistemas de termoacumulação de frio em um resfriador reduz consideravelmente os custos com eletricidade ao modificar o horário de pico de consumo durante o dia, especialmente em grandes centrais de condicionamento de ar (Cheralathan et al., 2007), refrigeração em supermercados (Marimon et al., 2011) e vários outros lugares como estações-base de telecomunicação, onde o resfriamento necessário é altamente intermitente (Sun et al., 2014).

Os sistemas de termoacumulação de frio com material de mudança de fase (MMF) possui mais vantagens do que a estocagem de calor sensível, devido a capacidade de estocagem maior e a transição de fase de uma forma isotérmica. Alguns artigos (Li et al., 2012; Oro et al., 2012) relatam informações sobre materiais, geometria de encapsulação e transferência de calor no campo de aplicações de termoacumulação de frio. A maior parte destes sistemas normalmente usa a água como um meio de estocagem, devido as suas propriedades de transporte térmicos superiores.

As características de mudança de fase de vários MMF's como parafina com diferentes temperaturas de mudança de fase (Kumaresan et al., 2012; Sari e Karaipekli, 2007), cloreto de bário (He et al., 2012), ácido oléico (Harikrishnan e Kalaiselvam, 2012), ácido esteárico (Li et al., 2013) já foram investigados e relatados. No geral, seus resultados revelaram que a adição de nanopartículas leva a um aperfeiçoamento na condutividade térmica e uma redução no tempo de solidificação/derretimento quando comparado com o fluido base. Os resultados também mostram que o efeito da adição de nanomaterial no calor latente do MMF depende da concentração de nanopartícula. No mais, o principal problema de subresfriamento no MMF é significativamente reduzido, particularmente na água para aplicações de termoacumulação de frio com a adição de alumina (Wu et al., 2009; Altohamy et al., 2015), óxido de cobre (Fan e Khodadadi, 2012), cobre (Wu et al., 2010) e nanotubos de carbono com multicamadas (Kumaresan et al., 2013). Recentemente, alótropo cristalino de carbono bidimensional e grafeno recebem muita atenção entre os pesquisadores devido às suas excelentes propriedades de transporte térmico e elétrico em várias aplicações potenciais (Liu et al., 2015; Baby e

Ramaprabu, 2011). Mehrali et al. (2013) prepararam um novo composto contendo ácido palmítico e óxido de grafeno através do método da impregnação. A condutividade térmica do MMF composto foi melhorada três vezes mais devido à presença de óxido de grafeno e exibiu uma boa confiabilidade térmica em termos de propriedades térmicas e estabilidade química depois de 2500 ciclos de derretimento/congelamento. Zhong et al. (2013) prepararam o MMF com aerogel de grafeno tridimensional e ácido octodecanóico e a condutividade térmica do composto com 20% do volume foi aumentada 14 vezes devido área de superfície específica superior do aerogel de grafeno.

3 MODELO NUMÉRICO

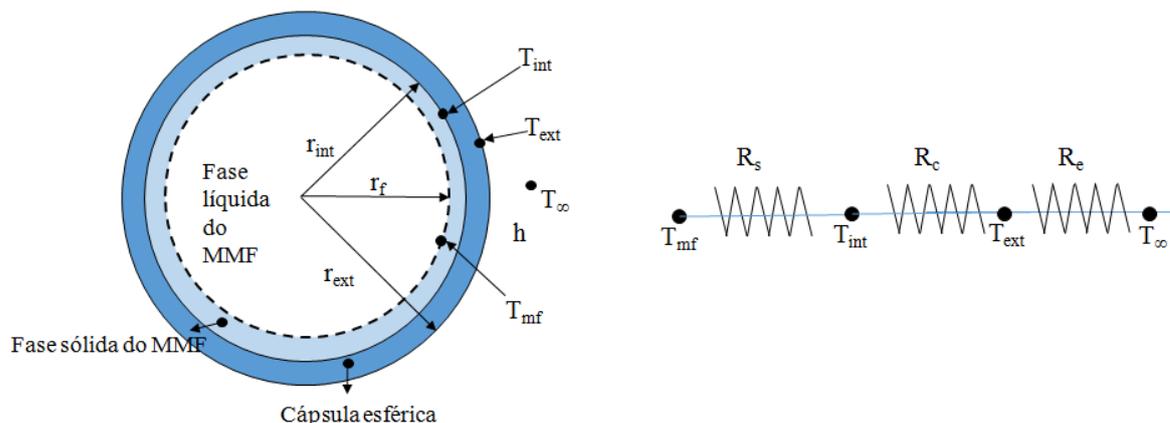
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

O objetivo deste capítulo é apresentar o modelo matemático e numérico do problema de resfriamento de uma cápsula esférica contendo um material de mudança de fase.

O processo de resfriamento da esfera é provocado pelo escoamento de um fluido de trabalho com temperatura menor que a temperatura de congelamento do material de mudança de fase. Ao percorrer a superfície, o fluido de trabalho troca energia com o MMF contido na cápsula, provocando, inicialmente, uma diminuição da sua temperatura até o momento em que é formada a primeira lâmina de solidificação. Em um estágio posterior, tem início a solidificação do MMF, em que estão coexistindo a fase sólida e a líquida, até o instante em que a última fração de líquido seja congelada. Por último, provoca-se a diminuição da temperatura do material já solidificado até que a temperatura de toda esfera seja a mesma do fluido de trabalho. Durante o processo de mudança de fase, tem-se uma frente de solidificação deslocando-se da parede da cápsula em direção ao seu centro. No modelo matemático, as três etapas do processo são consideradas.

O processo de transferência de calor será considerado como condutivo, quando as fases sólidas e líquidas são únicas, e condutivo com mudança de fase quando as duas fases coexistem. O efeito convectivo presente na região líquida do MMF será tratado por meio de um coeficiente de condutividade térmica efetivo que substitui o valor da condutividade do líquido na equação da energia, como em Bedecarrats et al. (1996). A Figura 3.1 ilustra cada uma das fases (líquido e camada sólido do material de mudança de fase) e o compara com resistências térmicas equivalentes.

Figura 3.1 - Cápsula esférica, fases do MMF e circuito térmico equivalente



Em que as resistências térmicas R_s , R_c e R_e são dadas por (Incropera, 2011):

$$R_s = \frac{1}{4\pi k_s} \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{r_{int}} \right)$$

$$R_c = \frac{1}{4\pi k_c} \left(\frac{1}{r_{int}} - \frac{1}{r_{ext}} \right)$$

$$R_e = \frac{1}{4\pi h r_{ext}^2}$$

R_s é a resistência térmica equivalente à fase sólida, R_c é resistência térmica equivalente à cápsula esférica, R_e é a resistência térmica equivalente à condição externa, k_s é a condutividade térmica do material solidificado, k_c é a condutividade térmica da cápsula.

Nos processos de resfriamento puro, que correspondem ao primeiro e ao terceiro estágio do processo, pode-se escrever a equação governante da condução e suas respectivas condições de contorno:

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \frac{k_j}{\rho_j c_j} \left[2 \frac{\partial T_j}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} \right], j = l, s; 0 < r < r_{int} \quad (3.1)$$

$$Q = -k \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T - T_\infty}{\frac{r_{ext} - r_{int}}{k_c} + \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 \frac{1}{h}}, r = r_{int} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, r = 0 \quad (3.3)$$

Na Eq. (3.1), k , ρ e c correspondem à condutividade térmica, densidade e calor específico, respectivamente. Porém, esses valores adotados das variáveis devem corresponder com a condição do material de mudança de fase, completamente líquido no primeiro estágio do processo e completamente sólido no terceiro estágio. A temperatura, o tempo e a coordenada radial no sistema de coordenadas fixo são representados, respectivamente, por T , t e r . Na Eq. (3.2), a condutividade térmica do material da cápsula e o coeficiente de transferência de calor na superfície externa são representados, respectivamente, por k_c e h .

No segundo estágio existe a transferência de calor com mudança de fase, que é caracterizada pela coexistência tanto da fase líquida como da fase sólida em dois domínios, interligando as soluções através da condição de contorno na interface. As equações que regem o fenômeno e suas respectivas condições de contorno podem ser escritas como:

- Região sólida (s)

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{k_s}{\rho_s c_s} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} \right], \quad r_f < r < r_{int} \quad (3.4)$$

- Região líquida (l)

$$\frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{k_l}{\rho_l c_l} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} \right], \quad 0 < r < r_f \quad (3.5)$$

Condição de Contorno

$$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = \frac{T_s - T_\infty}{\frac{r_{ext} - r_{int}}{k_c} + \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 \frac{1}{h}}, \quad r = r_{int} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial T_l}{\partial r} = 0, \quad r = 0 \quad (3.7)$$

$$T_s = T_l = T_{mf}, \quad r = r_f \quad (3.8)$$

Para calcular a posição da interface, r_f , em cada instante de tempo, faz-se um balanço de energia na interface sólido-líquido para se obter uma equação adicional. Aqui, a variável L representa o calor latente do material de mudança de fase.

Do Balanço de Energia:

$$\dot{Q}_s - \dot{Q}_l = \dot{m}L = A \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} \right)$$

Em que:

$$\dot{m} = \rho \frac{\partial \mathcal{V}}{\partial t}$$

Por sua vez, tem-se que:

$$\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial t} = A \frac{dr_f}{dt} \rightarrow \dot{m} = \rho A \frac{dr_f}{dt}$$

Com isso, tem-se que:

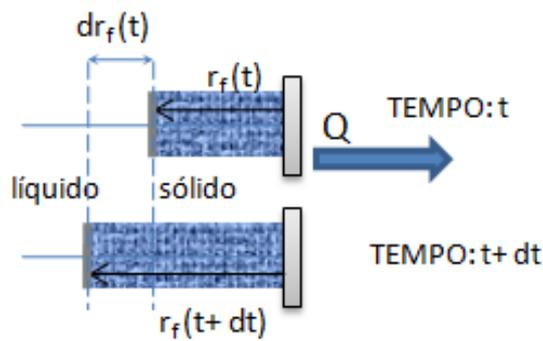
$$A \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) = \left(\rho A \frac{dr_f}{dt} \right) L$$

Logo,

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} = \rho L \frac{dr_f}{dt}, \quad r = r_f \quad (3.9)$$

A Figura 3.2 mostra que a velocidade de propagação da frente de solidificação é proporcional à diferença entre o calor que atravessa as regiões da fase sólida e da fase líquida.

Figura 3.2 - Posição da frente de solidificação variando conforme a intensidade do calor trocado no tempo



Para o caso de se ter nanofluidos com uma concentração $0 < \Phi < 1$ de nanopartículas, o primeiro membro da Equação (3.9) deve ser modificado levando em consideração a presença das nanopartículas que ocupam um volume na região solidificada, mas não sofrem o processo de solidificação como ocorre com o fluido base, ou seja:

$$m_{nf} = (1 - \Phi)\rho_{bf}V_{bf} + \Phi\rho_{np}V_{np}$$

Porém, as nanopartículas não mudam de fase. Logo, a massa do nanofluido a ser solidificada depende apenas da massa do fluido base.

$$\dot{m}_{nf} = (1 - \Phi)\rho_{bf} \frac{\partial V_{bf}}{\partial t} = (1 - \Phi)\rho_{bf} A \frac{\partial r_f}{\partial t}$$

Aplicando à solidificação, tem-se:

$$k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} = (1 - \Phi)\rho_{bf} L \frac{dr_f}{dt}$$

Com

$$\frac{dr_f}{dt} = \frac{1}{(1-\Phi)} \frac{(k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial r})}{\rho_b f L} \quad (3.10)$$

O coeficiente convectivo na superfície externa da cápsula esférica é obtido a partir de correlações para o número de Nusselt médio (\overline{Nu}_D). Para uma cápsula esférica sofrendo um fluxo externo com velocidade de 1 m/s, cuja temperatura for diferente daquela da superfície da cápsula, aparecem correntes convectivas produzidas pela diferença de temperatura. O coeficiente de transferência de calor médio para esta situação física pode ser obtido pela correlação (Incropera et al., 2011):

$$\overline{Nu}_D = \frac{\overline{h}D}{k_f} = 2 + 0,6Re_D^{0,5} Pr^{0,33} \quad (3.11)$$

Em que k_f é a condutividade térmica do fluido externo, D é o diâmetro externo da cápsula esférica, Pr é o número de Prandtl e Re é o número de Reynolds. Esta correlação é válida para os intervalos $0,71 \leq Pr \leq 380$ e $3,5 \leq Re \leq 7,6 \times 10^4$.

As Eqs. (3.1) a (3.10) foram resolvidas numericamente através do método de diferenças finitas do tipo implícito. Devido ao processo de solidificação, existe uma interface que se movimenta a partir da fronteira interna da cápsula em direção ao centro, separando duas regiões perfeitamente definidas (região sólida e líquida). Por isso foi utilizado o método de malha móvel, proposto por Murray e Landis (1959), para discretizar as equações em diferenças finitas. Este método fornece a posição da interface a cada passo de tempo de forma fácil, tendo em vista que a interface sempre coincide com um dos nós da malha. À medida que a interface se desloca durante o processo de solidificação, a malha aplicada à região sólida se distende, ficando os nós da malha cada vez mais distantes. Em contrapartida, a malha aplicada à região líquida apresenta os pontos cada vez mais próximos. Durante o processo de resfriamento puro, onde só uma das fases existe, é utilizada uma malha fixa.

Quando a mudança de fase se inicia, pode-se assumir que para um pequeno intervalo de tempo, todo o calor sensível disponível na interface entre o material de mudança de fase e a superfície interna da cápsula esférica será igual ao calor latente transferido ao material de mudança de fase. Essa abordagem de simplificação permite encontrar uma expressão para determinar a posição inicial da frente de mudança de fase assim que se inicia a solidificação. Esta consideração é validada por Heitz e Westwater (1970), já que geralmente é necessário obter uma posição da frente de mudança de fase realística e não, necessariamente, um valor

preciso desta, haja vista que a fração de tempo em que isto ocorre se torna desprezível se comparado ao tempo total do processo.

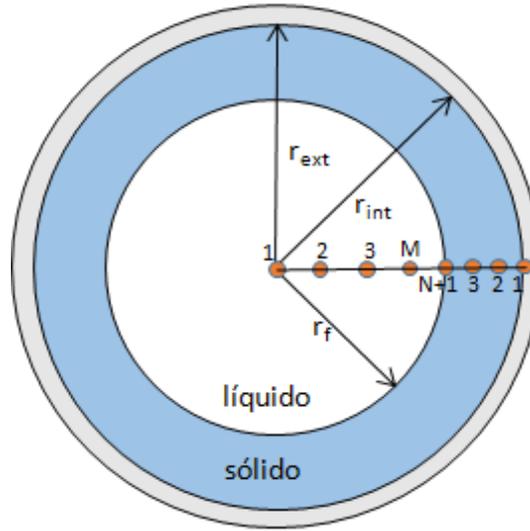
3.2 MODELAGEM NUMÉRICO-COMPUTACIONAL

Como já dito, a transferência de calor na cápsula ocorre em três etapas bem definidas. Na primeira etapa ocorre um processo de resfriamento do fluido contido na cápsula, na segunda etapa, ocorre um processo de solidificação do líquido com a presença de duas fases diferentes (sólido e líquido), e na última etapa, ocorre o resfriamento do material solidificado.

O processo que ocorre, na primeira e na terceira etapas, é representado pelo mesmo conjunto de equações – mudando apenas os parâmetros referentes ao estado do material de mudança de fase, que são discretizadas utilizando o método de diferenças finitas com um esquema totalmente implícito e uma malha fixa regular obtida dividindo o domínio em N intervalos na direção radial.

No que diz respeito à segunda etapa, utiliza-se, também, o método de diferenças finitas com esquema totalmente implícito para a discretização das equações, com malhas regulares, porém com tamanhos diferentes para as regiões sólida e líquida como indicado na Figura 3.3. As duas malhas são móveis e obtidas dividindo os respectivos domínios em N intervalos iguais na direção radial. Neste esquema de malha adotado, a frente de solidificação sempre está localizada em um dos nós da malha, permitindo uma discretização mais direta para a equação do balanço de energia na interface das regiões sólida e líquida (Eq.3.6). Importante destacar que no tratamento numérico das malhas móveis existe uma interdependência entre elas, isto é, à medida que a região sólida cresce, devido ao processo de solidificação, o tamanho do intervalo no domínio sólido também cresce, enquanto que o tamanho do intervalo no domínio líquido diminui proporcionalmente. Entre o resfriamento puro do líquido e a solidificação, a malha deixa de ser fixa e passa a ser móvel. Esta transição demanda um tratamento especial para o instante em que ocorre o início da solidificação, considerando-se que para uma pequena fração de tempo todo o calor trocado entre a cápsula e o fluido de trabalho é convertido em calor latente no material de mudança de fase. Com essa consideração, é possível determinar a primeira lâmina de material solidificado e, portanto, uma região líquida e outra sólida dentro da cápsula, principiando o tratamento numérico da malha móvel.

