

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Raykleison Igor
dos Reis Moraes E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 25/02/2008
[Assinatura]
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo numérico-experimental do armazenamento de energia em cápsulas esféricas e recipientes recicláveis

Autor: Raykleison Igor dos Reis Moraes

Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS

**Estudo numérico-experimental do
armazenamento de energia
em cápsulas esféricas e recipientes recicláveis**

Autor: Raykleison Igor dos Reis Moraes

Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail

Curso: Engenharia Mecânica

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2008
SP-Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M791e Moraes, Raykleison Igor dos Reis
Estudo numerico-experimental do armazenamento de energia em cápsulas esféricas e recipientes recicláveis / Raykleison Igor dos Reis Moraes. – Campinas, SP: [s.n], 2008.

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Modelos matemáticos. 2. Engenharia térmica. 3. Energia - Armazenamento. 4. Calor. 5. Energia - Transferência. 6. Solidificação. I. Ismail, Kamal Abdel Radi. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Numerical-experimental study of the storage of energy in spherical capsules and recycled container

Palavras-chave em Inglês: Modeling, Ice Bank, PCM, Latent heat storage systems, Recycled container

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Luis Felipe Mendes de Moura, Vivaldo Silveira Junior

Data da defesa: 25/02/2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS

Dissertação de Mestrado

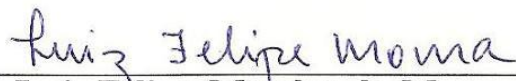
**Estudo numérico-experimental do
armazenamento de energia
em cápsulas esféricas e recipientes recicláveis**

Autor: Raykleison Igor dos Reis Moraes

Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail



Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail, Presidente
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Luís Felipe Mendes de Moura
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Vivaldo Silveira Junior
FEA/UNICAMP

Campinas, 25 de Fevereiro de 2008.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos primeiros e mais importantes professores: Raimundo Moraes e Célia Moraes.

“As pessoas que vencem neste mundo são as que procuram as circunstâncias de que precisam e, quando não as encontram, as criam.”

Bernard Shaw - Filósofo

Agradecimentos

Seria muito difícil traduzir o sentimento em poder ver este trabalho pronto, porém sinto-me muito grato pelo apoio dado por diversas pessoas e pela paciência que tiveram comigo ao longo deste trabalho:

- A CAPES pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento deste trabalho.
- Ao meu orientador, Professor Kamal Abdel Radi Ismail pela criatividade, confiança, apoio, companheirismo e principalmente pela paciência durante este período que trabalhamos juntos.
- Ao grande amigo Setembrino pela montagem experimental.
- A minha irmã Rayklicy que tanto me ama....
- Ao Professor João Carlos Rabelo pelos grandes conselhos.
- Ao Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos pela infra-estrutura fornecida durante a realização deste trabalho.
- Aos amigos de caminhada: Eduardo, "Mineiro", Sylvio, Júlio, Pedro e César "Grilo".
- Em especial agradeço ao Pedro Mendes Seiva pela ajuda computacional nas horas de grande agonia.
- Também agradeço a Carmel pela paciência e o enorme carinho.
- Aos amigos do Departamento.
- A você, que não conheço mas de alguma forma eu o considero como amigo e leitor de meu trabalho.

Resumo

MORAES, Raykleison Igor dos Reis, *Estudo numérico-experimental do armazenamento de energia em cápsulas esféricas e recipientes recicláveis*. Campinas, 2008. 78p. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas.

O presente trabalho procurou obter de uma forma detalhada o processo de formação de gelo no interior de cápsulas esféricas e geometrias alternativas recicláveis para o armazenamento de energia térmica, utilizando água e água-polietilenoglicol como PCM. Foi montada uma bancada de teste composta de um tanque de resfriamento e controlada com precisão de . As cápsulas utilizadas nos testes foram incrementadas com termopares tipo T, calibrados e localizados no centro da cápsula para investigar o efeito da solidificação do material. A faixa de variação de temperatura para os ensaios foram de -25 à -5 °C. Em seguida é apresentado um modelo matemático transiente em coordenadas esféricas e simulado usando a aproximação por diferenças finitas com o esquema da grade móvel. Os resultados experimentais são discutidos e as variáveis pesquisadas incluíram alguns parâmetros tais como: tempo de solidificação, temperatura do fluido de trabalho, concentração de polietilenoglicol, material da cápsula, velocidade, posição da frente de solidificação e o tamanho da cápsula no processo térmico de solidificação. O modelamento, junto com os resultados experimentais forneceram parâmetros para construção de um armazenador modular para fins residenciais.

Palavras chaves: Modelagem, Bancos de gelo, PCM, Armazenamento por calor latente, recipientes recicláveis.

Abstract

MORAES, Reykleison Igor dos Reis, *Numerical-experimental study of the storage of energy in spherical capsules and recycled container*. Campinas, 2008. 78p. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas.

The present work looked for to get of a detailed form the similar process of icing in the interior of spherical capsules and geometrias for the storage of thermal energy being used water and water-polietilenoglicol as PCM. A composed group of benches of test of a controlled tank of cooling and with precision was mounted of $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Capsules used in the tests had been developed with thermocouples type T, calibrated and located in the center of the capsule to investigate the effect of the solidification of the material. The band of variation of temperature for the assays had been of -25 à -5°C . After that a transient in spherical coordinates is presented and simulated mathematic model using the approach for finite differences with the project of the movel scheme. The experimental results had been presented and argued some parameters such as: time for solidification, working fluid, concentration, capsule material, velocity and position of the solidification front and the size of the capsule in the thermal process of solidification. However, the together modeling with the experimental results had supplied parameters storing construction of a modular one for residential ends.