Figura 3.3 - Desenho com a divisão dos domínios sólido e líquido numa cápsula esférica durante a mudança de fase



3.2.1 Material de Mudança de Fase Totalmente Sólido ou Líquido

Utilizando aproximações para frente para as primeiras derivadas (temporal e espacial) e uma aproximação de três pontos para a segunda derivada espacial, será obtida uma aproximação por diferenças finitas para a equação da condução de calor dentro da cápsula esférica. O esquema representa uma formulação totalmente implícita, como mostra a Eq.(3.12), com condição inicial sendo $T_i = 25^\circ\text{C}$:

$$\frac{T_i^{t+1} - T_i^t}{\Delta t} = \alpha \left[\frac{2}{r_i} \left(\frac{T_{i+1}^{t+1} - T_i^{t+1}}{\Delta r} \right) + \left(\frac{T_{i+1}^{t+1} - 2T_i^{t+1} + T_{i-1}^{t+1}}{\Delta r^2} \right) \right] \quad (3.12)$$

A Eq. 3.12 pode ser reescrita:

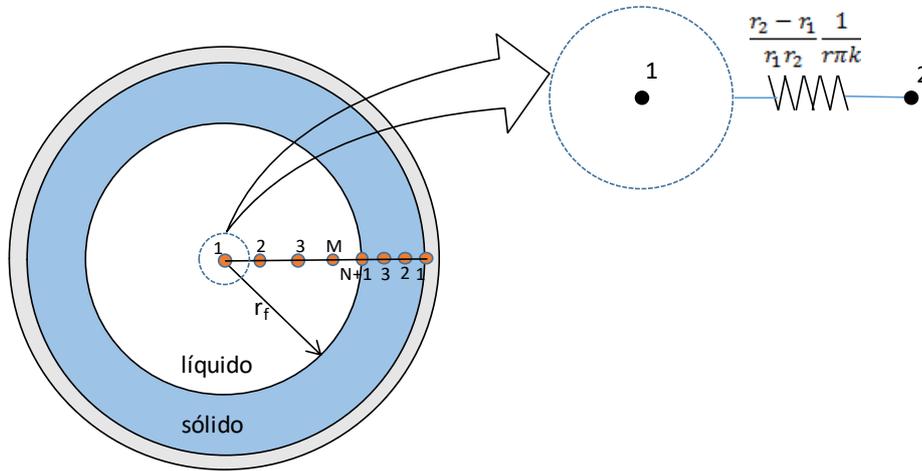
$$T_i^t = T_{i-1}^{t+1} \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) + T_i^{t+1} \left(1 + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{2\alpha \Delta t}{r_i \Delta r} \right) + T_{i+1}^{t+1} \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} - \frac{2\alpha \Delta t}{r_i \Delta r} \right) \quad (3.13)$$

Esta equação é válida para os pontos internos do domínio, entre 2 e N-1, com $r_i = (i-1)\Delta r$.

A Eq. 3.13 não pode ser aplicada no ponto 1 do domínio, pois este é um ponto da extremidade. Uma possibilidade de solução seria realizar a aproximação das derivadas com pontos exclusivamente à jusante do ponto 1. Outra opção é utilizar o conceito físico para estabelecer a equação para este ponto utilizando um balanço de energia na forma da Eq.(3.14) que vai encontrar uma equação para avaliar a temperatura nesse ponto e fazer uma análise concentrada numa esfera de raio $\Delta r/2$. Com base na Figura 3.4, faz-se e um balanço de

energia para encontrar uma equação que permita determinar a temperatura no centro da esfera:

Figura 3.4 - Desenho para análise concentrada da esfera com raio $\Delta r/2$



$$\rho c V \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{4\pi k (T_2 - T_1)}{\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}} \quad (3.14)$$

Simplificando,

$$\rho c V \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{4\pi k (T_2 - T_1)}{\frac{\Delta r - \frac{\Delta r}{2}}{\Delta r \frac{\Delta r}{2}}} \rightarrow \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{24\alpha (T_2 - T_1)}{\Delta r} \quad (3.15)$$

Em diferenças finitas com esquema totalmente implícito, pode-se escrever:

$$\frac{T_1^{t+1} - T_1^t}{\Delta t} = \frac{24\alpha (T_2^{t+1} - T_1^{t+1})}{\Delta r^2} \rightarrow T_1^t = -\frac{24\alpha \Delta t}{\Delta r^2} T_2^{t+1} + \left(\frac{24\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + 1\right) T_1^{t+1} \quad (3.16)$$

em que $\alpha = \alpha_{\text{líquido}}$ ou $\alpha = \alpha_{\text{sólido}}$, a depender do estado do material de mudança de fase.

A equação para o ponto N, o mais externo, pode ser obtida a partir da combinação entre a condição de contorno definida em $r = r_{\text{int}}$ e a equação válida para os pontos internos do domínio. Escrevendo inicialmente a Eq.(3.13) para $i = N$, origina-se a equação:

$$T_N^t = \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2}\right) T_{N-1}^t + \left(1 + \frac{2\alpha \Delta t}{(N-1)\Delta r^2} + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2}\right) T_N^{t+1} + \left(-\frac{2\alpha \Delta t}{(N-1)\Delta r^2} - \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2}\right) T_{N+1}^{t+1} \quad (3.17)$$

A temperatura do ponto N+1 é obtida aplicando as condições de contorno na fronteira da esfera e resulta na Eq.(3.18).

$$-kA \frac{\partial T}{\Delta r} = \frac{T_{N+1} - T_\infty}{R_t} \quad (3.18)$$

em que R_t é a resistência térmica para uma casca esférica determinada da seguinte maneira:

$$R_t = \frac{1}{4\pi r_{int}^2} \left[\left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \frac{r_{ext} - r_{int}}{k_c} \right) + \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 \frac{1}{h} \right] = \frac{1}{A} R'_t \quad (3.19)$$

Discretizando, tem-se:

$$-k_{ft} \frac{T_{N+1} - T_N}{\Delta r} = \frac{T_{N+1} + T_\infty}{R_t} \quad (3.20)$$

em que k_{ft} é a condutividade de fluido externo.

$$T_{N+1} = \left[\frac{\left(T_N + \frac{\Delta r}{k_{ft} R_t} T_\infty \right)}{\left(1 + \frac{\Delta r}{k_{ft} R_t} \right)} \right] \quad (3.21)$$

Substituindo a Eq.(3.21) na Eq.(3.17), tem-se:

$$\begin{aligned} T_N^t = & \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) T_{N-1}^{t+1} + \left(1 + \frac{2\alpha \Delta t}{(N-1)\Delta r^2} + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{\frac{2\alpha \Delta t}{(N-1)\Delta r^2} \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2}}{1 + \frac{\Delta r}{k_c R_t}} \right) T_N^{t+1} + \\ & + \left(\frac{\frac{2\alpha \Delta t}{(N-1)\Delta r^2} \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2}}{1 + \frac{\Delta r}{k_c R_t}} \right) T_\infty \end{aligned} \quad (3.22)$$

Esta equação é válida para o ponto N. Para a condição analisada, é obtido o sistema de equações relacionado a seguir, onde $\alpha = \alpha_{liq}$, ou, $\alpha = \alpha_{sól}$, dependendo da condição do material de mudança de fase.

$$T_1^t = T_2^{t+1} \left(-\frac{24\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) + T_1^{t+1} \left(\frac{24\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + 1 \right)$$

$$T_2^t = T_1^{t+1} \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) + T_2^{t+1} \left(1 + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r \Delta r} \right) + T_3^{t+1} \left(-\frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} - \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r \Delta r} \right)$$

...

$$T_i^t = T_{i-1}^{t+1} \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) + T_i^{t+1} \left(1 + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{2\alpha \Delta t}{(i-1)\Delta r} \right) + T_{i+1}^{t+1} \left(-\frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} - \frac{2\alpha \Delta t}{(i-1)\Delta r} \right)$$

$$T_N^t = T_{N-1}^{t+1} \left(-\frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2} \right) + T_N^{t+1} \left(1 + \frac{2\alpha \Delta t}{(N-1)\Delta r^2} + \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{\frac{2\alpha \Delta t}{(N-1)\Delta r^2} \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2}}{1 + \frac{\Delta r}{k_c R_t}} \right) + T_\infty \left(\frac{\frac{2\alpha \Delta t}{(N-1)\Delta r^2} \frac{2\alpha \Delta t}{\Delta r^2}}{1 + \frac{\Delta r}{k_c R_t}} \right)$$

$$T_{N+1}^t = \left[\frac{\left(T_N + \frac{\Delta r}{k_{ft} R_t} T_\infty \right)}{\left(1 + \frac{\Delta r}{k_{ft} R_t} \right)} \right]$$

3.2.2 Material de Mudança de Fase Parcialmente Sólido e Parcialmente Líquido Dentro da Cápsula

Nesta etapa as duas regiões estão bem definidas, separadas por uma interface que avança a partir da superfície interna da cápsula para o centro (Fig.1), resultando num aumento da região sólida e, conseqüentemente, diminuição da região líquida. Aqui, é fundamental a determinação da posição da interface a fim de aferir o tamanho dos domínios sólido e líquido e suas malhas correspondentes para implementar a discretização das equações governantes.

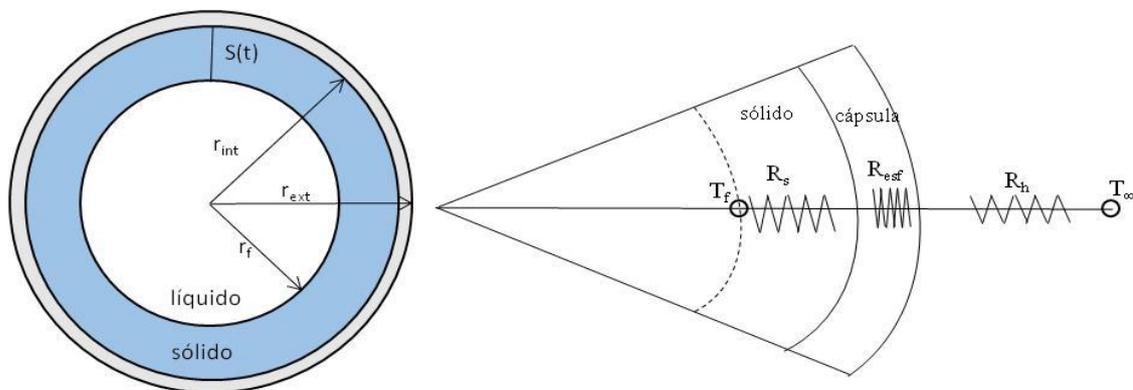
a) Início da solidificação

Com o intuito de determinar a formação da primeira “lâmina” de solidificação, utiliza-se uma consideração de que para uma pequena fração de tempo, todo o calor trocado entre o fluido de trabalho e a cápsula é equivalente ao calor envolvido na solidificação da primeira lâmina. O balanço de energia pode ser expresso como:

$$Q_f = -\rho L \frac{dV}{dt} = -4\pi\rho L r_f^2 \frac{dr_f}{dt} \quad (3.23)$$

Em que Q_f é o calor retirado da cápsula e r_f é a posição da interface sólido-líquido quando formada a primeira lâmina de sólido. A figura seguinte mostra um esquema de resistências térmicas para determinar uma expressão para Q_f .

Figura 3.5 - Representação das resistências térmicas



Com a associação de resistências térmicas mostrada na Figura 3.5, o fluxo de calor que é retirado da cápsula pode ser escrito como:

$$Q_f = \frac{T_f - T_\infty}{R_s + R_c + R_e} \quad (3.24)$$

Em que:

$$R_s = \frac{r_{int} - r_f}{4\pi k_s r_{int} r_f} \quad (3.25)$$

$$R_c = \frac{r_{ext} - r_{int}}{4\pi k_s r_{int} r_{ext}} \quad (3.26)$$

$$R_e = \frac{1}{4\pi r_{ext}^2 h} \quad (3.27)$$

Igualando as Eqs. (3.23) e (3.24):

$$-4\pi\rho L r_f^2 \frac{dr_f}{dt} = \frac{T_f - T_\infty}{\frac{r_{int} - r_f}{4\pi k_s r_{int} r_f} + \frac{r_{ext} - r_{int}}{4\pi k_s r_{int} r_{ext}} + \frac{1}{4\pi r_{ext}^2 h}} \quad (3.28)$$

Arranjando e integrando, obtém-se:

$$\frac{r_f^2}{2r_{int}} - \frac{r_f^3}{3r_{int}} + \frac{k_s}{3k_c} \frac{r_f^3}{r_{int}^2} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_s}{3hr_{int}} \frac{r_f^3}{r_{int}^2} + C = -\frac{T_f - T_\infty}{\rho L} \frac{k_s}{r_{int}} t \quad (3.29)$$

Como foi assumido que esta hipótese é válida para uma pequena fração de tempo, então poderia ser considerado que para $\Delta t \rightarrow 0$, $r_f \rightarrow r_{int}$. Esta condição pode ser aplicada à Eq.(3.29) para determinar a constante de integração C. Logo:

$$C = -\left[\frac{r_{int}}{6} + \frac{r_{int}}{3} \frac{k_s}{k_c} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_s}{3hr_{int}} \frac{r_{int}^3}{r_{ext}^2} \right] \quad (3.30)$$

Substituindo em Eq.(3.29)

$$r_{int} \left[\frac{r_f^2}{2r_{int}^2} - \frac{r_f^3}{2r_{int}^3} + \frac{k_s}{3k_c} \frac{r_f^3}{r_{int}^2} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_s}{3hr_{int}^2} \frac{r_f^3}{r_{ext}^2} \right] - \left[\frac{r_{int}}{6} + \frac{r_{int}}{3} \frac{k_s}{k_c} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) + \frac{k_s}{3hr_{int}} \frac{r_{int}^3}{r_{ext}^2} \right] = -\frac{T_f - T_\infty}{\rho L} \frac{k_s}{r_{int}} t \quad (3.31)$$

Fazendo uma mudança de variável:

$$S(t) = 1 - \frac{r_f}{r_{int}} \rightarrow \frac{r_f}{r_{int}} = 1 - S(t) \quad (3.32)$$

$$\left[\frac{(1-S(t))^2}{2} - \frac{(1-S(t))^3}{3} + \frac{k_s}{3k_c} (1-S(t))^3 \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{int}} \right) + \frac{k_s}{3hr_{int}} \frac{(1-S(t))^3}{r_{ext}^2} r_{int}^2 \right] - \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \frac{k_s}{k_c} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{int}} \right) + \frac{k_s}{3hr_{int}} \frac{r_{int}^3}{r_{ext}^2} \right] = \frac{(T_f - T_\infty) k_s}{\rho L r_{int}^2} t \quad (3.33)$$

Adotando os seguintes parâmetros adimensionais:

$$\tau = \frac{\alpha_s t}{r_{int}^2}; Bi = \frac{hr}{k_s}; Ste = \frac{c_p(T_f - T_\infty)}{L} \quad (3.34)$$

E substituindo na Eq.(3.34), obtém-se:

$$\left[\frac{(1-S(t))^2}{2} - \frac{(1-S(t))^3}{3} + \frac{k_s}{3k_c} (1-S(t))^3 \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{int}} \right) + \frac{1}{3Bi} \frac{(1-S(t))^3}{r_{ext}^2} r_{int}^2 \right] - \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \frac{k_s}{k_c} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{int}} \right) + \frac{1}{3Bi} \frac{r_{int}^3}{r_{ext}^2} \right] = -Ste. \tau \quad (3.35)$$

Reescrevendo a Eq.(3.35) para o tempo adimensionalizado:

$$\tau = \frac{1}{Ste} \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3Bi} \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 \left(1 - (1-S(t))^3 \right) \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) - (1-S(t))^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{1-S(t)}{3} \right) \right] \quad (3.36)$$

Considerando a Eq.(3.36) para uma situação em que a solidificação está se iniciando, $S(t)$ será muito pequeno ($S(t) \ll 1$). Sob estas condições, o último termo da equação se aproxima de $-1/6$, e a equação resulta em:

$$\tau = \frac{1}{Ste} \left(1 - (1-S(t))^3 \right) \left[\frac{1}{3Bi} \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 + \frac{k_s}{3k_c} \left(\frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right) \right] \quad (3.37)$$

$$S(t) = 1 - \left[1 - \frac{\tau Ste}{c1} \right]^{1/3} \quad (3.38)$$

$$\text{Onde: } c1 = \left[\frac{1}{3Bi} \left(\frac{r_{int}}{r_{ext}} \right)^2 + \frac{k_s}{3k_c} \frac{r_{ext} - r_{int}}{r_{ext}} \right] \quad (3.39)$$

3.2.3 Adimensionalização das Equações

A Eq.(3.40) fornece a posição da interface sólido-líquido logo após a formação da primeira lâmina de sólido. Tendo calculado a primeira espessura de material solidificado, dois domínios serão simultâneos enquanto o material de mudança de fase não for completamente solidificado. Com a variação da extensão de cada um desses domínios, serão utilizadas malhas que se ajustem ao tamanho dos domínios para discretizar as equações. Este é o ajuste conhecido como método da malha móvel. Antes de proceder a discretização das equações conforme este esquema, as mesmas serão adimensionalizadas através de parâmetros relacionados nas Eq.(3.34), incluindo estes:

$$x = 1 - \frac{r_f}{r_{int}}; \Theta = \frac{T - T_\infty}{T_f - T_\infty} \quad (3.40)$$

A equação geral da condução de calor adimensionalizada é mostrada a seguir, para a região líquida:

$$\frac{\partial \Theta_l}{\partial \tau} = \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \left[2 \frac{\partial \Theta_l}{\partial x} + \frac{\partial^2 \Theta_l}{\partial x^2} \right], 0 \leq x \leq S(t) \quad (3.41)$$

Identicamente, para a região sólida:

$$\frac{\partial \Theta_s}{\partial \tau} = \frac{2}{1-x} \frac{\partial \Theta_s}{\partial x} + \frac{\partial^2 \Theta_s}{\partial x^2}, S(t) \leq x \leq 1 \quad (3.42)$$

E as condições de contorno:

$$\text{Em } x = S(t), \Theta_l = \Theta_s = 1 \quad (3.43)$$

$$\text{Em } x = 1, \frac{\partial \Theta_s}{\partial x} = \frac{\Theta_{\text{int}}}{\frac{k_s r_{\text{ext}} - r_{\text{int}}}{k_{\text{esf}} r_{\text{ext}}} + \frac{1}{\text{Bi}} \left(\frac{r_{\text{int}}}{r_{\text{ext}}} \right)^2} \quad (3.44)$$

Em que Θ_{int} corresponde à temperatura adimensionalizada na interface entre a superfície interna da cápsula e o material de mudança de fase.

Para o balanço de energia na interface sólido-líquido, a forma adimensional fica:

$$\text{Ste} \frac{\partial \Theta_s}{\partial x} - \text{Ste} \frac{k_l}{k_s} \frac{\partial \Theta_l}{\partial x} = \frac{dS(t)}{d\tau} \quad (3.45)$$

3.2.4 Método da Malha Móvel

Considerando que os domínios são variáveis na região sólida e líquida, o uso de malha móvel, que se ajusta a cada intervalo de tempo, facilita o cálculo numérico, pois a interface sólido-líquido sempre está localizada em um dos nós da malha. Porém, esse método exige uma atenção com o tamanho da malha nos domínios sólidos e líquidos, devendo ser avaliada e calculada continuamente durante o processo. O alongamento e redução das malhas devem ser incluídos nas próprias equações governantes.

$$d\Theta(x, \tau) = \frac{\partial \Theta}{\partial x} dx + \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} d\tau \quad (3.46)$$

Considerando a variação por unidade de tempo, tem-se:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} \quad (3.47)$$

Aplicando isto aos domínios sólido e líquido, resultará em equações modificadas para uso em malhas que se ajustem simultaneamente ao tamanho da variável do domínio.

Região Sólida

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} \quad (3.48)$$

Para um ponto qualquer da malha, pode-se afirmar que:

$$x_i = \frac{i}{N} S(t) \rightarrow \frac{dx_i}{d\tau} = \frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \quad (3.49)$$

Substituindo as Eqs.(3.48) e (3.49) na Eq.(3.42), obtém-se a equação da condução de calor válida para a região sólida contendo implicitamente o efeito do deslocamento da malha.

$$\frac{d\theta_s}{d\tau} = \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial x^2} + \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1-x} \right) \frac{\partial \theta_s}{\partial x} \quad (3.50)$$

Discretizando esta equação:

$$\frac{\theta_{s,i}^{t+1} - \theta_{s,i}^t}{\Delta\tau} = \frac{\theta_{s,i+1}^{t+1} - 2\theta_{s,i}^{t+1} + \theta_{s,i-1}^{t+1}}{\Delta\tau} + \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1-x} \right) \frac{(\theta_{s,i+1}^{t+1} - \theta_{s,i-1}^{t+1})}{2\Delta x} \quad (3.51)$$

Resolvendo:

$$\theta_{s,i}^t = \left[\frac{\Delta\tau}{2\Delta x} \left(\frac{1}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1-x} \right) - \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \right] \theta_{s,i-1}^{t+1} + \left[1 + \frac{2\Delta\tau}{\Delta x^2} \right] \theta_{s,i}^{t+1} - \left[\frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} + \frac{\Delta\tau}{2\Delta x} \left(\frac{1}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1-x} \right) \right] \theta_{s,i+1}^{t+1} \quad (3.52)$$

Fazendo $\Delta x = \frac{S(t)}{N}$:

$$\theta_{s,i}^t = \left[\frac{N}{2S(t)} \left(\frac{1}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1 - \frac{iS(t)}{N}} \right) - \left(\frac{N}{S(t)} \right)^2 \right] \Delta\tau \theta_{s,i-1}^{t+1} + \left[1 + 2\Delta\tau \left(\frac{N}{S(t)} \right)^2 \right] \theta_{s,i}^{t+1} + \left[\frac{N}{2S(t)} \left(\frac{2}{1 - \frac{iS(t)}{N}} - \frac{1}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \left(\frac{N}{S(t)} \right)^2 \right) \right] \Delta\tau \theta_{s,i+1}^{t+1} \quad (3.53)$$

Esta equação é válida para os pontos considerados internos, do ponto 2 ao ponto N, na região sólida. O ponto 1 é determinado através da utilização da condição de contorno Eq.(3.44) e no ponto N+1, a temperatura é conhecida e igual a temperatura de mudança de fase (condição de contorno dada pela Eq. (3.43)), completando o sistema de equações simultâneas a ser resolvido.

Fase Líquida

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial \Theta_1}{\partial x_1} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} \quad (3.54)$$

$$x_{1,i} = \frac{i}{N} S(t) \rightarrow \frac{dx_{1,i}}{d\tau} = \frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \quad (3.55)$$

Então, para a parte líquida, tem-se:

$$\frac{d\Theta_1}{d\tau} = \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial x_1^2} + \left[\frac{\alpha_l}{\alpha_s} \frac{2}{x_{1,i}} - \frac{x_{1,i}}{1-S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\partial \Theta_1}{\partial x_1} \quad (3.56)$$

Discretizando para um ponto qualquer:

$$\frac{\Theta_{1,i}^{t+1} - \Theta_{1,i}^t}{\Delta \tau} = \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \left[\frac{\Theta_{1,i+1}^{t+1} - 2\Theta_{1,i}^{t+1} + \Theta_{1,i-1}^{t+1}}{\Delta x_1^2} \right] + \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \left(\frac{2}{x_{1,i}} - \frac{x_{1,i}}{1-S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right) \left(\frac{\Theta_{1,i+1}^{t+1} - \Theta_{1,i-1}^{t+1}}{2\Delta x_1} \right) \quad (3.57)$$

Resolvendo:

$$\Theta_{1,i}^t = \Theta_{1,i+1}^{t+1} \left[\frac{1}{2\Delta x_1} \frac{x_{1,i}}{1-S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{1}{\Delta x_1^2} - \frac{1}{\Delta x_1 x_{1,i}} \right] \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \Delta \tau + \Theta_{1,i}^{t+1} \left[2 \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \frac{\Delta \tau}{\Delta x_1^2} + 1 \right] + \Theta_{1,i-1}^{t+1} \left[\frac{1}{\Delta x_1 x_{1,i}} - \frac{1}{\Delta x_1} - \frac{1}{2\Delta x_1} \frac{x_{1,i}}{1-S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \Delta \tau \quad (3.58)$$

Fazendo $\Delta x_1 = \frac{1-S(t)}{N}$ e simplificando:

$$\Theta_{1,i}^t = \Theta_{1,i+1}^{t+1} \left[\frac{1}{(i-1)\Delta x_1^2} - \frac{1}{\Delta x_1^2} - \frac{1}{2\Delta x_1} \frac{i-1}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \Delta \tau + \Theta_{1,i}^{t+1} \left[2 \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \frac{\Delta \tau}{\Delta x_1^2} + 1 \right] + \Theta_{1,i-1}^{t+1} \left[\frac{1}{(i-1)\Delta x_1^2} - \frac{1}{\Delta x_1^2} - \frac{1}{2\Delta x_1} \frac{(i-1)}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\alpha_l}{\alpha_s} \Delta \tau \quad (3.59)$$

Esta equação é válida para as temperaturas de 2 até N na região líquida. Para o ponto 1 pode ser utilizada a Eq.(3.16) na forma adimensionalizada, que discretizada resulta na Eq. (3.60). Para o ponto N+1, a temperatura é a temperatura da mudança de fase do MMF que equivale a $\Theta_{N+1} = 1$.

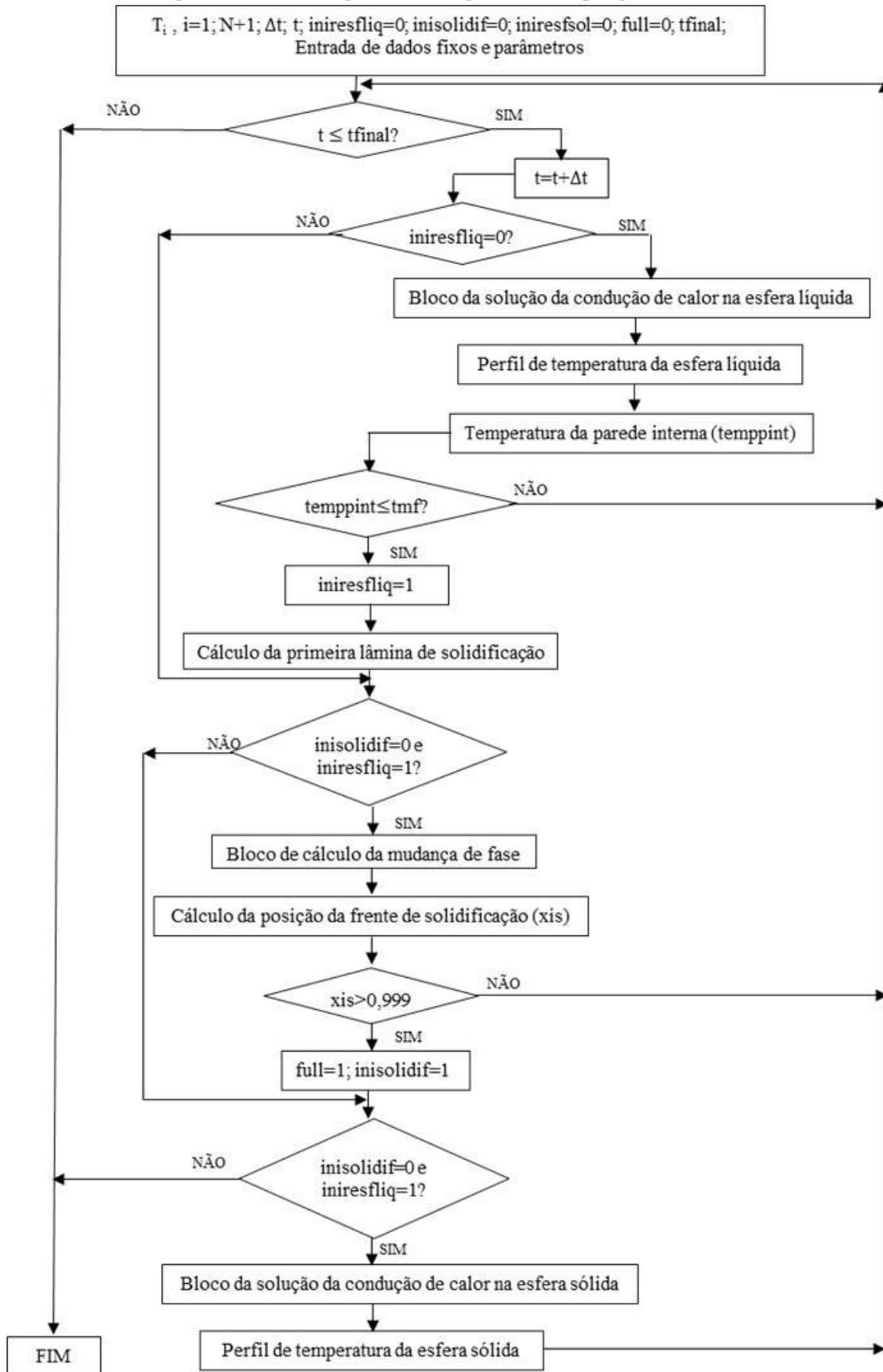
$$\Theta_{1,1}^t = \left(1 + 24 \left(\frac{\alpha_l}{\alpha_s} \right) \frac{\Delta \tau}{\Delta x_1^2} \right) \Theta_{1,1}^{t+1} + \left(1 + 24 \frac{\Delta \tau}{\Delta x_1^2} \right) \Theta_{1,2}^{t+1} \quad (3.60)$$

No presente capítulo, as formulações propostas no modelo matemático foram discretizadas, bem como a abordagem numérica dentro da modularização do problema utilizando uma ferramenta computacional para solucionar o problema físico e apresentar resultados a serem analisados posteriormente.

A fim de encerrar a parte da modelagem do problema, o fluxograma apresentado na Figura 3.6 inicia com a inserção de parâmetros geométricos (diâmetro da esfera, espessura da cápsula) e a propriedade da cápsula esférica, que é a condutividade. Além destes, existem os dados das propriedades termofísicas do material de mudança de fase que são a condutividade, o calor específico e a densidade, todas para os dois estados (líquido e sólido), o calor latente e a temperatura de mudança de fase. Também tem as propriedades termofísicas do fluido externo, que são a densidade, a condutividade, o calor específico e a viscosidade. É necessário informar os parâmetros operacionais que são: a temperatura do fluido externo, a velocidade desse fluido e a temperatura inicial. Por fim, tem-se os parâmetros de simulação (número de nós da malha e o tempo de duração da simulação). Todos estes parâmetros são constantes ao longo do script.

Há também os parâmetros de controle que são: 'iniresfliq', 'inisolidif', 'iniresfsol' e 'full'. Para que o script entre no bloco de cálculo, a condição é que o tempo atual seja menor que o tempo de duração da simulação. Se não for, o programa se encerra. Ao entrar, a variável tempo recebe um acréscimo de Δt . Em seguida, é necessário testar a condição para entrar no bloco de cálculo do resfriamento do material líquido através da variável de controle 'iniresfliq'. O resultado do bloco do resfriamento líquido é um perfil de temperatura a cada instante de tempo. Desse perfil, deve ser observada a temperatura do ponto correspondente à parede interna da cápsula. Com isso, se sua temperatura for menor ou igual que a temperatura de mudança de fase, tem-se a formação da primeira camada de gelo, e isso se reflete no script com a mudança da variável de controle. No próximo instante, o script entrará no bloco de cálculo de mudança de fase. O resultado desse bloco é a posição da frente de solidificação (xis). Se o valor da variável obedecer a condição ($xis > 0,999$), há uma mudança na variável de controle e o programa, no próximo passo de tempo, entrará no bloco de cálculo do resfriamento sólido, tendo como resultado um perfil de temperatura. Os resultados, então, serão gerados até que o tempo de simulação seja atingido.

Figura 3.6 – Fluxograma do algoritmo do programa matlab



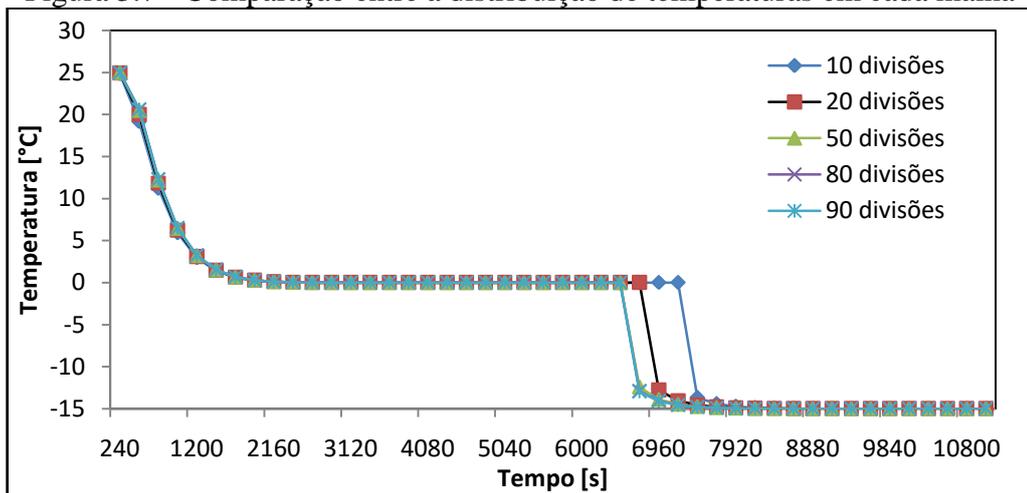
3.3 TESTE DE MALHA

A malha foi testada variando o número de subdivisões do domínio físico de maneira a encontrar qual o tamanho do intervalo entre pontos discretos que não causa alteração nos resultados do problema, isto é, aquelas malhas cujos resultados da simulação não dependem desta. O teste de malha foi realizado considerando o tempo de solidificação completa, o que ocorre quando o centro do material de mudança de fase na cápsula esférica passa da fase líquida para a fase sólida. A margem de erro admissível no valor da diferença entre os tempos de congelamento é de um ponto percentual (0,01 ou 1%). O valor do erro foi calculado de acordo com a Eq.(3.61), em que N e M representam dois tamanhos de malhas sucessivas com N mais refinada do que M.

$$\text{erro}(\%) = \frac{(t_N^{\text{solid}} - t_M^{\text{solid}})}{t_N^{\text{solid}}} * 100 \quad (3.61)$$

No teste de calibração da malha, foi considerada a malha no sentido radial da esfera, partindo da superfície interna até o centro, abrangendo toda a superfície da esfera, vista a partir de um corte longitudinal central. A primeira malha considerada no teste foi constituída por 10 subdivisões. As outras malhas consideradas foram constituídas por 20, 50, 80 e 90 subdivisões. Cada uma das malhas testadas apresenta os resultados mostrados na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Comparação entre a distribuição de temperaturas em cada malha



Na Figura 3.7, que relaciona tempo e temperatura, o nó analisado é o que representa o centro da esfera. A partir deste gráfico, observa-se que as diferenças entre as curvas com as malhas mais espaçadas (10, 20 e 50) são consideráveis, diminuindo esta diferença com o refinamento da malha. Com o intuito de elucidar quantitativamente as diferenças mostradas na Figura 3.7, uma tabela foi construída (Tabela 3.1), mostrando a diferença entre o tempo de

solidificação de cada malha e quanto essa diferença representa, em termos percentuais, do tempo do processo. Como visto na Tab.1, os tempos de solidificação resultante das malhas de 80 e 90 subdivisões são muito parecidos, resultando, praticamente, numa sobreposição das respectivas curvas.