Key words: Modeling, Ice bank, PCM, Latent heat storage systems, Recycled container.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	3
1.1.1	Objetivos Específicos	4
1.2	Justificativa e Relevância do Trabalho	4
1.3	Descrição do presente trabalho	4
2	Revisão Bibliográfica	6
2.1	Armazenamento de energia	6
2.2	Problemas de mudança de fase	9
3	Materiais e Métodos	12
3.1	Introdução	12
3.2	Dispositivo experimental	12
3.2.1	Seção de teste	13
3.2.2	Seção de observação	14
3.2.3	Seção de aquisição e processamento de dados	14
3.2.4	Seção de resfriamento	15
3.3	Controle e aquisição de dados	15
3.4	Procedimento de Calibração	16
3.5	Tratamento de dados	17
3.6	Procedimento experimental	18
3.7	Ensaaios	18
4	Modelamento matemático do processo de mudança de fase (solidificação)	20
4.1	Introdução	20
4.2	Descrição do problema	21

4.3	Equações governantes e condições de contorno	21
4.3.1	Equação da energia	21
4.3.2	Desenvolvimento das condições iniciais e de contorno	23
5	Análise Numérica	27
5.1	Sistemas de equações em diferenças finitas	27
5.1.1	Método de solução	27
5.2	Equações na forma adimensional	27
5.3	Fração de massa solidificada	31
5.4	Simulação do processo de solidificação	32
5.4.1	Número de pontos da grade	32
6	Resultados e discussão	38
6.1	Cápsulas esféricas	38
6.1.1	Efeito da variação da quantidade de polietilenoglicol no PCM	39
6.1.2	Efeito da variação do tamanho da cápsula esférica	39
6.1.3	Efeito da temperatura do fluido de trabalho	39
6.1.4	Efeito do material da cápsula esférica	40
6.2	Cápsulas cilíndricas (materiais recicláveis)	40
7	Conclusão	46
8	Sugestões para trabalhos futuros	47

Lista de Figuras

3.1	Modelo esquemático. 1. Sistema de aquisição de dados, 2.Termopares, 3. Cápsula esférica, 4. Válvula solenóide, 5. Evaporador, 6.Termostato	12
3.2	Cápsula de vidro e plástico em vários diâmetros.	14
3.3	Recipientes recicláveis.	14
3.4	Visão geral da bancada experimental	15
3.5	Sistema utilizado na calibração dos termopares tipo T(adaptado Figliota e Beasley, 2000).	16
4.1	Comportamento da frente de solidificação em uma geometria esférica	20
4.2	Esquema em forma de resistências térmicas.	23
5.1	Grade utilizada para discretização das equações governantes.	30
5.2	Avaliação do número de pontos na direção radial	32
5.3	Variação da temperatura no centro da esfera no tempo	33
5.4	Variação da temperatura no centro da esfera no tempo	33
5.5	Variação da temperatura no centro da esfera no tempo	34
5.6	Variação da temperatura no centro da esfera no tempo	34
5.7	Variação da posição da interface no tempo com relação as temperatura de banho de -12 e -20 °C.	35
5.8	Variação da fração de massa solidificada no tempo com relação as temperaturas de banho de -12 e -20 °C.	36
5.9	Variação da fração de massa solidificada no tempo com relação aos tamanhos das cápsulas	36
5.10	Velocidade da frente de solidificação.	37

6.1	Temperatura de mudança de fase em função da concentração de polietilenoglicol para diferentes materiais das cápsulas.	41
6.2	Variação do tempo para solidificação completa na temperatura de banho para diferentes concentrações de polietilenoglicol.	41
6.3	Variação do tempo para solidificação completa na temperatura de banho para diferentes concentrações de polietilenoglicol.	42
6.4	Variação do tempo para solidificação completa no diâmetro para diferentes temperaturas de banho.	42
6.5	Variação do tempo para solidificação completa na temperatura de banho para diferentes diâmetros.	43
6.6	Tempo para solidificação completa em função da concentração de polietilenoglicol para diferentes materiais das cápsulas.	43
6.7	Efeito da condutividade térmica no tempo de solidificação completa.	44
6.8	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa.	44
6.9	Variação do tempo para solidificação na concentração de polietilenoglicol.	45
6.10	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa.	45
8.1	Armazenador de energia	47
8.2	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	53
8.3	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	53
8.4	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	54
8.5	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	54
8.6	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	55
8.7	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	55
8.8	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	56
8.9	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	56
8.10	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	57
8.11	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	57
8.12	Variação da temperatura no tempo para solidificação completa	58
8.13	Curva de calibração para o termopar 1	59
8.14	Curva de calibração para o termopar 2	59
8.15	Curva de calibração para o termopar 3	60

8.16 Curva de calibração para o termopar 4	60
--	----

Lista de Tabelas

3.1	Propriedades do fluido refrigerante	13
3.2	Temperatura para calibração dos termopares tipo T	17
3.3	Incertezas para cada um dos termopares	18
6.1	Propriedades termofísicas da água	38
6.2	Condutividade térmica dos materiais	38
8.1	Alguns parâmetros para execução dos experimentos	61

Nomenclatura

Letras latinas

T_{sol}	Temperatura na fase sólido
T_{liq}	Temperatura na fase líquida
T_m	Temperatura de mudança de fase
T_f	Temperatura da frente de solidificação
T_{et}	Temperatura do etanol
T_{∞}	Temperatura do fluido de trabalho
CNC	Concentração
Dia	Diametro da cápsula
C	Calor específico
r_e	Raio externo
r_i	Raio interno
r_f	Posição da interface
$\alpha_{sol,liq}$	Difusividade térmica
R	Resistência térmica
$S(t)$	posição da frente de solidificação
$R - 22$	monoclorodifluormetano
h	Coefficiente de transferência de calor
L	Calor Latente de fusão
PCM	Material de mudança de fase
$ATPEG$	Polietileno glicol
Ste	Número de Stefan
Bi	Número de Biot
x	Posição da frente de solidificação adimensional
t	Tempo
A	Área

Letras gregas

κ_{sol}	Condutividade térmica na fase sólida
κ_{liq}	Condutividade térmica na fase líquida
κ_{esf}	Condutividade térmica da esfera
ρ	Densidade
τ_c	Tempo de solidificação
θ	Temperatura adimensional

Subscrito

sol	relativo à sólido
liq	relativo à líquido
c	relativo à cooling
m	relativo à mudança de fase
e	relativo à externo
i	relativo à interno
f	relativo à fluido
et	relativo à etanol