Tabela 3.1 - Teste da malha física considerando o número de subdivisões de 10, 20, 50, 80 e 90

Divisões da Malha	Tempo Solidificação[s]	Diferença [s]	% Tempo Total
10	6496	-	-
20	6123	373	6,092%
50	5900	223	3,780%
80	5844	56	0,958%
90	5834	10	0,171%

A Tabela 3.1 relaciona a forma como o tempo de solidificação varia de acordo com o número de subdivisões da malha, na qual se observa que na malha de 80 subdivisões o erro é de 0,958%, que é o primeiro valor que se adéqua dentro da margem de erro definida. Vale ressaltar que a partir de 80 subdivisões, os valores das diferenças vão diminuindo, atingindo valores desprezíveis quando comparados com o tempo decorrido do processo.

3.4 VALIDAÇÃO DO MODELO

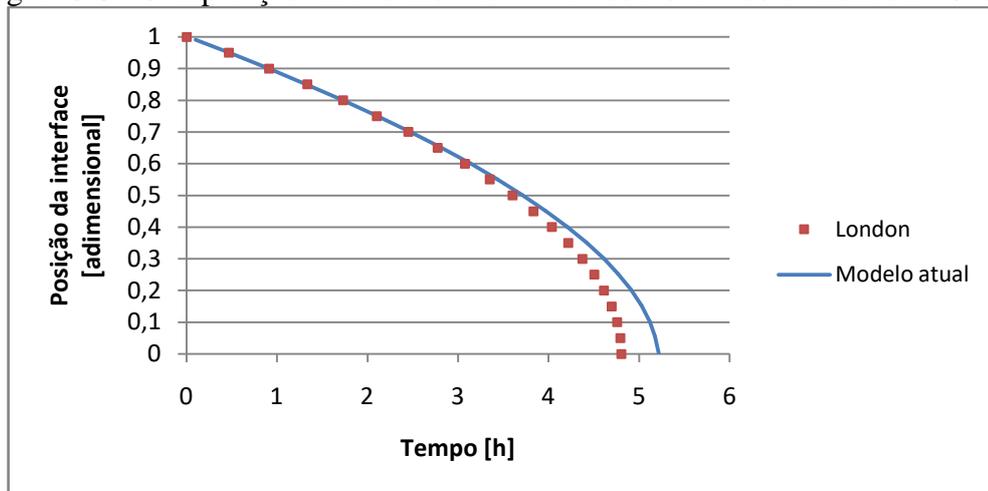
London e Seban (1943) realizaram um estudo de um problema de solidificação em uma esfera considerando que o material de mudança de fase se encontrava inicialmente a temperatura de solidificação. O problema foi resolvido analiticamente usando o método de aproximação de regime quase-permanente com uma condição de contorno convectiva na superfície externa, e obtiveram uma curva que relaciona a posição da interface de solidificação em relação ao tempo decorrido.

Os resultados analíticos de London e Seban (1943) para a posição da interface de solidificação com o tempo foram utilizados para validar o modelo numérico do presente trabalho. Os resultados obtidos com o modelo numérico obedecem às mesmas condições de contorno e inicial da solução analítica, tais sejam: o número de Biot igual a 100; o número de Stefan igual a 0,062; o raio da esfera igual a 5 cm; e a temperatura inicial igual a temperatura de mudança de fase do fluido, aqui, água, 0°C.

A Figura 3.8 mostra de forma comparativa os resultados obtidos. Como pode ser visualizada, a solução obtida a partir do modelo de simulação acompanha os resultados de forma satisfatória, pois as curvas convergem totalmente durante 4 horas e começam a divergir pouco até o fim da simulação, que dura 5h, resultando em um erro médio de 3% entre elas.

Outra comparação realizada para validar o código numérico foi feita entre o modelo atual e os resultados experimentais obtidos por Milón e Braga (2000), que construíram uma bancada de testes com uma meia esfera contendo água no seu interior e sendo resfriada por uma solução composta com 50% de água destilada e 50% de álcool a diferentes temperaturas. A temperatura utilizada para realização da comparação foi a de -15°C . As medições de temperatura foram realizadas com termopares dispostos em diversos pontos em toda a esfera, e o ponto escolhido para fazer a comparação foi o que representa o centro da esfera. O diâmetro da meia esfera do experimento é de 96,94 mm e a espessura da parede de acrílico é de 1,17 mm.

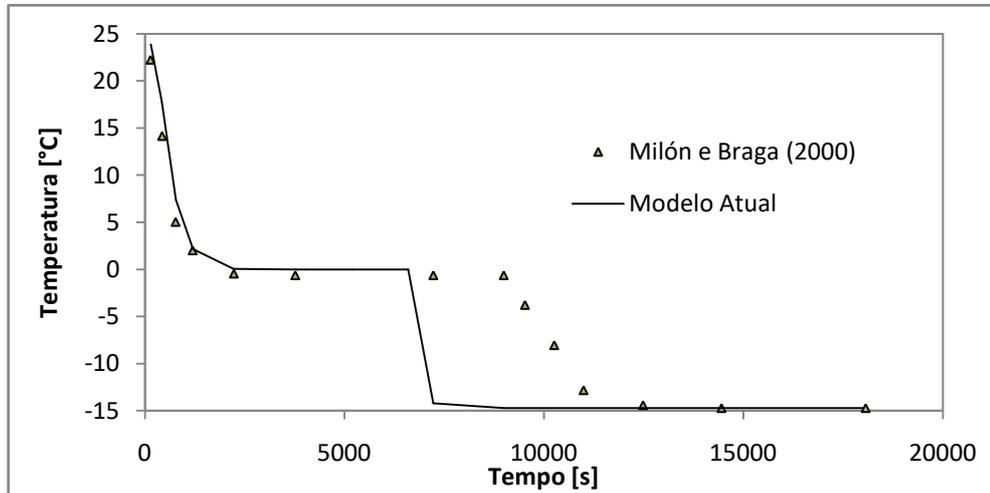
Figura 3.8 - Comparação entre o modelo atual e os resultados de London e Seban



Como se pode ver, os resultados da simulação e os do experimento de Milón e Braga (2000), na Figura 3.9, são completamente convergentes durante todo o processo de resfriamento em que material de mudança está na fase líquida e durante o início do processo de solidificação. Durante o desenvolvimento da solidificação, as curvas passam a divergir, pois, na simulação, a simetria da esfera faz com que o resfriamento ocorra ao longo de todo o perímetro que envolve o ponto central da esfera, já no experimento, por se tratar de uma meia esfera, a simetria deixa de existir, logo, a retirada de calor do centro da esfera existe apenas no lado onde o fluido externo passa e isto deve causar um retardo no tempo de solidificação

completa. Depois, as curvas voltam a convergir na fase que a esfera está completamente resfriada.

Figura 3.9 - Comparação entre o modelo atual e os resultados de Milón e Braga (2000)



4 ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados dos testes de parâmetros obtidos desde o modelo desenvolvido. Nos casos mostrados a seguir, foram realizadas diversas variações nas condições de operação do problema apresentado. Inicialmente, foram testadas as condições com o diâmetro da esfera constante e a temperatura do banho variável. Em seguida, a temperatura do banho constante e o diâmetro da esfera variável. Então, seguiram-se experimentos com um diâmetro da esfera e temperatura do banho, ambos constantes, e variando-se o material de mudança de fase encapsulado na esfera. A Tabela 4.1 mostra a sequência de simulações realizadas.

Tabela 4.1 - Testes dos parâmetros

Diâmetro [mm]	Temperatura do Banho [°C]	Material de Mudança de Fase		Concentrações
		Base Fluida	Nanopartículas	
100	-5	Água	-	-
	-10		-	-
	-15		-	-
	-20		-	-
50	-15	Água	-	-
100			-	-
150			-	-
175			-	-
200			-	-
100	-15	Água	Alumina	1%; 5%; 10%
			Cobre	
			Grafeno	
			Nanotubos de Carbono	
100	-15	Parafina	Alumina	1%; 5%; 10%
			Cobre	
			Grafeno	
			Nanotubos de Carbono	

Para construção das simulações, os valores dos parâmetros foram obtidos de diversas fontes. Os dados dos parâmetros relacionados às duas primeiras simulações foram compilados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Propriedades termofísicas

Material de mudança de fase: ÁGUA	
Condutividade Térmica (líquido)	2,5 W/m.K
Condutividade Térmica (sólido)	2,25 W/m.K
Calor Específico (líquido)	4210 J/kg.K
Calor Específico (sólido)	2040 J/kg.K
Calor Latente	333400 J/kg
Temperatura de mudança de fase	0 °C
Densidade (líquido)	999,8 kg/m ³
Densidade (sólido)	917,8 kg/m ³
Banho isotérmico: ÁLCOOL ETÍLICO	
Condutividade Térmica	0,182 W/m.K
Calor Específico	2411 J/kg.K
Densidade	790 kg/m ³
Viscosidade Cinemática	1,5x10 ⁻⁶ m ² /s
Cápsula esférica: ACRÍLICO	
Condutividade Térmica	0,35 W/m.K

A Tabela 4.3 apresenta as propriedades termofísicas da parafina, alumina, cobre, grafeno e nanotubos de carbono.

Tabela 4.3 - Propriedades termofísicas da parafina, alumina, cobre, grafeno e nanotubos de carbono

	BASE FLUIDA		NANOPARTÍCULA			
	Parafina		Alumina	Cobre	Grafeno	Nanotubo Carbono
	Líquida	Sólida	Sólida	Sólida	Sólido	Sólido
ρ [kg/m ³]	900	760	3970	8800	2200	1600
cp [J/kg.K]	2890	2950	765	420	830	720
k [W/m.K]	0,24	0,21	46	52	4250	3500
Calor latente [J/kg]	165.000		-	-	-	-
Temp. mudança defase [°C]	4,5		-	-	-	-
Fonte	Zalba et al. (2003)	Incropera et al. (2011)	Incropera et al. (2011)	Incropera et al. (2011)	Gao et al. (2016)	Pradham et al. (2009)

Para determinar as propriedades termofísicas dos materiais de mudança de fase com nanopartículas (nanofluidos), foram utilizadas informações obtidas da literatura.

No que diz respeito ao calor específico, Zhou e Ni (2008) realizaram estudos experimentais cujos resultados mostram que a Eq. (4.1) é indicada para avaliar o calor

específico de um nano fluido em função das densidades das nanopartículas e da base fluida e das concentrações.

$$c_p = \frac{(1-\phi)(\rho c_p)_{bf} + \phi(\rho c_p)_{np}}{\rho_{nf}} \quad (4.1)$$

Com relação à massa específica, a equação utilizada foi desenvolvida considerando que o volume do nanofluido é igual a soma dos volume da base fluida e das nanopartículas, desta forma;

$$\forall_{nf} = \forall_{bf} + \forall_{np}$$

Escrevendo em função da densidade e das massas;

$$\frac{m_{nf}}{\rho_{nf}} = \frac{m_{bf}}{\rho_{bf}} + \frac{m_{np}}{\rho_{np}}$$

Resolvendo para a densidade do nanofluido,

$$\rho_{nf} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{bf}} \frac{m_{bf}}{m_{nf}} + \frac{1}{\rho_{np}} \frac{m_{np}}{m_{nf}}}$$

Se ainda for considerado que a soma das massas da base fluida e das nanopartículas representa a massa total de nanofluido e que a concentração da nanopartículas no nanofluido é definida em termos da fração de massas destas,

$$m_{nf} = m_{bf} + m_{np}$$

$$\frac{m_{np}}{m_{nf}} = \phi$$

Então a equação resultante para a densidade é dada pela Eq. (4.2)

$$\rho_{nf} = \frac{1}{\frac{1-\phi}{\rho_{bf}} + \frac{\phi}{\rho_{np}}} \quad (4.2)$$

Quanto à condutividade efetiva, existem várias correlações na literatura para o cálculo desta propriedade, mas após comparar várias delas e detectar que fornecem resultados muito semelhantes, foi adotada a equação tradicional de Maxwell (1881 apud Benito, 2011):

$$\frac{k_{eff,Maxwell}}{k_{bf}} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} \quad (4.3)$$

Ainda sobre a condutividade efetiva, durante o processo, é preciso considerar que o gradiente de temperatura entre a massa de fluido que está mais próxima da parede interna da

cápsula e a massa de fluido que está mais ao centro da cápsula provoca movimentação do fluido devido à variação da sua densidade. Essa movimentação de massa, por sua vez, provoca um aumento da convecção interna, aumentando a condutividade dentro da cápsula. Em trabalhos anteriores, Ismail e Henríquez (2002), utilizaram uma condutividade térmica aparente que levava em consideração efeitos convectivos durante o processo de solidificação de água, e o valor adotado para essa condutividade foi da ordem de 2,5 W/mK, enquanto que a condutividade térmica da água tem um valor de 0,56 W/m.K. A razão entre as duas condutividades fornece um fator de acréscimo de transferência de calor relativo à convecção que é de 4,4643. Esse mesmo fator de convecção está sendo utilizado no presente trabalho.

Considerando as relações e as considerações recém-apresentadas foram calculadas as propriedades termofísicas dos nanofluidos utilizados no estudo. A Tabela 4.4 reúne todas as propriedades de todas as combinações de água e nanopartículas, enquanto que a Tabela 4.5, relaciona as propriedades de todas as combinações que usam a parafina como fluido-base.

Tabela 4.4 - Propriedades dos nanofluidos com água

	Água/Alumina					
	Líquido	Sólido	líquido	Sólido	líquido	Sólido
	1%		5%		10%	
ρ [kg/m ³]	1004,523	927,1227	1035,783	956,7518	1077,706	996,5621
cp [J/kg]	4141,375	2036,842	3972,577	2022,272	3765,414	1999,7
keff	2,57303	1,930455	2,87995	2,141636	3,300451	2,428727
	Água/Cobre					
	Líquido	Sólido	líquido	Sólido	líquido	Sólido
	1%		5%		10%	
ρ [kg/m ³]	1005,92	928,3126	1043,253	963,1216	1094,006	1010,484
cp [J/kg]	4142,174	2041,33	3975,715	2043,107	3769,543	2037,36
keff	2,573338	1,931155	2,881617	2,145404	3,304152	2,437021
	Água/Grafeno					
	Líquido	Sólido	líquido	Sólido	líquido	Sólido
	1%		5%		10%	
ρ [kg/m ³]	1002,482	925,3841	1025,025	947,5655	1054,671	976,834
cp [J/kg]	4137,725	2027,582	3955,196	1977,974	3732,825	1916,109
keff	2,575727	1,936893	2,894573	2,176428	3,332967	2,505744
	Água/Nanotubo Carbono					
	Líquido	Sólido	líquido	Sólido	líquido	Sólido
	1%		5%		10%	
ρ [kg/m ³]	1000,772	923,9267	1016,148	939,9745	1036,046	960,8355
cp [J/kg]	4138,06	2023,485	3956,585	1958,096	3734,876	1877,866
keff	2,575721	1,936877	2,894537	2,176339	3,332889	2,505546

Tabela 4.5 - Propriedades dos nanofluidos com parafina

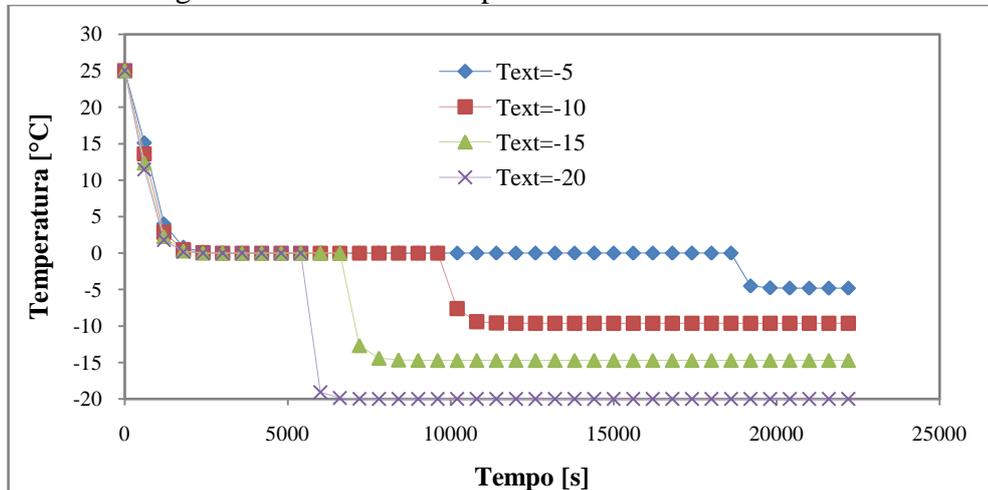
	Parafina/Alumina					
	líquido	Sólido	líquido	Sólido	líquido	sólido
	1%		5%		10%	
ρ [kg/m ³]	907,0139	766,1952	936,1981	792,02	975,43	826,8567
cp [J/kg]	2872,459	2936,524	2801,547	2880,928	2711,22	2410,121
keff	1,235795	0,216276	1,386387	0,242685	1,593127	0,278946
	Parafina/Cobre					
	líquido	Sólido	líquido	Sólido	líquido	sólido
	1%		5%		10%	
ρ [kg/m ³]	908,1527	767,0077	942,2963	796,3801	988,764	836,4182
cp [J/kg]	2876,113	2942,005	2818,381	2906,527	2741,301	2854,314
keff	1,23586	0,216286	1,386739	0,242739	1,593912	0,279066
	Parafina/Grafeno					
	líquido	Sólido	líquido	Sólido	líquido	sólido
	1%		5%		10%	
ρ [kg/m ³]	905,3498	765,0073	927,4005	785,7143	956,5217	813,2296
cp [J/kg]	2864,363	2925,253	2762,83	2826,982	2638,205	2705,755
keff	1,236357	0,216363	1,38944	0,243153	1,599925	0,279988
	Parafina/Nanotubo Carbono					
	líquido	Sólido	líquido	Sólido	líquido	sólido
	1%		5%		10%	
ρ [kg/m ³]	903,9548	764,0111	920,1278	780,4878	941,1765	802,1108
cp [J/kg]	2861,327	2920,246	2748,042	2802,734	2609,606	2659,234
keff	1,236356	0,216362	1,389433	0,243152	1,599909	0,279986

Com base nas Tabelas 4.1 e 4.2, os resultados gerados na simulação são apresentados em forma de gráficos. As curvas representam o perfil de temperatura do nó correspondente ao centro da esfera no tempo decorrido da simulação, em todos os casos apresentados.

Na Figura 4.1 são mostrados os resultados do histórico de temperatura do material de mudança de fase no centro da cápsula esférica para diferentes condições de temperatura externa do fluido de trabalho. Dos resultados, observa-se que uma forte redução do tempo de solidificação se apresenta à medida que a temperatura do banho isotérmico é diminuída. Isto ocorre porque o gradiente de temperatura aumenta quanto menor for a temperatura do banho, potencializando a transmissão de calor ocorrida no processo. Porém, percebe-se que a redução no tempo de congelamento não é diretamente proporcional à redução da temperatura do banho. Os resultados mostram que não é uma vantagem reduzir muito a temperatura do banho

visto que não existe um ganho proporcional no tempo de solidificação. Nestas simulações foi utilizada água pura como material de mudança de fase e servira como elemento de comparação para os estudos com nanofluidos como material de mudança de fase.

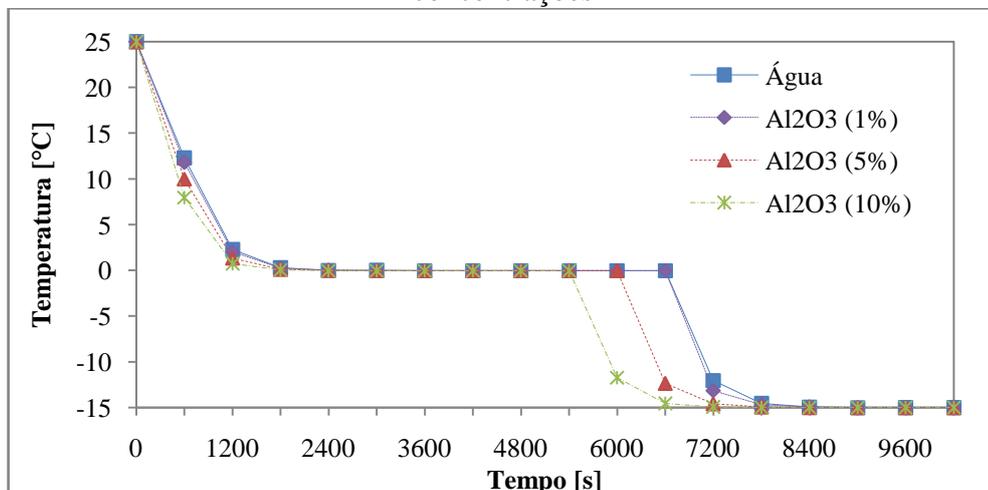
Figura 4.1 - Efeito da temperatura do banho isotérmico



Para os estudos com os nanofluidos foram utilizadas as propriedades apresentadas nas Tabelas 4.4 e 4.5, sendo fixado o diâmetro da cápsula em 100 mm e a temperatura do fluido de trabalho em -15°C .

Inicialmente, foram realizadas as simulações considerando o material de mudança de fase composto por água e as nanopartículas. Para o caso de água com partículas de Alumina foram realizadas simulações para três diferentes concentrações (1%, 5% e 10%) e os resultados são mostrados comparativamente na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Comparação entre a água e o nanofluido com alumina em diferentes concentrações



Ao analisar a Figura 4.2 e a Tabela 4.4, percebe-se que a maior concentração de nanopartículas no fluido base implica em um aumento da condutividade, que por sua vez, resulta numa redução do tempo de congelamento total da esfera. Esta situação de aumento da concentração de nanopartículas se repete com maior ou menor intensidade, dependendo das propriedades termofísicas das nanopartículas. Isto é mais bem ilustrado ao comparar os resultados expostos desde a Figura 4.2 até a Figura 4.5.

Ainda continuando com a análise dos resultados da Figura 4.2, na região do gráfico referente ao resfriamento do líquido, os nanofluidos se comportam muito semelhante à água, porém com uma velocidade de resfriamento ligeiramente maior. Na mudança de fase, as curvas, praticamente, se sobrepõem. A maior diferença ocorre justamente no fim da solidificação, onde cada uma das curvas tem um tempo diferente. Isto se dá devido ao fato de o fluido base ser o mesmo, porém com uma massa a ser solidificada menor a cada aumento da concentração. Outro fato é que as nanopartículas testadas possuem uma condutividade superior ao fluido base, aumentando a difusividade térmica do nanofluidos. Mesmo que, à medida que se aumenta a concentração de nanopartículas, também há aumento nos valores de calor específico e densidade, o ganho no valor da condutividade é suficientemente grande para que a difusividade seja cada vez maior. Vale ressaltar que as nanopartículas fornecem ganhos maiores para o estado líquido, em termos de difusividade. Como durante a solidificação há a presença de nanofluido líquido até o final do processo, o que resulta em tempos menores de solidificação.

O nanofluido composto com nanopartículas de cobre (Figura 4.3) tem um desempenho inferior com relação à nanopartículas de alumina, principalmente devido à densidade. Mesmo que a condutividade seja maior com relação à alumina, a densidade do cobre é duas vezes maior. Como a difusividade é inversamente proporcional à densidade, logo quanto maior a densidade menor a difusividade. Isso resulta num tempo de solidificação maior para os nanofluidos com cobre.

Nas Figuras 4.4 e Figuras 4.5, compara-se os nanofluidos com grafeno e com nanotubos de carbono, respectivamente. Embora a densidade e o calor específico do grafeno sejam maiores que do nanotubo de carbono, sua condutividade também superior garante uma difusividade ligeiramente menor que a do nanotubo de carbono. Isso se reflete num tempo de solidificação menor do nanofluido com nanotubo de carbono.

Figura 4.3 - Comparação entre a água e o nanofluido com cobre em diferentes concentrações

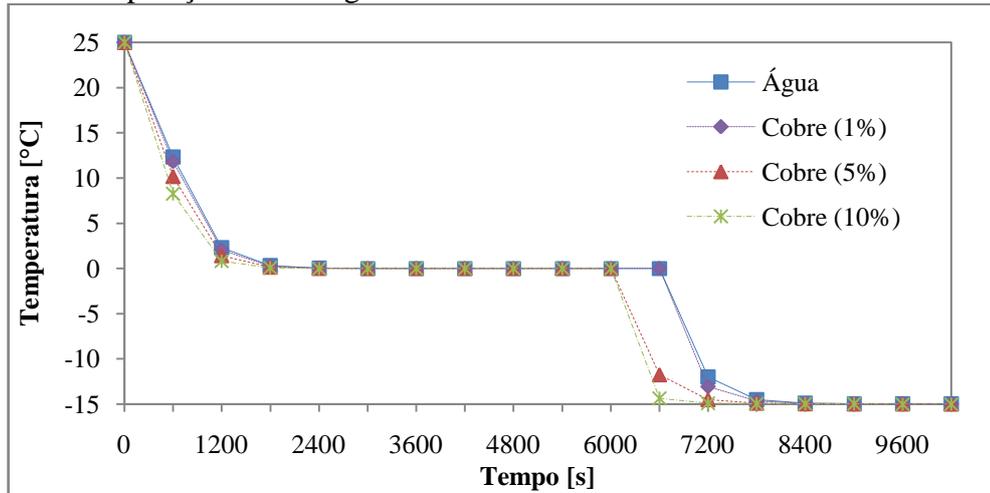


Figura 4.4 - Comparação entre a água e o nanofluido com grafeno em diferentes concentrações

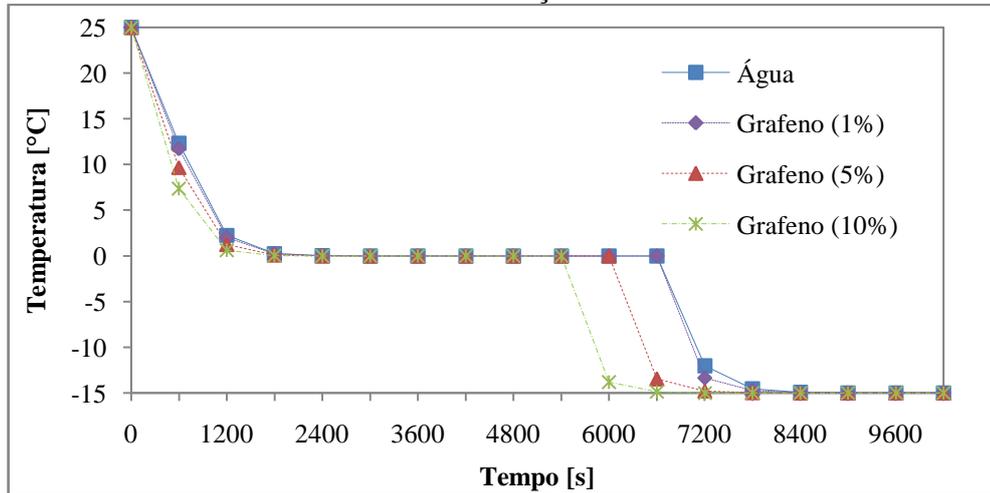
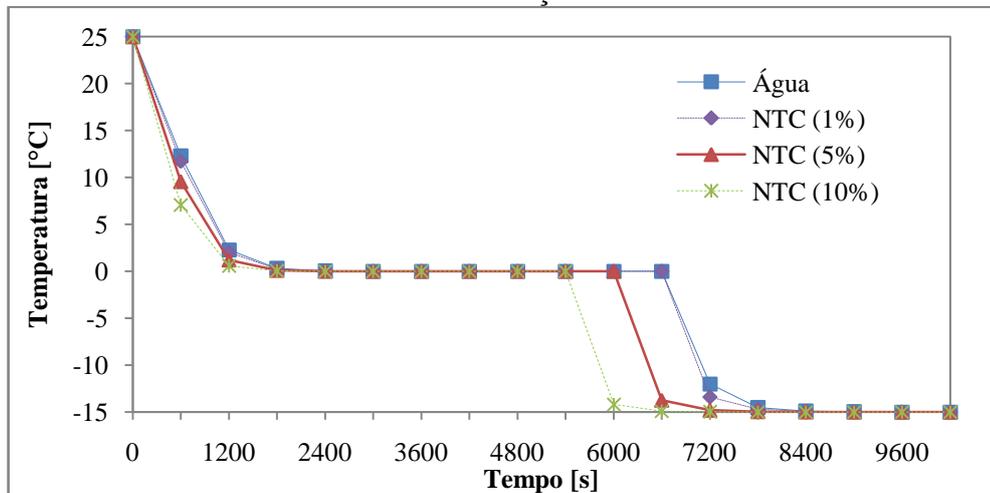


Figura 4.5 - Comparação entre a água e o nanofluido com nanotubos de carbono em diferentes concentrações



O comportamento de cada um dos nanofluidos é analisado na Figura 4.6. Nela pode-se ver que as nanopartículas que fornecem maior redução no tempo de solidificação da esfera são o grafeno a 10% e os nanotubos de carbono, também a 10%. Na Figura 4.7 são mostrados os tempos de solidificação completa para os diversos nanofluidos recém-analisados considerando a base fluida sendo água e concentrações de 1% e 10% sobre esta base fluida. Observa-se nesta figura que os menores tempos de solidificação acontecem para as maiores concentrações de nanopartículas e, em particular, esta redução de tempo é maior para os nanotubos de carbono e para o grafeno. Assim, a diferença entre o tempo de solidificação do nanofluido com nanotubos de carbono com 1% e o com 10%, é de 1363 segundos como pode ser observado na Figura 4.7.

Figura 4.6- Comparação entre as nanopartículas com a concentração de 10%

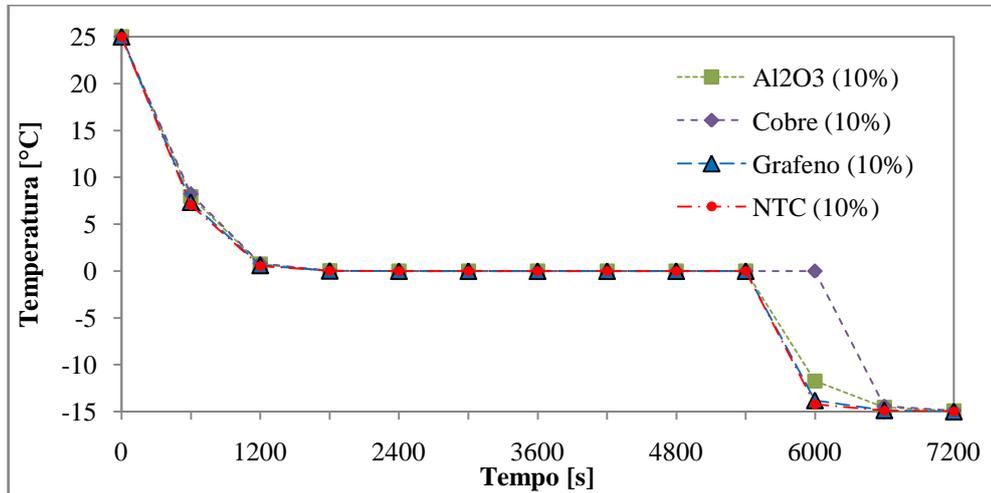
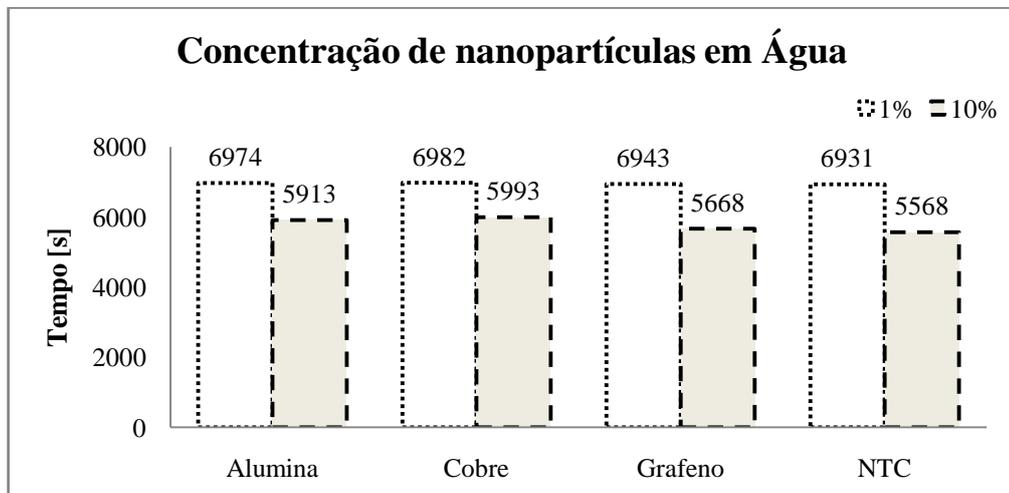


Figura 4.7 - Comparação dos tempos de solidificação total



Com relação à parafina e usando o mesmo diâmetro da esfera e a mesma temperatura do fluido de trabalho, embora ela apresente um valor do calor específico menor que o da água e a sua condutividade ser bem menor que a da água, os ganhos no tempo de solidificação são bem mais destacados quando as nanopartículas são aplicadas, como pode ser analisado desde a Figura 4.8 até a Figura 4.11. Os resultados mostrados na Figura 4.8 para o nanofluido a base de alumina e parafina considerando diferentes concentrações de nanopartículas mostra a redução do tempo de solidificação completa com o acréscimo da concentração, isto já havia sido observado nas simulações com nanofluidos a base de água. As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram resultados semelhantes para os casos de nanofluidos com parafina/cobre, parafina/grafeno e parafina/nanotubos de carbono, respectivamente. O efeito da redução no tempo da solidificação ocorre por conta da presença das nanopartículas que melhoram a condutividade térmica do nanofluido e, conseqüentemente, a sua difusividade térmica. Uma concentração de 10% de alumina na base parafina reduz o tempo de solidificação em aproximadamente 4800 segundos o que representa uma redução percentual de tempo de 28% em relação aos tempos de solidificação alcançados com a parafina sem nanopartículas. Numa comparação direta com os resultados apresentados na Figura 4.2 que corresponde à simulações com água e alumina, observa-se que a redução no tempo para a mesma concentração de nanopartículas é da ordem de 18%. Isto indica que o efeito da presença de nanopartículas pode ser mais vantajoso no caso da base parafina que a base água nestas condições de simulação.