Capítulo 1

Introdução

Olhando em uma perspectiva global, à proporção que a humanidade foi evoluindo e revendo a arquitetura, as estruturas sociais e de negócios é possível reduzir de maneira significativa às necessidades de energia da sociedade. No decorrer do tempo o desenvolvimento da sociedade contemporânea foi medido pela sua capacidade de consumo e em quanto ela podia consumir, caracterizando seu poder e sua hegemonia. Esta cultura do consumo criada através do marketing e, principalmente, da necessidade de expansão das grandes empresas, tem gerado nas cidades toneladas de resíduos sólidos por dia (Monteiro, 2001). O conteúdo de resíduos urbanos, nos últimos 40 anos, mudou muito. Produziu-se uma variedade de embalagens plásticas, latas de alumínio, papéis e vidros e isso vem se tornando um grande transtorno para as cidades. A alternativa encontrada por muitas empresas que fabricam embalagens, tem sido a reciclagem. A reciclagem é considerada por técnicos, engenheiros ambientais, administradores públicos e líderes de movimentos ambientais como a solução definitiva para os milhões de toneladas de resíduos produzidos nas cidades. A dificuldade imposta para tais revisões vem das limitações econômicas na reestruturação das cidades e na resistência psicológica à mudança em grande escala, seja no próprio âmago das estruturas sociais e econômicas ou em outras formas de resistências que ainda não foram discutidas no contexto atual. Como forma do aproveitamento deste material, as garrafas recicláveis e latas de alumínio são utilizadas para armazenar energia térmica fria. O manuseio e a sua facilidade de acomodação em tanques de armazenamento propiciou a ser um grande candidato no encapsulamento do material de mudança de fase que, posteriormente, é utilizado em sistemas de refrigeração e ar condicionado para ambientes. Com isso e enfatizando o uso dos recipientes recicláveis em tanques de armazenamento de energia, o Brasil, por exemplo, com seus estabelecimentos comerciais e industriais são responsáveis por 13% do consumo de energia elétrica total gasto no país, no qual

20% é devido ao sistema de condicionamento de ar, incluindo neste contexto os setores comerciais e setores públicos. Em decorrência destes dados, não há dúvida, que o armazenamento de energia térmica tornou-se atrativo, porque tanto o custo da demanda como do consumo de energia são altos durante o período de pico (SEBRAE, 2002).

Tendo em vista esta tendência, muitos estudos sobre sistemas de energia e suas aplicações tem sido relatados na literatura especializada. Diversas teorias e investigações experimentais foram desenvolvidas para a modelagem de desempenho térmico de unidades de armazenamento, utilizando material de mudança de fase (PCM). No entanto, os problemas de mudança de fase, investigações de novas geometrias, novos conceitos para armazenamento de energia foram aprimorados e, com isso, evoluíram-se tecnologias nesta área.

Deste modo, nos últimos anos, a área de transferência de calor com PCM ao redor de corpos sólidos e dentro de recipientes têm recebido interesses por causa de sua importância nas ciências térmicas, pois o grande número de aplicações em engenharia se estendem nas principais áreas do conhecimento como: bioengenharia, ciências de matérias e muitas outras. Parte de toda esta exigência em termos da nova ordem mundial devido as transformações que o homem vem acarretando no meio ambiente, está associada ao não aproveitamento e a conservação inadequado da energia térmica, pois exige um armazenamento adequado a qual tem sido utilizado de várias formas através da história do homem (Ismail, 1998).

Para classificar as várias formas de armazenar energia, foram divididas e classificadas em três categorias, dependendo da maneira que o calor é armazenado e, são elas: armazenadores convencionais que armazenam energia térmica via elevação de temperatura de um material sólido ou um líquido adequado sendo nesse caso o processo denominado de armazenamento de calor sensível.

A segunda categoria engloba os armazenadores térmicos de mudança de fase que armazenam calor latente de sais, materiais compostos e produtos eutéticos ou puros. Por fim estão os armazenadores que combinam calor sensível e calor latente denominado de híbrido (Abugderah, 1999).

Agora, para armazenar o material de mudança de fase é necessário formas alternativas, barata e compacta para encapsular o material de mudança de fase em seu interior e acomodá-los em tanques de resfriamento. Como uma forma econômica e viável para este processo, devido a sua alta densidade de armazenamento e excelente eficiência volumétrica que, por sua vez, faz a energia armazenada economicamente possível, foi utilizado cápsulas esféricas e recipientes recicláveis.

Durante os períodos de baixa demanda de resfriamento, os sistemas removem calor para um armazenador térmico para serem usados em sistemas de ar condicionado. Porém, o uso deste conceito para aplicações de ar condicionado vêm aumentando, devido à necessidade de reduzir os picos das demandas de energia elétrica que geralmente são requisitados.

Uma vantagem a ser considerada neste caso de encapsulamentos esférico com PCM é a grande área de transferência de calor, reduzindo a reatividade do PCM em relação ao ambiente e controlando a carga em volume do material armazenado quando ocorre a mudança de fase (Farid *et al.*, 2004).

Para se determinar a influência de diversos fatores tanto térmico como geométricos no desempenho de armazenadores de calor latente é de grande importância simular computacionalmente o sistema a ser estudado. Pois este, traz a luz a necessidade de conhecer o modelo matemático e métodos de solução destes para os fenômenos de transferência de calor que está presente, especialmente a mudança de fase.

Do ponto de vista matemático fenômenos que envolvem mudança de fase do tipo solidificação pertencem a uma classe maior dos chamados problemas de fronteira móvel, onde uma ou mais fronteiras do domínio se deslocam ao longo do tempo, sua posição não é conhecida num primeiro momento e a determinação desta faz parte da solução do problema (Jesus, 1998). Para o caso da mudança de fase na fronteira móvel é a interface entre as fases sólida e líquida, também denominada frente de solidificação, conforme o caso. A presença de uma interface que se desloca torna problemas anteriormente simples e com solução analítica exata em outros não-lineares e apenas com soluções numérica ou aproximadas. Dentre os modelos baseados em temperatura um método de solução utilizado é a chamada técnica da fronteira móvel que consiste em realizar algumas mudanças nas variáveis das equações de forma que se torne o novo sistema de equações modificado para a fronteira móvel.

Neste trabalho é utilizado um modelo baseado em temperatura com a técnica da fronteira móvel para a solução numérica de um problema de solidificação em uma geometria esférica visando uma aplicação em armazenadores de calor latente.

1.1 Objetivo

Contribuir com informações para o melhoramento dos projetos de armazenamento de energia, utilizando cápsulas esféricas de plástico com diâmetros otimizados e recipientes recicláveis.