Figura 4.8- Comparação entre a parafina e o nanofluido com alumina em diferentes concentrações

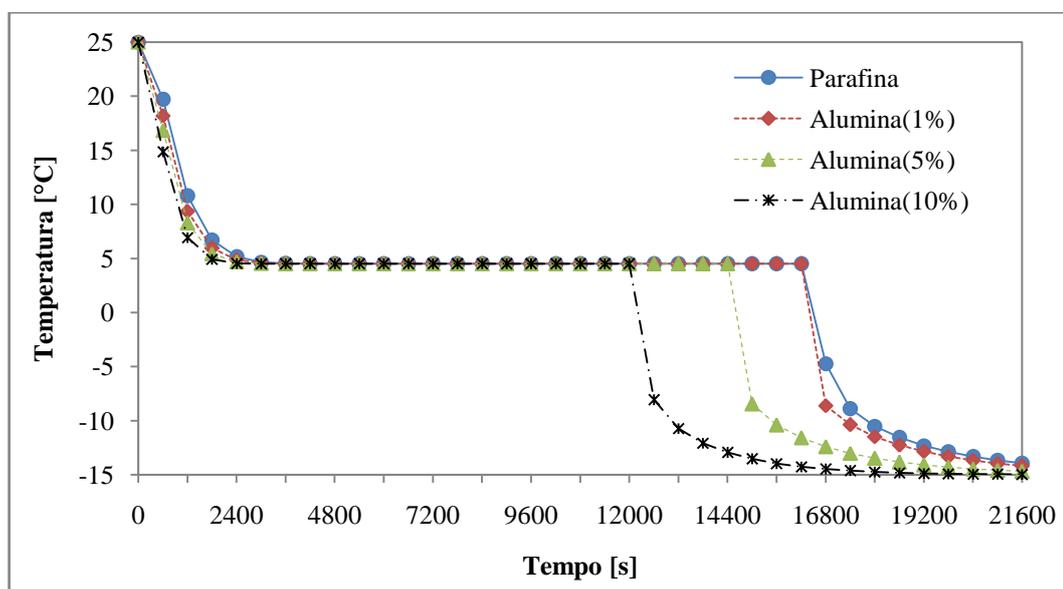


Figura 4.9 - Comparação entre a parafina e o nanofluido com cobre em diferentes concentrações

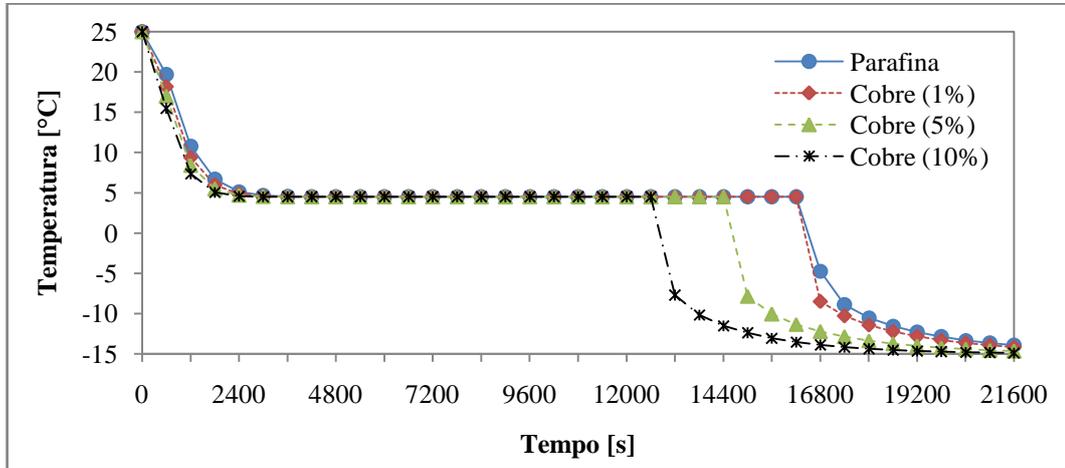


Figura 4.10 - Comparação entre a parafina e o nanofluido com grafeno em diferentes concentrações

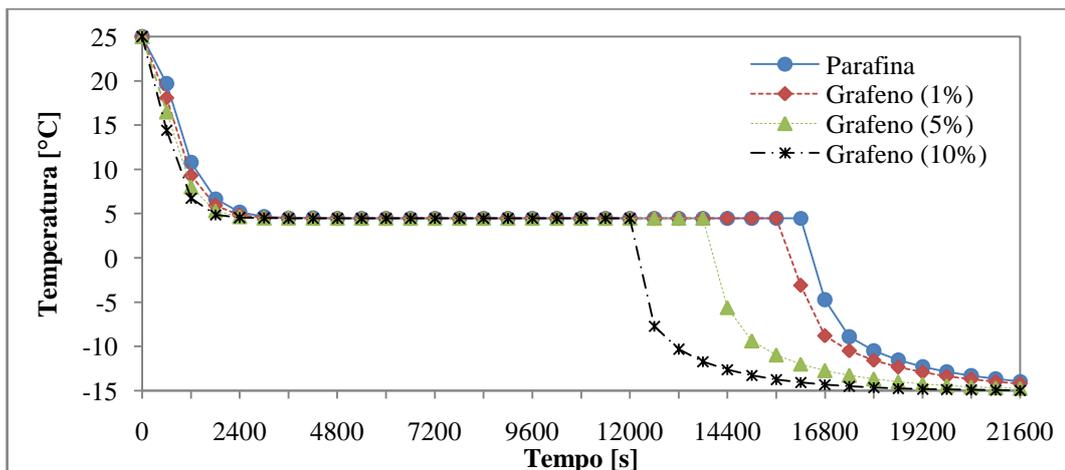
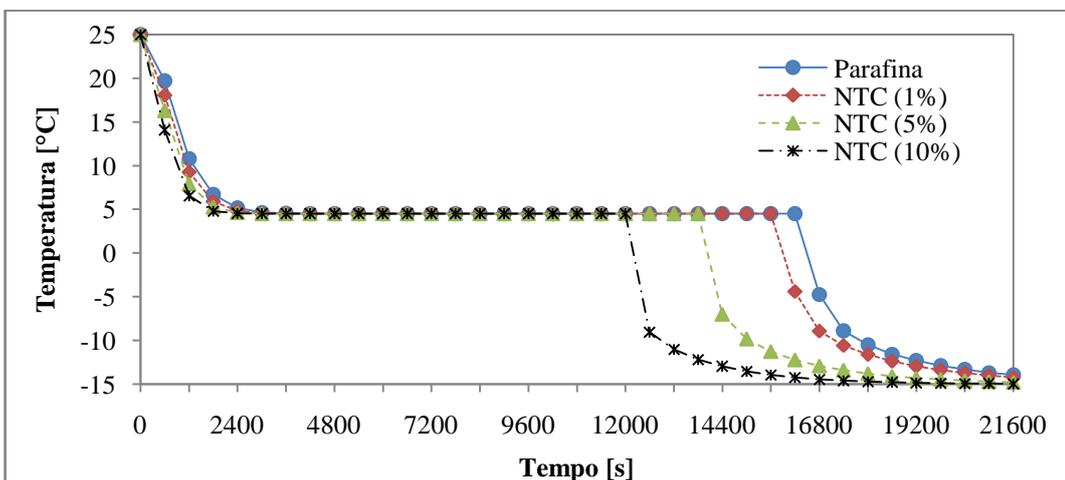


Figura 4.11 - Comparação entre a parafina e o nanofluido com nanotubos de carbono em diferentes concentrações



A Figura 4.12 mostra, de forma resumida e comparativa, os tempos de solidificação completa para cada um dos casos estudados considerando a parafina como fluido base e concentrações de nanopartículas de 1% e 10%. Para o caso de 1% de concentração, o uso de nanopartículas de alumina apresenta uma vantagem relativa nos tempos de solidificação, embora esta vantagem seja pequena. Já no caso de 10% de concentração a menor redução no tempo de solidificação é alcançado com o nanofluido parafina/nanotubos de carbono e o maior tempo é para o caso parafina/cobre, como também pode ser observado na Figura 4.13.

Figura 4.12 - Comparação dos tempos de solidificação total

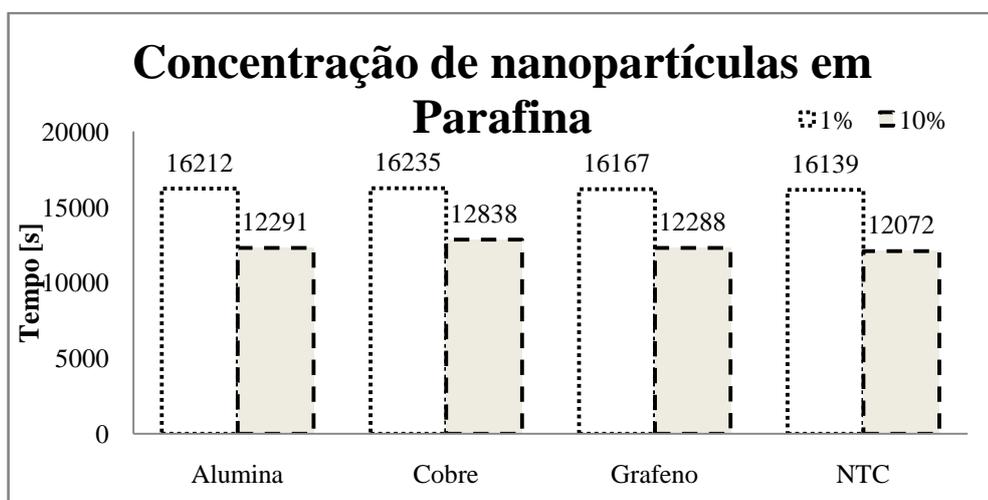
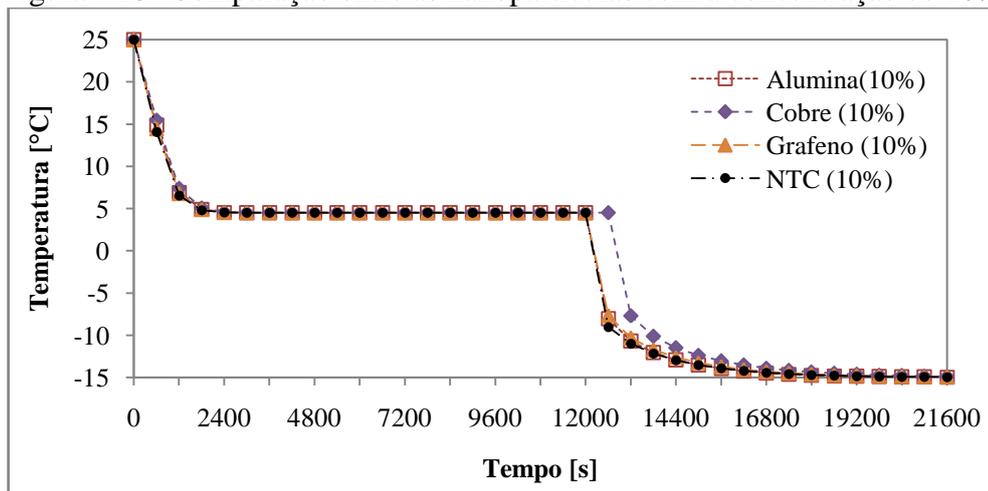


Figura 4.13- Comparação entre as nanopartículas com a concentração de 10%



Os comportamentos dos nanofluidos também foram visualizados sobre a forma de como o perfil de temperatura varia com o passar do tempo. Das Figuras 4.14 até a Figura 4.18, foram colocados no gráfico os perfis de temperatura após os intervalos de 3, 9, 24, 60 e 90 minutos, todos com o nanofluido contendo 10% da fração de massa de nanopartículas e o

fluido base foi a água. Como já mencionado, podendo ser confirmado ao analisar a Figura 4.14 até a Figura 4.19, a inclusão de nanopartículas provoca uma aceleração no deslocamento da frente de solidificação, reduzindo o tempo de solidificação total. Nos gráficos, pode-se ver claramente o ganho, ao analisar a localização da frente de solidificação: depois de 90 minutos de início do processo, o nanofluido com alumina (Figura 4.15) ainda precisa congelar 0,01m para concluir a solidificação; enquanto que o nanofluido com nanotubos de carbono (Figura 4.18) tem apenas 0,006m para finalizar o processo.

Figura 4.14 - Perfis de temperatura da água variando com o tempo

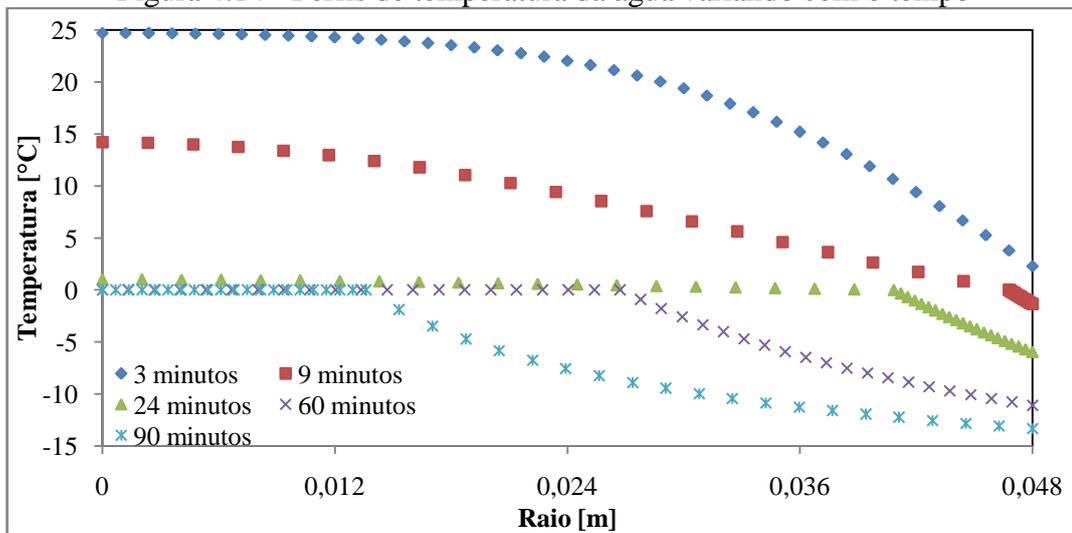


Figura 4.15 - Perfis de temperatura da água com alumina a 10% variando com o tempo

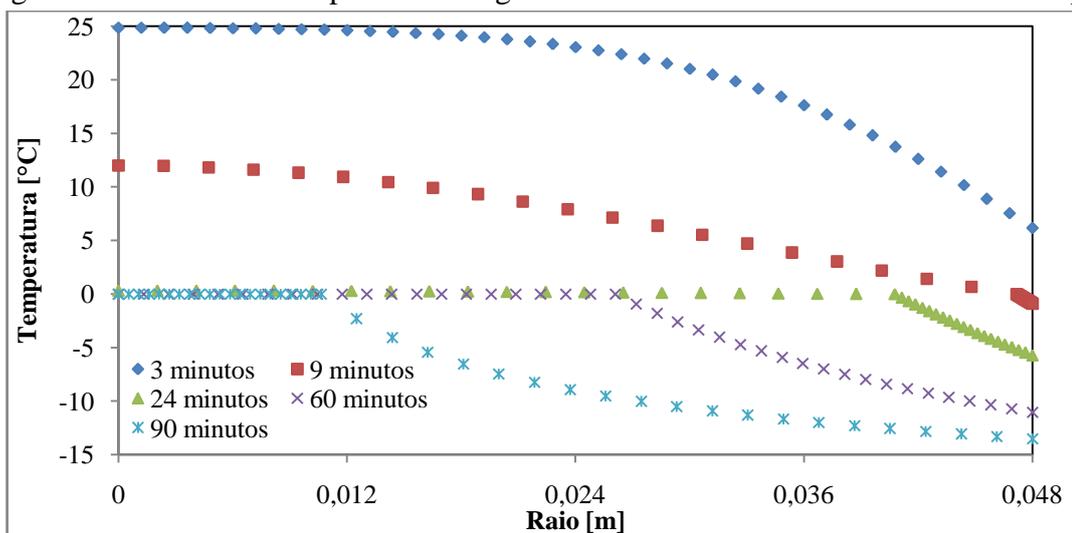


Figura 4.16 - Perfis de temperatura da água com cobre a 10% variando com o tempo

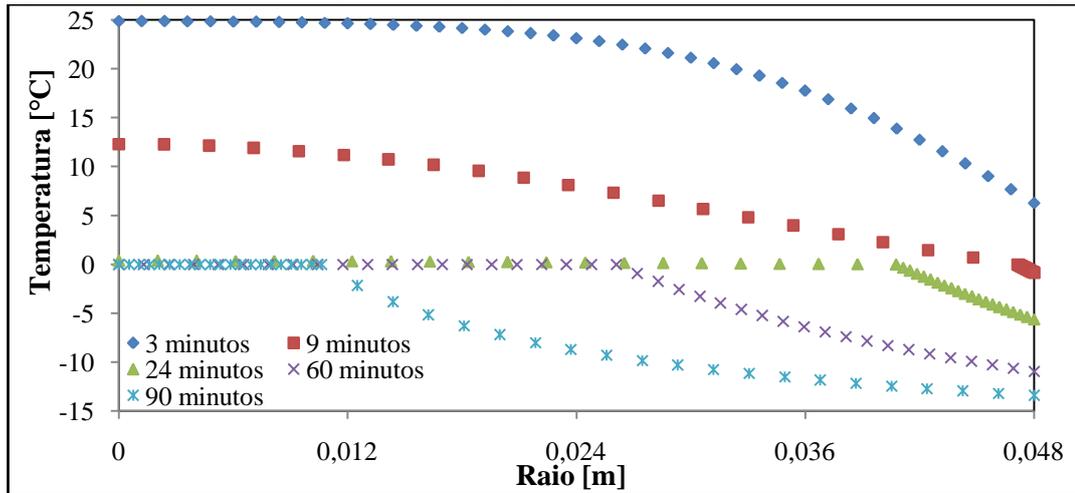


Figura 4.17 - Perfis de temperatura da água com grafeno a 10% variando com o tempo

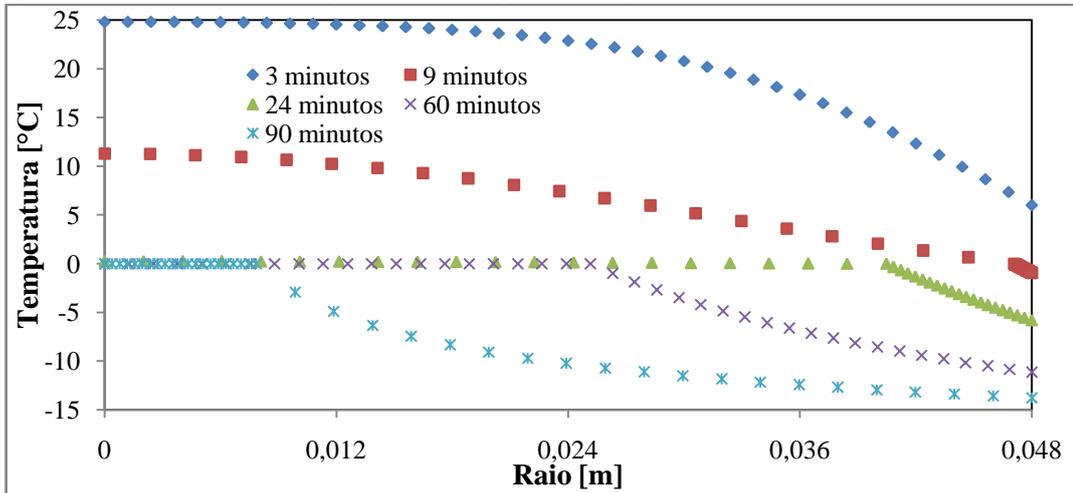
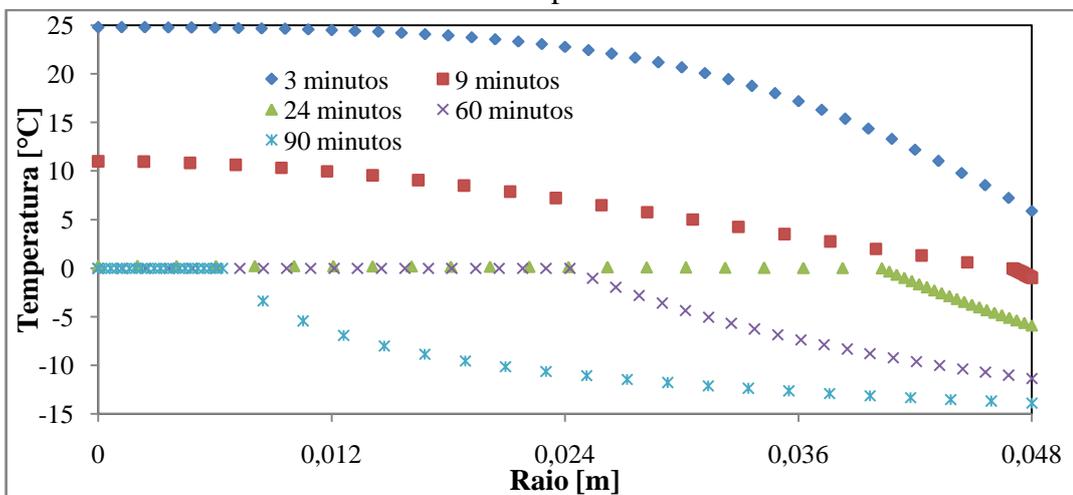
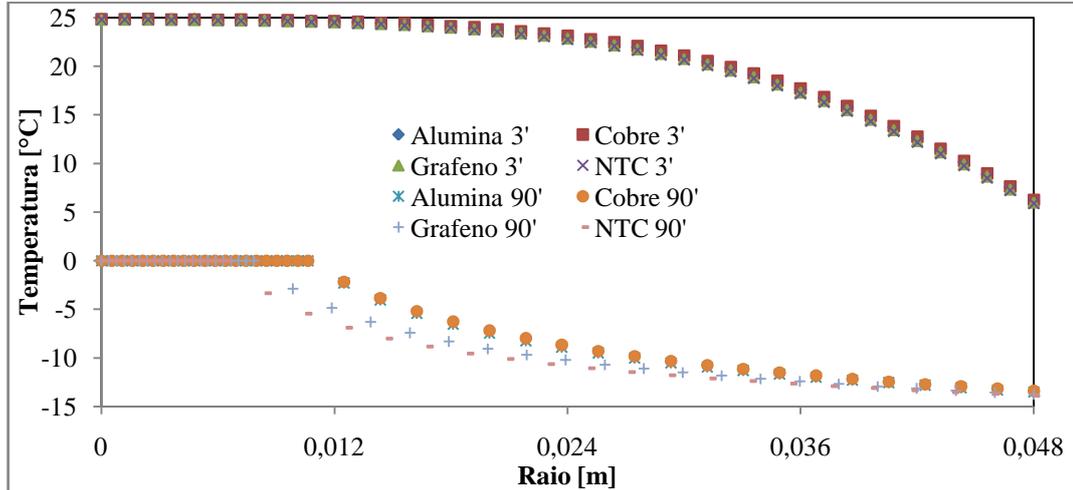


Figura 4.18 - Perfis de temperatura da água com nanotubos de carbono a 10% variando com o tempo



As comparações entre os nanofluidos (Figura 4.19) foram feitas, também, com as propriedades e parâmetros operacionais mantidos constantes. A análise dos nanofluidos individuais se reflete com mais destaque aqui, pois foram escolhidos os que contêm as maiores concentrações, onde o nanotubo de carbono apresenta o melhor resultado no tempo de solidificação.

Figura 4.19 - Comparação entre os perfis de temperatura das nanopartículas com água



Da Figura 4.20 a Figura 4.24 foram colocados no gráfico, os perfis de temperatura após os intervalos de 5, 30, 60, 120 e 180 minutos, todos com o nanofluido contendo 10% da fração de massa de nanopartículas e o fluido base foi a parafina. Nos gráficos, pode-se ver uma ligeira vantagem ao analisar a localização da frente de solidificação, na qual o nanofluido parafina/nanotubos de carbono se desprende levemente dos demais nanofluidos na curva que representa 180 minutos.

Figura 4.20 - Perfis de temperatura da parafina com alumina a 10% variando com o tempo

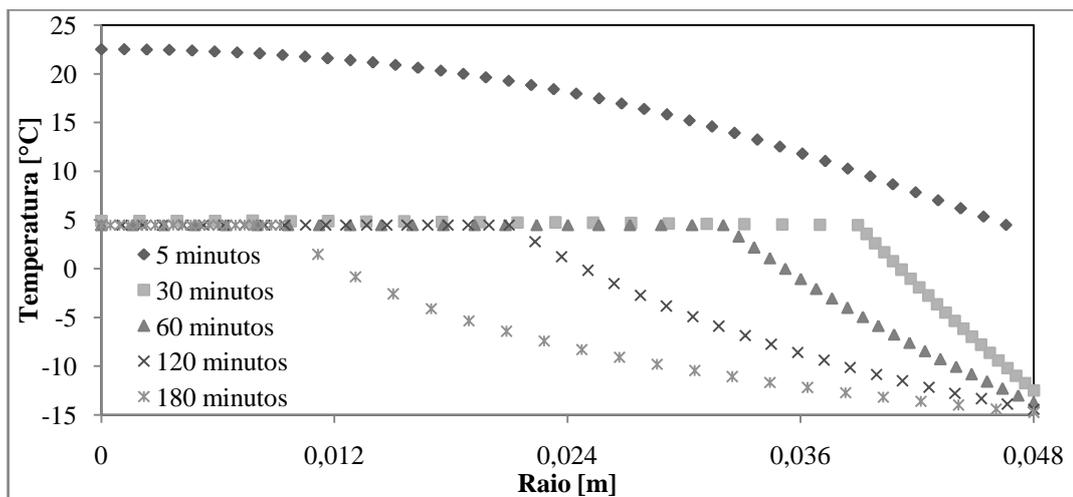


Figura 4.21 - Perfis de temperatura da parafina com cobre a 10% variando com o tempo

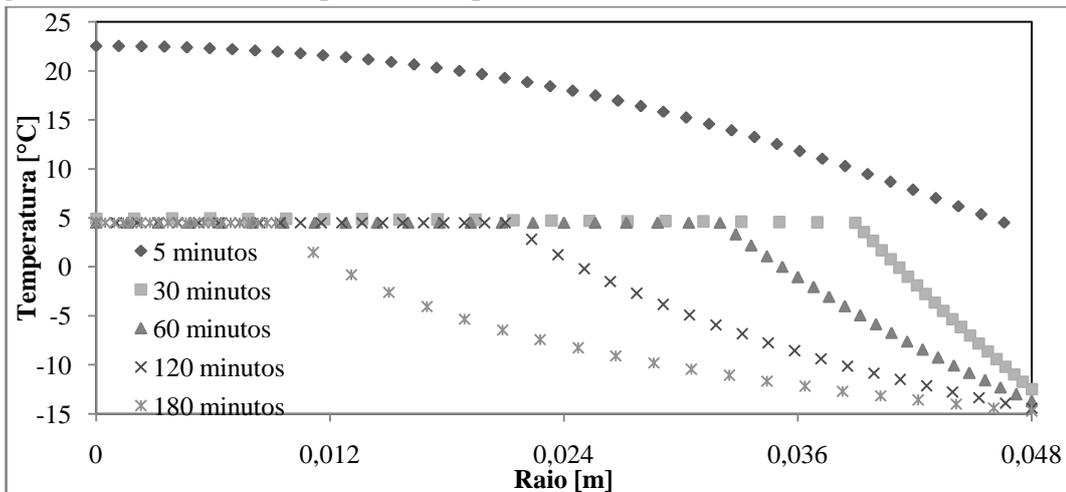


Figura 4.22 - Perfis de temperatura da parafina com grafeno a 10% variando com o tempo

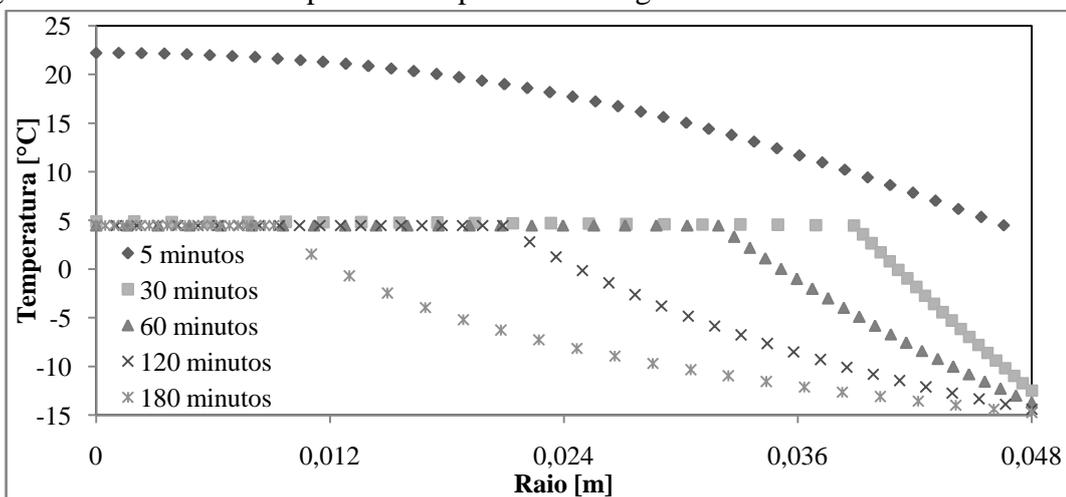


Figura 4.23 - Perfis de temperatura da parafina com nanotubos de carbono a 10% variando com o tempo

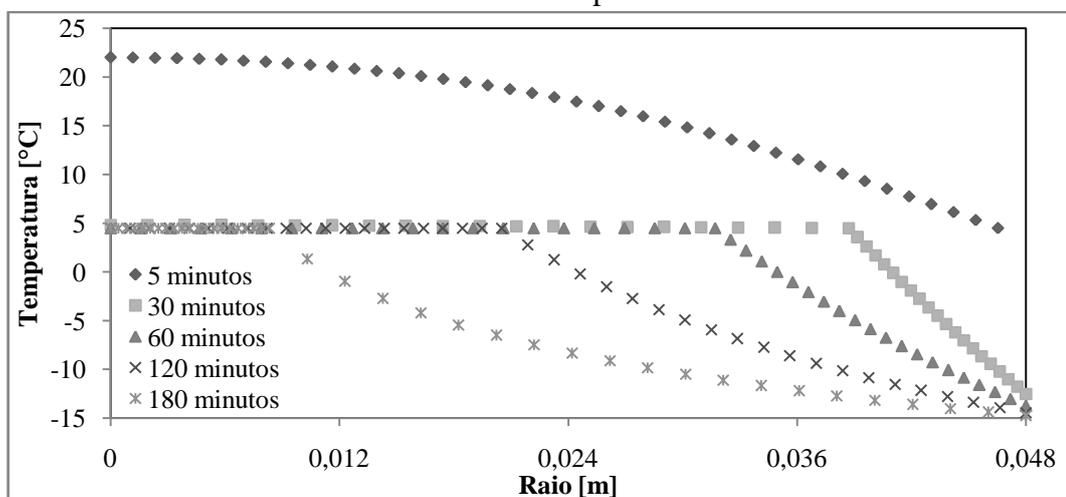
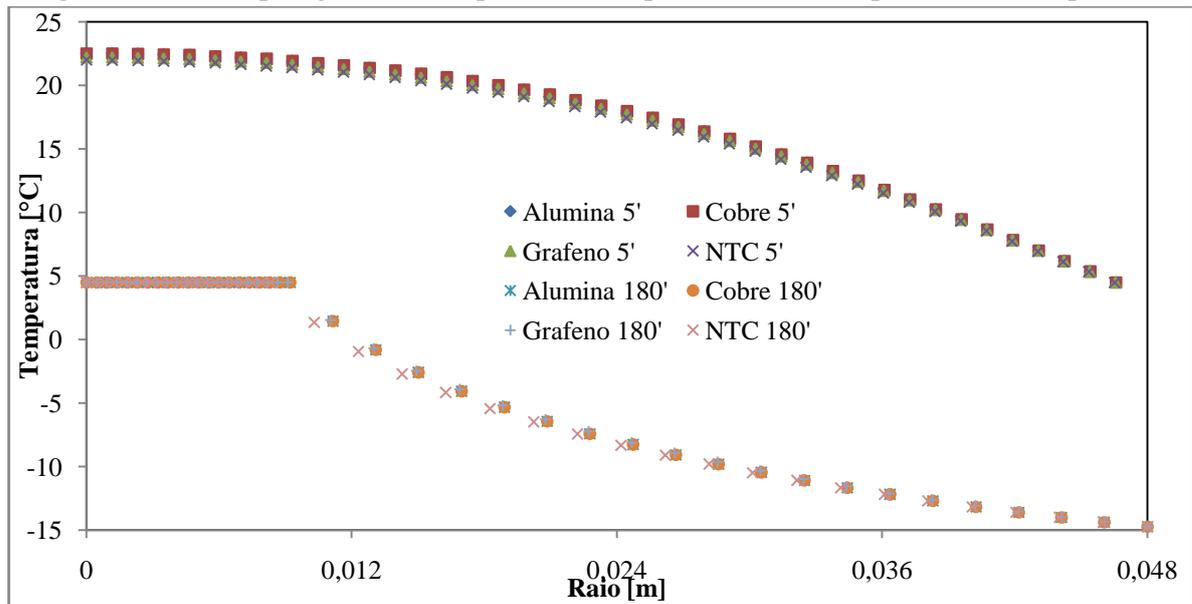


Figura 4.24- Comparação entre os perfis de temperatura das nanopartículas com parafina



Os nanofluidos com parafina como base fluida têm resultados melhores quando utilizam nanotubos de carbono. Porém, os resultados são praticamente iguais quando comparados com o grafeno, observando-se a Figura 4.24.