1.1.1 Objetivos Específicos

1. Dimensionar e construir um tanque para o congelamento de cápsulas esféricas;
2. Executar os experimentos com cápsulas de plástico e vidro;
3. Analisar a influência do fluido de trabalho no tempo de solidificação completa;
4. Estudar o efeito da concentração do polietilenoglicol (ATPEG) com a água no tempo de solidificação;
5. Comparar o tempo de solidificação completa da água com a da mistura (polietilenoglicol+água);
6. Comparar os diversos diâmetros das cápsulas esféricas com o tempo de solidificação completa;
7. Estudar o efeito da variação da temperatura em outras geometrias com varias concentrações de ATPEG.

1.2 Justificativa e Relevância do Trabalho

Este trabalho faz parte de um projeto que está em desenvolvimento no laboratório, para formular um armazenador residencial modular para ser utilizado no lugar de ar condicionado tipo janela e que utiliza unidades disponíveis no mercado de fácil montagem e operação. Sendo modular, isto permite sua utilização em escala relativamente maior. Além de utilizar esferas de plástico, permitem também utilizar materiais alternativos para este fim. A proposta deste projeto visa um projeto independente que substitui o sistema de janela e também seja de fácil incorporação com o sistema "self".

1.3 Descrição do presente trabalho

Neste trabalho é apresentado o processo de solidificação em cápsulas esféricas e geometrias alternativas em um tanque de congelamento com material de mudança de fase no interior. A dissertação está organizado da seguinte maneira. No Capítulo 1, foi realizada uma introdução a respeito do tema a ser estudado e justificando a necessidade de desenvolver este trabalho. No Capítulo 2, é apresentado uma revisão da literatura com os conceitos que são necessários para o entendimento do contexto e do tema abordado. No Capítulo 3, é apresentado o procedimento

experimental para realização dos testes. No Capítulo 4, é apresentado o modelo matemático e as soluções utilizadas para implementação do problema. No Capítulo 5, é feita uma análise numérica das equações, utilizando diferenças finitas e a técnica da fronteira móvel e alguns resultados da simulação são apresentados para a validação do modelo proposto. No Capítulo 6, são apresentados os resultados e discussão dos testes experimentais. No Capítulo 7, são apresentados as conclusões. No Capítulo 8, apresentamos as sugestões apontadas pelo tema desta dissertação. Resultados parciais deste trabalho foram publicados nos artigos (Ismail e Moraes, 2007a, 2007b).

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Problemas transientes de troca de calor envolvendo mudança de fase são importantes em aplicações industriais tais como congelamento de alimentos, fabricação de gelo, solidificação de metais e armazenamento de energia entre outros (Ismail, 1998). De particular importância são armazenadores de frio ou bancos de gelo, equipamentos com elevada capacidade de armazenamento de energia comparado a um armazenador de calor sensível. Esta diferença na capacidade de armazenamento é possível pela mudança de fase que sofre a água ou pcm. Bancos de gelo são equipamentos que armazenam energia por calor latente em baixas temperaturas. Considerando, portanto, a profundidade do estudo de fenômenos de mudança de fase, esta foi uma área de pesquisa de grande interesse desde o século passado, tanto do ponto de vista tecnológico como no desenvolvimento de aparatos experimentais e de modelos matemáticos para melhor compreensão de processos de transferência de calor envolvidos.

2.1 Armazenamento de energia

Segundo Nallusamy, Sampath e Velraj (2007) investigaram experimentalmente o comportamento térmico de um leito que combina calor sensível e latente para o armazenamento de energia térmica. A unidade de armazenamento de energia térmica é projetada, construída e integrada com temperatura constante e o desempenho do coletor solar estudado da unidade de armazenamento. Os autores utilizaram parafina no interior das cápsulas esféricas, onde são empacotados em um tanque armazenador cilíndrico e isolado. Eles utilizaram, também, água como fluido de transferência de calor como banho e o coletor solar para o tanque se comportou como um armazenador de calor sensível. Como resultados, os autores obtiveram: o processo de carga, o efeito da taxa do fluido de transferência de calor, o armazenamento de calor instantâneo, armazenamento de calor acumulado,

o processo de descarga, a variação da temperatura do PCM e do fluido de transferência de calor.

Hammou e Lacroix (2006) apresentaram um sistema de armazenamento de energia híbrido sendo gerenciado simultaneamente por energia solar e elétrica. Um modelo também foi proposto e a validação dos dados foram obtidos com a solução exata. Os resultados indicaram que o consumo de energia elétrica para o aquecimento de espaços foi minimizado quando o sistema de armazenamento de energia híbrido consiste de uma parede de espessura 0,15 m incluindo cápsulas esféricas cheias com material de mudança de fase.

Ettouney *et al.* (2006) realizaram estudos experimentais, utilizando parafina como material de mudança de fase dentro de cápsulas esféricas metálicas. Com isso eles perceberam que o aumento da transferência de calor se dá em função do diâmetro do nódulo de metal, adicionando parafina dentro da esfera. Alguns parâmetros foram investigados e obtidos no experimento como: o número de Nusselt, número de Fourier, assim como os efeitos que causam o aumento da transferência de calor ao adicionar vários nódulos esféricos de metal dentro de uma outra esfera.

Yuksel, Avci e Kilic (2006) apresentaram um modelo para o armazenamento de energia térmica, avaliando a variação de temperatura e o tempo de armazenamento em geometrias esféricas. Eles, também, investigaram os efeitos do fluido circulante no tempo de carregamento, a variação da temperatura no centro da cápsula esférica.

Revankar e Croy (2006) investigaram a redução da fração de vazio em sistemas de armazenamento térmico empregando material de mudança de fase em cápsulas esféricas e detectou que, há sérios problemas quando há o derretimento do material de mudança de fase no estado sólido. Experimentos foram desenvolvidos e o fenômeno de fração de vazio em placas horizontais, geometrias esféricas e toroidais foram investigadas. Eles também concluíram que o ciclo de fusão e solidificação do material de mudança de fase induz diferentes fração de vazio em cápsulas e também, grandes efeitos na característica da transferência de calor em unidades de armazenamento.

Kausksou *et al.* (2005) observaram a influência dos parâmetros do escoamento e avaliaram a importância da convecção natural na configuração vertical e horizontal em tanques de armazenamento de energia. A análise destas duas configurações permitiram ilustrar as funções ótimas do tanque que é somente alcançada no caso da posição vertical. No entanto, na posição horizontal apareceu o fenômeno da convecção natural que tem maior importância no tempo de carga e consequentemente na diminuição da troca de energia entre o fluido e a cápsula.