A partir dos resultados apresentados, quando o nanofluido utiliza água como fluido base, o melhor resultado é alcançado com nanotubos de carbono. Mesmo ao utilizar parafina como fluido base, o melhor desempenho entre as nanopartículas testadas é atingido também com os nanotubos de carbono.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O estudo da influência dos parâmetros utilizando o perfil de temperatura no centro da esfera permitiu analisar que o processo de mudança de fase – isto é, o perfil de temperatura no tempo, em qualquer ponto do domínio do material de mudança de fase no interior da cápsula esférica, apresenta um comportamento de queda decorrente do resfriamento e um comportamento em que a temperatura permanece constante, resultado do processo de mudança de fase.

Conclui-se que a redução da temperatura do banho não é uma vantagem, tendo em vista que a redução no tempo de congelamento não é proporcional.

Com relação ao processo de solidificação dos nanofluidos, quando o fluido-base utilizado foi água, a combinação que ofereceu o menor tempo de solidificação total foi água com nanotubos de carbono em concentração de 10%. Quando o fluido-base foi parafina, o menor tempo foi fornecido pela combinação entre parafina e nanotubos de carbono em concentração a 10%.

Nas curvas de perfil de temperatura em função do raio da esfera, pôde-se observar que a concentração de nanopartículas também não é proporcional à difusividade do nanofluido, o que permite concluir que não é vantajoso o aumento indefinido desta concentração.

Esta conclusão também é válida para analisar o tempo de solidificação, pois a redução do tempo não acompanha a evolução da difusividade. Além disso, conclui-se que o desempenho do nanotubo de carbono é, praticamente, igual ao do grafeno quando o fluido base é água. Isto não ocorre quando se usa parafina.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Quanto aos trabalhos futuros, pode-se fazer uma análise de aplicação dos nanofluidos em termoacumuladores do tipo leito, modelando-se uma interação do escoamento em um leito poroso.

Além disto, também pode pensar em fazer uma simulação do processo de mudança de fase que considere os efeitos da convecção na fase fluida e uma abordagem bidimensional ou tridimensional seria interessante para verificar o quanto os resultados são afetados.

Um estudo sobre a quantidade de energia armazenada por esfera também pode ser feito, considerando o tempo de operação utilizando termoacumuladores do tipo leito para seu carregamento total e um estudo com foco no dimensionamento de um sistema de termoacumulação que utilize nanofluidos como material de mudança de fase.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTOHAMY, A. A., ABDRABBO, M. F., SAKR, R. **Effect of water based Al_2O_3 nanoparticle PCM on cool storage performance.** Appl. Therm. Engineering. Vol. 84, pp. 331-338, 2015.
- ANGAYARKANNI, S.A., PHILIP J. **Review on thermal properties of nanofluids: Recent developments.** Adv Colloid Interface Sci, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2015.08.014>, 2015.
- BABY, T.T., RAMAPRABU, S. **Enhanced conductive heat transfer using graphene dispersed nanofluids.** Nano. Res. Lett. Vol. 6 (1), pp. 289, 2011.
- BEDECARRATS, J.P., STRUB, F., FALCON, B., DUMAS, J.P. **Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant.** Int. Journal of Refrigeration. Vol.19(3), pp.187-196, 1996.
- BENITO, Y. R. **Aplicação de nanofluidos em sistemas secundários de refrigeração.** 2012. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- CHERALATHAN, M., VELRAJ, R., RENGANARAYANAN, S. **Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM based cool thermal energy storage system.** Int. J. Energ. Res. Vol. 31 (14), pp. 1398–1413, 2007.
- ELGAFY, A., LAFDI, K. **Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials.** Carbon .Vol. 43, pp. 3067–74, 2005.
- FAN, L.W., KHODADADI, J.M. **An experimental investigation of enhanced thermal conductivity and expedited unidirectional freezing of cyclohexane-based nanoparticle suspensions utilized as nano-enhanced phase change materials (NePCM).** Int. J. Therm. Sci. Vol. 62, pp.120-6, 2012.
- GAO X., YUE, H., GUO, E., ZHANG, H., LIN, X., YAO, L., WANG, B. **Mechanical properties and thermal conductivity of graphene reinforced copper matrix composites.** Powder Technol. Vol. 301, pp. 601-607, 2016.
- HARIKRISHNAN, S., KALAISELVAM, S. **Preparation and thermal characteristics of CuO–oleic acid nanofluids as a phase change material.** ThermochimActa.Vol. 533, pp. 46–55, 2012.
- HE, Q., WANG, S., TONG, M., LIU, Y. **Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material in low temperature cool storage.** Energ.Convers. Manage. Vol. 64, pp. 199–205, 2012.
- HEITZ, W.L., WESTWATER, J.W. **Extension of numerical method for melting and freezing problems.** International Journal Heat Mass Transfer. Vol.13, pp.1371-1375, 1970.
- HWANG, Y., LEE J.K., LEE, C.H.,JUNG, Y.M., CHEONG, S.I., LEE, C.G. **Metal Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids.** ThermochimActa. Vol. 455(1-2), pp.70–74, 2007.

INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., LAVINE, A.S., DEWITT, D.P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 7^a Ed. New York: Ed. John Wiley and Sons, 2011.

ISMAIL, K.A.R., HENRÍQUEZ, J.R. **Solidificação de Água no Interior de Uma Cápsula Esférica**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa, Brasil, 2002.

JOURABIAN, M., FARHADI, M., DARZI, A.A.R. **Outward melting of ice enhanced by Cu nanoparticles inside cylindrical horizontal annulus: Lattice Boltzmann approach**. Appl. Math. Model. Vol. 37, pp. 8813–8825, 2013.

KEBLINSKI P, PHILLPOT S.R., CHOI S.U.S., EASTMAN J.A. **Mechanism of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)**. Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 45, pp. 855–63, 2002.

KHODADADI, J.M., HOSSEINIZADEH, S.F. **Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage**. Int. Commun. Heat Mass Transfer. Vol. 34 (5), pp. 534–543, 2007.

KUMARESAN, V., VELRAJ, R., DAS, S.K. **The effect of carbon nanotubes in enhancing the thermal transport properties of PCM during solidification**. Heat Mass Transfer. Vol. 48 (8), pp. 1345–1355, 2012.

KUMARESAN, V., CHANDRASEKARAN, P., NANDA, M., MAINI, A.K., VELRAJ, R. **Role of PCM based nanofluids for energy efficient cool thermal storage system**. Int. J. Refrigeration. Vol. 36, pp. 1641–1647, 2013.

LI, G., HWANG, Y., RADERMACHER, R. **Review of cold storage materials for air conditioning application**. Int. J. Refrigeration. Vol. 35 (8), pp. 2053–2077, 2012.

LI, G., HWANG, Y., RADERMACHER, R., CHUN, H. **Review of cold storage materials for subzero applications**. Energy. Vol. 51, pp. 1–17, 2013.

LIU, Y.D., ZHOU, Y.G., TONG, M.W., ZHOU, X.S. **Experimental study of thermal conductivity and phase change performance of nanofluids PCMs**. Microfluid Nanofluid. Vol. 7(4), pp. 579–584, 2009.

LIU, Y., LI X., HU, P., HU, G. **Study on the supercooling degree and nucleation behavior of water-based graphene oxide nanofluids PCM**. Int. J. Refrigeration. Vol. 50, pp. 80–86, 2015.

LONDON, A.L., SEBAN, R.A. **Rate of ice formation**. Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. Vol. 43, pp. 771–778, 1943.

MACDEVETTE, M.M., MYERS, T.G. **Nanofluids: An innovative phase change material for cold storage systems?** Int. J. Heat Mass Tran. Vol. 92, pp. 550–557, 2016.

MARIMON, M.A., ARIAS, J., LUNDQVIST, P., BRUNO, J.C., CORONAS, A. **Integration of trigeneration in an indirect cascade refrigeration system in supermarkets**. Energ. Buildings. Vol. 43, pp. 1427–1434, 2011.

MEHRALI, M., LATIBARI, S.T., MEHRALI, M., METSELAAR, H.S., et al., **Shape-stabilized phase change materials with high thermal conductivity based on paraffin/graphene oxide composite**. *Energ.Convers.Manage.* Vol. 67, pp.275–282, 2013.

MILÓN, J.J., BRAGA, S.L. **Termoacumulação com Gelo em Esferas**, Mercofrio – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilaçãodo Mercosul. Porto Alegre, Rio Grande doSul, Brasil, 2000.

MURRAY, W.D., LANDIS, F. **Numerical and Machine Solutions of Transient Heat Conduction Problems Involving Melting or Freezing**. *International Journal of Heat Transfer*, pp. 108-112, 1959.

ORO, E., MIRO, L., FARID, M.M., CABEZA, L.F. **Thermal analysis of a low temperature storage unit using phase change materials without refrigeration system**. *Int. J. Refrigeration*. Vol. 35 (6), pp. 1709–1714, 2012.

PRADHAM, N. R., DUAN, H., LIANG, J., IANNACCHIONE, G. S. **The specific heat and effective thermal conductivity of composites containing single-wall and multi-wall carbon nanotubes**.*Nanotechnology*, Vol. 20, 2009.

REGIN, A.F., SOLANKI, S.C.,SAINI, J.S. **Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review**.*Renew. Sust.Energ. Rev.*, Vol. 12, pp. 2438–2458, 2008.

SARI, A., KARAIPEKLI, A. **Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material**. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 27, pp. 1271–1277, 2007.

SARKAR, J.,GHOSH, P., ADIL., A. **A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications**. *Renew.Sust. Energ. Rev.*, Vol. 43, pp.164-177, 2015.

SEBTI, S.S., KHALILARYA, S.H., MIRZAEI, I., HOSSEINIZADEH, S.F., KASHANI, S., ABDOLLAHZADEH, M. **A numerical investigation of solidification in horizontal concentric annuli filled with nano-enhanced phase change material (NEPCM)**.*World Appl. Sci. J.* Vol. 13 (1),pp. 9–15, 2011.

SOLANGI, K.H., NAZI, S.N., LUHUR, M.R., BADARUDIN, A., AMIRI, A., RAD SADRI, ZUBIR, M.N.M., SAMIRA GHAREHKHANI, TENG, K.H. **A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids**. *Energy*, Vol.89, pp.1065-1086, 2015.

SUN, X., ZHANG, Q., MEDINA, M.A., LIU, Y., LIAO, S., et al. **A study on the use of phase change materials in combination with a natural cold source for space cooling in telecommunications base stations in China**. *Appl. Energy*. Vol. 117, pp. 95–103, 2014.

WANG, X.J., LI, X.F., XU, Y.H., ZHU, D.S. **Thermal energy storage characteristics of Cu-H₂O nanofluids**. *Energy*.Vol. 78, pp.212-217, 2014.

WU, S., ZHU, D., LI, X., LI, H., LEI, J. **Thermal energy storage behavior of Al₂O₃-H₂O nanofluids**.*ThermochimActa*.Vol. 483(1-2), pp.73-77, 2009.

- WU, S.Y., ZHU, D.S., ZHANG, X.R., HUANG, J. **Preparation and melting/freezing characteristics of Cu/paraffin nanofluid as phase-change material (PCM)** . Energy Fuels.Vol.24, pp.1894-1898, 2010.
- XIANG, J., DRZAL, L.T. **Investigation of exfoliated graphite nanoplatelets(xGnP) in improving thermal conductivity of paraffin wax-based phase change material**. Sol. Energy Mater.Sol. Cells.Vol.95, pp.1811-1818, 2011.
- XIE, H., WAN, J., CHEN, L. **Effects on the phase transformation temperature of nanofluids by the nanoparticles**.J. Mater. Sci. Technol. Vol. 24, pp. 5, 2008.
- XUAN, Y., LI, Q. **Heat transfer enhancement of nanofluids**. Int. J. Heat Fluid Flow. Vol.21, pp. 58–64, 2000.
- YAVARI, F., RAEISI, FARD, H., PASHAYI, K., RAFIEE, M.A., ZAMIRI, A., YU, Z. **Enhanced thermal conductivity in a nanostructured phase change composite due to low concentration grapheme additives**. J. Phys. Chem. C. Vol. 115, pp.8753-8758, 2011.
- ZALBA, B., MARTIN, J.M., CABEZA, L.F., MEHLING, H. **Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications**. Appl. Therm. Eng. Vol.23, pp.251–83, 2003.
- ZHONG, Y., ZHOU, M., HUANG, F., LIN, T., WANA, D. **Effect of graphene aerogel on thermal behavior of phase change materials for thermal management**. Sol.Energ.Material. Sol. Cell. Vol. 113, pp.195–200, 2013.
- ZHOU, S.Q., NI, R. **Measurement of the specific heat capacity of water-based Al₂O₃nanofluid**. App. Phys.Lett. Vol.92.2008.

APÊNDICE

Artigo Publicado no CYTEF 2016

CYTEF 2016 – VIII Congresso Ibérico | VI Congresso Ibero-Americano de Ciências e Técnicas do Frio
Coimbra-Portugal, 3-6 maio, 2016

SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE TERMOACUMULAÇÃO POR CALOR LATENTE UTILIZANDO UMA MISTURA ÁGUA- Al_2O_3 COMO MATERIAL DE ARMAZENAMENTO

Alexandre M. Monteiro¹, João F. Vital², Jorge R. Henríquez³ e José C. de Lira Junior⁴

1: Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica,
Av. da Arquitetura s/n - Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil.
CEP 50740-550
alex__monteiro@hotmail.com

2: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco
e-mail: joaofelipe_vital@hotmail.com

3: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco
e-mail: rjorge@ufpe.br

4: Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco
e-mail: claudino.lira@ufpe.br

Resumo *O uso de energia térmica fria para climatização de ambientes e conservação de alimentos é uma necessidade primordial para garantir as atividades humanas com qualidade e bem-estar. Por se tratar de um sistema que demanda muita energia e considerando o elevado custo da energia e seu impacto ambiental, faz-se necessário atuar no controle refinado destes sistemas, sempre buscando a maior eficiência com segurança operacional e baixo custo. A busca de soluções como termoacumulação de frio já é uma realidade em varias plantas instaladas mundo afora, porém, para garantir maior capacidade de armazenamento e melhor desempenho desta plantas, tem-se utilizado fluidos com propriedades especiais que visam potencializar a capacidade térmica de armazenamento de energia e a velocidade de carregamento térmico. Abordagens mais recentes na busca por novos materiais de armazenamento térmico tem se voltado aos nanofluidos, que são materiais a base de um fluido com partículas sólidas dispersas na forma de uma emulsão. A literatura já reporta tais fluidos, tanto do ponto de vista da sua produção quanto das suas propriedades termofísicas. Neste estudo, foi aplicado um modelo numérico do processo de armazenamento de energia por calor latente considerando o uso de um nanofluido, formado por água e*