Koizumi (2004) observou experimentalmente e esclareceu o desempenho da transferência de

calor na forma temporal e espacial de uma esfera com paredes isotérmicas. Os resultados experimentais foram atingidos usando o ar com número de Grashof e número de Reynolds acima de 1800.

Strub *et al.* (2003) apresentaram um modelo do comportamento de uma gota d'água dentro de um escoamento de ar durante o resfriamento e cristalização. O modelo leva em consideração à evaporação da fase líquida e a decomposição do superesfriamento e toda a cristalização e sublimação da fase sólida.

Ismail e Henríquez (2003) investigaram e observaram experimentalmente os efeitos do tamanho e o material da casca esférica, a temperatura inicial do material de mudança de fase, a temperatura externa da cápsula esférica, a massa de solidificação e o tempo de solidificação completa. Eles também verificaram que o efeito do tempo de solidificação estão diretamente relacionados com alguns parâmetros como: o diâmetro da cápsula esférica e redução da temperatura do banho.

Zelba *et al.* (2003) realizaram um levantamento completo de aplicações para sistemas de armazenamento térmico dando destaque para os materiais de mudança de fase, classificando detalhadamente os materiais utilizados em sistemas de armazenamento térmico, dentre eles orgânicos e inorgânicos, apresentando algumas propriedades termofísicas.

Wilchinsky *et al.* (2002) realizaram uma análise do desempenho e propuseram um modelo para o processo de fusão dentro de uma cápsula elástica de forma circular. Eles usaram uma linearização para estimar o número de Stefan. Uma forma fechada da evolução da equação para o movimento do centro móvel dentro cápsula é encontrada, descrevendo, assim, a influência da ação convectiva e a deformação da parede da cápsula durante a fusão, devido à diferença entre a densidade sólida e líquida. Os autores observaram que a taxa de fusão da cápsula esférica é maior que a forma cilíndrica, devido à diferença entre o raio da área da superfície em relação ao volume.

Eames e Adref (2002) apresentaram resultados de um estudo experimental e as características do processo de fusão e solidificação em elementos esféricos contendo água, freqüentemente usados em leitos de sistemas de armazenamento térmico em construções para os sistemas de condicionamento de ar. Os resultados por eles descritos incluem equações semi-empíricas que permitem diagnosticar a massa de gelo dentro de esferas em um determinado tempo de solidificação e fusão.

Saito (2002) realizou um estudo sobre armazenamento de energia térmica, explicando os conceitos entre os vários tipos de sistemas de armazenamento, definindo e comparando seus méritos e deméritos. Destacou, também, o sistema de armazenamento de água resfriada e armazenadores

de gelo, armazenamento de gelo estático e a formação de "slurry" para serem utilizados com boa eficiência em sistemas de refrigeração.

Cho e Choi (2000) estudaram sobre as características térmicas da parafina em cápsulas esféricas durante o processo de solidificação e fusão e concluíram que a temperatura de mudança de fase da parafina é diferente durante o processo de fusão e solidificação, devido à diferença entre a remoção de calor e a energia de solidificação. Além disso o período do processo de mudança de fase para a cápsula cheia com parafina foi menor em comparação com a água (16 a 72%).

Bédécarrats *et al.* (1996) estudaram o processo industrial de armazenamento de energia, usado para ar condicionado ou refrigeração e investigaram uma planta com um tanque de tamanho reduzido, cheio com cápsulas esféricas comerciais dispersas randomicamente.

2.2 Problemas de mudança de fase

Assis *et al.* (2007) avaliaram pelo método numérico e experimental o processo de fusão e solidificação de um material de mudança de fase (PCM) em geometrias esféricas. Eles, também, apresentaram uma tentativa para resolver, simultaneamente, a equação da conservação transiente para a fase sólida-líquida do PCM e o ar, enquanto o PCM é expandido, convecção no fluido (fusão e ar) e o movimento na fase sólida e líquida. As hipóteses, a priori, são usadas para caracterizar o processo de fusão e parâmetros, incluindo a forma e o comportamento da fase sólida e líquida na parte superior e inferior da cápsula.

Liao, Su, Chwang (2006) propuseram resolver um modelo não linear combinando convecção e radiação em corpos esféricos resfriados. Uma solução em forma de série é dada, a qual concordou com a solução exata e a solução numérica. As séries indicaram que o modelo não linear, combinando convecção e radiação em corpos esféricos sendo resfriados e a temperatura na superfície do corpo decai para altos valores de Biot.

Bilir e Ilken (2005) investigaram o problema da frente de solidificação do material de mudança de fase em encapsulamentos esféricos e cilíndricos com condições de contorno de terceira espécie. No entanto, as condições de contorno foram resolvidas numericamente, usando o método da entalpia com a aproximação do volume de controle.

Wei *et al.* (2005) apresentaram um estudo numérico e experimental do PCM em várias geometrias (esférica, cilíndrica, placa e tubos). Além disso, também, foram investigados os efeitos do diâmetro da esfera, espessura da casca, e a fração de vazio no desempenho dos sistemas de

armazenamento de calor.

Abderranhmane e Laraqi (2003) propuseram soluções analíticas transientes para condução em geometrias esféricas e cilíndricas. As soluções numéricas são apresentadas na forma de diagramas que podem ser fácil e rapidamente usadas em algumas aplicações em engenharia como: aeronáutica, eletrônica e em processos de alimentos. No entanto estes dados são úteis para otimização dos dados numéricos em mecânica dos fluidos em associação com a transferência de calor e, o método inverso, para determinar as características dos fenômenos das superfícies em vários casos. Porém, estes diagramas são para especificar uma ampla faixa de números de Fourier e Biot correspondente aos problemas transientes e caracterizando os números de Fourier fracos associados com uma combinação dimensional de corpos (esféricos e cilíndricos) e valores de condutância das superfícies térmicas. Desse modo, a principal dificuldade encontrada foi na solução da equação característica baseada na combinação de parâmetros envolvendo em particular as equações da energia.

Lin e Jiang (2003) investigaram o processo de resfriamento em três geometrias: placa, cilindro e esfera usando o modelo de quasi-regime permanente. Os autores analisaram o modelo, adicionando os perfis de temperatura para simular o efeito transiente na distribuição de temperatura na fase sólida. O termo adicionado é baseado na taxa do fluxo de calor para a face de contorno na superfície de resfriamento e, fisicamente, o efeito da capacidade térmica na região de congelamento.

Barba e Spiga (2003) analisaram o processo de descarregarregamento do material de mudança de fase (PCM) e analiticamente estudaram os seus efeitos para condições de contorno com temperatura da superfície constante em três configurações geométricas, considerando que o PCM é encapsulado em um cilindro, em uma placa e em uma esfera de polietileno. Eles também estudaram o efeito da influência da geometria e o número de Jacob no fim da solidificação.

Ismail e Henríquez (2002) propuseram um modelo para simular um sistema de armazenamento, compostos de cápsulas esféricas cheias de material de mudança de fase contidas em um tanque com fluido de trabalho circulante. Entretanto, o processo de solidificação dentro da cápsula esférica é tratado usando o modelo de mudança de fase unidimensional com condição de contorno na superfície externa. A solução da equação diferencial é resolvida por aproximação em diferenças finitas com a técnica da grade móvel.

Kodadadi e Zhang (2001), apresentaram um estudo dos efeitos da flutuação induzida em fusão forçada do material de mudança de fase dentro de recipientes esféricos. O procedimento computacional foi baseado na técnica de volumes finitos usando variáveis dependentes, através da

equação da continuidade dependente do tempo, equação do momento e da energia em sistemas de coordenadas esféricas.

Ismail e Henríquez (2000) apresentaram um estudo numérico da solidificação do PCM em uma casca esférica. O modelo matemático é baseado em condução pura no PCM e as condições de contorno e temperatura constante ou transferência de calor convectiva na superfície externa da casca esférica. A solução é baseada por aproximação em diferenças finitas para a solidificação do PCM no container esférico com a temperatura na parede constante ou condições de contorno convectiva. Alguns parâmetros foram, também, analisados como: diâmetro da esfera, espessura da parede, material da parede, temperatura externa e a temperatura inicial do PCM.

Caldwell e Chan (2000) apresentaram um esquema numérico baseado no método da entalpia para resolver o problema de solidificação em geometrias esféricas. Uma das vantagens citadas por estes autores é que o método da entalpia é superior ao Método Integral de Balanço de Calor que é mais flexível. Porém, a sua aplicação é mais complicada para domínios em duas fases, resultando em sistemas de equações mais robustos. Em geral os sistemas com domínio multidimensional é muito difícil; mas não é impossível a sua solução.

Formim e Saitoh (1999) apresentaram um modelo para cápsulas esféricas e resolveram numericamente, utilizando o método da grade fixa. Os parâmetros adimensionais, na qual descrevem as características principais, são encontradas no processo de fusão. No entanto, devido a pequenos parâmetros nas equações governantes o método das perturbações é implementado. Com isso, os autores obtiveram resultados numéricos e analíticos que indicaram que as paredes não isotérmicas mostram uma considerável diferença comparados com os resultados obtidos para a temperatura de parede constante.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Introdução

No laboratório de Armazenamento Térmico e Tubos de Calor, UNICAMP, foi projetada e construída uma bancada para realização de testes de solidificação de água e polietilenoglicol como materiais de mudança de fase no interior de cápsulas esféricas e cilindros sob condições controladas e, avaliar a influência de alguns parâmetros importantes, tais como: tempo de solidificação completa, temperatura do fluido, temperatura de mudança de fase, tamanho, concentração.

3.2 Dispositivo experimental

O aparato experimental é constituído por quatro seções: seção de teste, seção de observação, seção de aquisição de dados, seção de resfriamento: fluido de transferência, tanque de baixa temperatura, banho de temperatura controlada. O desenho esquemático está apresentado na Figura 3.2.

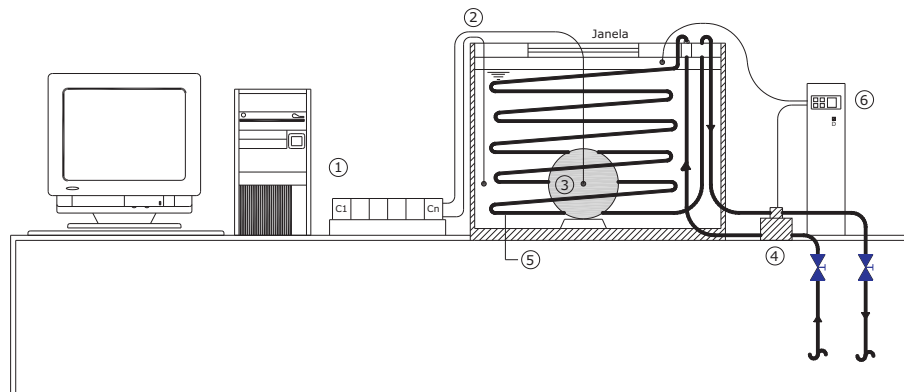


Figura 3.1: Modelo esquemático. 1. Sistema de aquisição de dados, 2. Termopares, 3. Cápsula esférica, 4. Válvula solenóide, 5. Evaporador, 6. Termostato

3.2.1 Seção de teste

A seção de teste é formada por uma cápsula esférica cheia com PCM. Um tanque em aço inox de dimensões (350 x 330 x 280)mm foi montado e isolado termicamente com placas de poliestireno expandido de 50 mm. A unidade condensadora, que consiste em um compressor e condensador acoplados formando uma única unidade é que realiza o ciclo de refrigeração por compressão a vapor, que pela mudança de fase do fluido refrigerante primário, neste caso o **R-22**, retira energia térmica do fluido refrigerante secundário, neste caso o etanol, em um trocador de calor, fazendo com que este se resfrie.

Conforme Stoecker (1985), defini-se como refrigerante primário aquele que é usado em sistemas de compressão a vapor. O fluido refrigerante secundário, geralmente líquido é usado para transportar energia térmica à baixa temperatura de um lugar para o outro. A Tabela 3.1 apresenta as propriedades dos fluidos refrigerantes utilizados a uma temperatura de 20°C.

Tabela 3.1: Propriedades do fluido refrigerante		
	R-22	Etanol
Temperatura de ebulição(°C)	-40,9	78,4
Temperatura de solidificação(°C)	-157	-112
Massa específica(kg/m^3)	1200	790
Condutividade térmica($W/m.K$)	0,090	0,176
Viscosidade cinemática($mPa.s$)	0,206	1,40

Foram utilizados dois tipos de materiais de cápsulas (Figura 3.2 e 3.3), vidro e outra de plástico para conter material de mudança de fase (água ou Polietilenoglicol). Para analisar o comportamento do experimento foram instalados termopares tipo T, previamente calibrados e conectados a um sistema de aquisição de dados, nas seguintes posições (Figura 3.1): (1) para controlar a temperatura do banho; (2) outro no centro da esfera sendo revestido por um pequeno tubo de plástico ao seu redor de tal forma que sua região de contato (a ponta do termopar) fique totalmente imersa no PCM, (3) na superfície interna da cápsula e (4) na superfície externa. Para os cilindros foram utilizados a mesma célula experimental e a disposição dos termopares de maneira similar a que foi feita nas cápsulas esféricas.



Figura 3.2: Cápsula de vidro e plástico em vários diâmetros.



Figura 3.3: Recipientes recicláveis.

3.2.2 Seção de observação

A análise e observação do processo de solidificação foi realizada através de sinais enviados para o sistema de aquisição e convertidas em uma unidade física.

3.2.3 Seção de aquisição e processamento de dados

A captação dos dados foi realizado pelo sistema de aquisição de dados composto por 32 canais e um computador e um termômetro padrão. O sinal é enviado por sensores que são armazenados e processados pelo computador.

3.2.4 Seção de resfriamento

Esta seção é composta pelo fluido de transferência, banho de temperatura controlada e um tanque de baixas temperaturas conforme a Figura 3.2.4.



Figura 3.4: Visão geral da bancada experimental

- **Fluido de transferência** é composto por etanol hidratado, com a finalidade de remover energia térmica do material de mudança de fase no interior da cápsula (esférica, cilindro) por convecção natural, mediante ao controle da temperatura dentro do tanque.
- **Banho de temperatura controlada - BTC**, tem como função manter a temperatura do fluido que resfria a cápsula esférica constante. Para tal controle foi utilizado um termostato com precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, que sinalizava quando o fluido está perdendo calor e, em seguida resfriando novamente e mantendo-o sempre controlado. Foi utilizado 7 temperaturas na faixa entre -25 à -5°C .
- **Tanque de baixas temperaturas** teve como função armazenar o fluido de transferência até atingir a temperatura desejada para iniciar o teste. No seu interior não há agitação, apenas o resfriamento era feito pelo evaporador.

3.3 Controle e aquisição de dados

Para cada teste, o tempo de duração ficou entre 0,25 a 19 horas, dependendo da temperatura do fluido de transferência e do tamanho da cápsula esférica. O intervalo de aquisição dos dados ou espaços de amostras foi de 60s.

3.4 Procedimento de Calibração

Para a realização da calibração foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. Béquero de vidro com água;
2. Gelo moído;
3. Invólucro de isopor para isolamento lateral do béquer;
4. Termômetro de mercúrio adotado como padrão, com incerteza de $0,1^{\circ}\text{C}$;
5. Microcomputador, condicionador de sinais e placa de aquisição de dados.

Inicialmente o conjunto foi calibrado empregando-se um banho de gelo (Figura 3.4) e como referência um termômetro de mercúrio calibrado e certificado. A calibração foi feita em uma estreita faixa de temperatura e quando a temperatura estabilizava era realizada a leitura através do Software Aqdados. Foi registrado o valor da temperatura no computador para cada valor de temperatura lida no termômetro padrão.

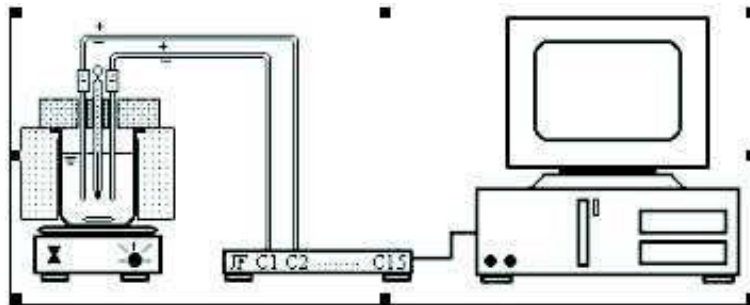


Figura 3.5: Sistema utilizado na calibração dos termopares tipo T(adaptado Figliota e Beasley, 2000).

A Tabela 3.2 apresenta os resultados das temperaturas do termômetro padrão e a temperatura média correspondente em cada um dos termopares.

Tabela 3.2: Temperatura para calibração dos termopares tipo T

Termômetro Padrão	T1	T2	T3	T4
-4	-2,31	-2,84	-2,4	-2,44
-6,5	-4,62	-5,21	-4,77	-4,87
-9,5	-6,98	-4,51	-6,99	-7,11
-12,5	-9,93	-10,47	-9,83	-10,01
-15,4	-13	-13,64	-12,93	-13,09
-18,1	-15,82	-16,35	-15,68	-15,87
-20,6	-18,11	-18,81	-18,07	-18,22
-23,4	-21,1	-21,88	-21,07	-21,19
-24,7	-22,25	-23,1	-22,28	-22,44

3.5 Tratamento de dados

Os aspectos sobre a teoria estatística aplicada ao tratamento dos resultados foram de acordo com os publicados por (Figliota e Beasley, 2000). As incertezas foram calculadas através do método da raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas de cada um dos elementos que no caso de calibração são incertezas devido ao padrão e a interpolação dos dados. Assim:

$$u = \sqrt{u_p^2 + t_{\alpha,\nu} S_{yx}^2} \quad (3.1)$$

onde:

- u incerteza do conjunto experimental
- u_p incerteza padrão
- $t_{\alpha,\nu}$ distribuição t-student para uma determinação probabilidade e grau de liberdade
- S_{yx} desvio padrão do ajuste

O desvio padrão do ajuste é determinado por:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_{ci})^2}{\nu}} \quad (3.2)$$

onde:

- S_{yx} desvio padrão do ajuste
- y_i valor obtido na calibração
- y_{ci} valor obtido a partir da equação $\nu = N - (m + 1)$, sendo m o expoente polinomial.

A determinação do desvio padrão do ajuste foi realizado a partir da equação de ajuste dos dados obtidos na calibração, como mostrado nas Figuras 1, 2, 3, 4 situadas no Apêndice-C.

Na Tabela 3.3 estão apresentados os resultados das incertezas para cada um dos termopares, considerando-se um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 3.3: Incertezas para cada um dos termopares

Termopar	T1	T2	T3	T4
Incetezas	0,48	0,56	0,6	0,54

3.6 Procedimento experimental

O experimento foi realizado nas seguintes etapas:

1. Ligar o computador, carregar o programa **AQDADOS** e, configurar para executar as leituras em cada termopar posicionado na esfera;
2. Ajustar o termostato para iniciar o resfriamento à temperatura desejada do *etanol*, fazendo com que a válvula solenóide seja acionada após atingir a temperatura de ensaio;
3. Ligar o compressor, fazendo com que o **R-22** circule pela linha, até chegar no evaporador do tanque de baixas temperaturas, trocando, assim, calor com o etanol;
4. Deixar $\pm 10\%$ de espaço vazio no interior da cápsula e do recipiente reciclável para acomodar a expansão do material solidificado;
5. Imergir a cápsula esférica com o PCM no tanque de baixas temperaturas, fixando no fundo;
6. Iniciar o programa de aquisição de dados - AQDADOS e em seguida gravar as temperaturas;
7. O experimento é finalizado quando a temperatura no centro da cápsula esférica atinge um valor constante ou temperatura de mudança de fase.

3.7 Ensaios

Foram realizados 107 experimentos, ver Tabela 8.1 no Apendice D. Para uma determinada faixa de variação de parâmetros foram analisados:

1. Material das cápsulas- (Capsulas esféricas de vidro e de plástico, latas de alumínio, garrafas plásticas.)
2. Temperatura de banho ($-25, -20, -18, -15, -12, -10, -5^{\circ}\text{C}$);
3. PCM utilizado (água e solução de polietilenoglicol);

Capítulo 4

Modelamento matemático do processo de mudança de fase (solidificação)

4.1 Introdução

Este Capítulo apresenta o modelo matemático utilizado para a solução de transferência de calor com mudança de fase no interior de uma cápsula esférica, submersa em um fluido de transferência de calor. Este tipo de problema é diferente e mais complexo do que os problemas usuais de condução, devido ao movimento da interface sólida-líquida quando o calor é absorvido na própria interface. Haja vista que a localização da interface não é conhecida a priori, e as propriedades térmicas, assim, como os campos de temperatura dos meios sólidos e líquidos são diferentes. A Figura 4.1 apresenta o desenho esquemático do comportamento da solidificação do material de mudança de fase no interior da cápsula. Formulações matemáticas presentes neste capítulo serão usadas nos capítulos posteriores na forma discretizada.

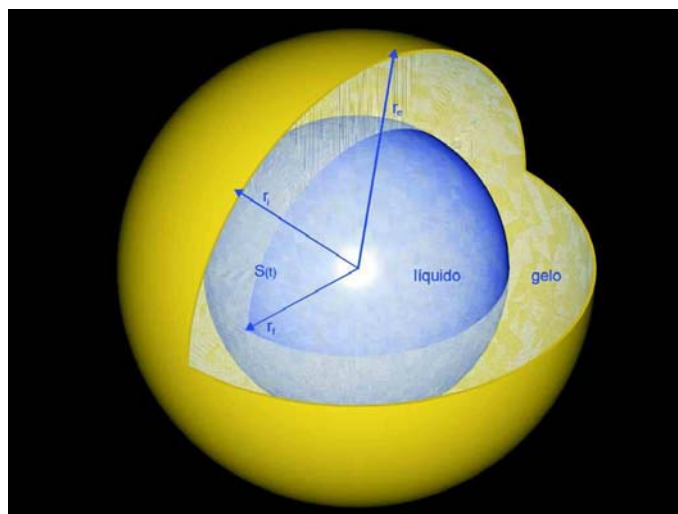


Figura 4.1: Comportamento da frente de solidificação em uma geometria esférica

4.2 Descrição do problema

O problema considerado é o da solidificação de um líquido, confinado numa cápsula esférica de raio r , inicialmente na temperatura T_i . A esfera é resfriada por um fluido a temperatura constante T_∞ . A transferência de calor é entre a parede da esfera e o fluido e é controlada pelo coeficiente de película h considerado constante.

Ao começar o processo numa temperatura inicial T_i que é maior que a temperatura de mudança de fase T_m o que garante que o PCM está na forma líquida, inicia-se o experimento. Em seguida, circula-se o refrigerante **R-22** dentro de uma serpentina de cobre, passando por uma válvula de expansão e trocando calor com o álcool contido no tanque de congelamento $T_{et} < T_m$. Com isso o PCM no interior da cápsula solidificará formando duas regiões: uma na fase sólida $T_{sol} < T_m$ e uma outra a jusante $T_{liq} > T_m$ na fase líquida. As regiões formadas são divididas por uma interface sólida-líquida bem definida, com temperatura constante a temperatura de mudança de fase. Um outro aspecto, também, a ser tratado é que na proporção que o tempo passa a interfase sólido-líquido avança na direção radial para dentro da cápsula. Entretanto algumas hipóteses estão sendo consideradas para a solução do problema:

- Não há geração volumétrica de energia;
- Propriedades termofísicas isotrópicas e constantes em cada fase;
- Distribuição de temperatura axialmente simétrica;
- Condução apenas na direção radial;
- Troca de calor é somente por condução;
- Coeficiente de película constante;
- O material de mudança de fase é puro, portanto a temperatura de mudança de fase é fixa.

4.3 Equações governantes e condições de contorno

4.3.1 Equação da energia

Considerando as hipóteses acima tem-se a equação da condução de calor em coordenadas esféricas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C p} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad 0 < r < r_i \quad (4.1)$$

onde $\frac{k}{\rho C p}$ = difusividade térmica efetiva do PCM na fase sólida ou líquida.

Observar-se que a equação da energia é de primeira ordem no tempo e na direção r , na qual precisa-se de uma condição inicial temporal e uma outra espacial. Na direção de r , há uma de segunda ordem que deverá ser estabelecida por duas condições de contorno nesta direção.

Como condição contorno tem-se:

$$r = r_i \quad Q = -kA \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4.2)$$

onde Q é obtida no balanço de energia usando o modelo de resistência térmica mostrada em seguida na Figura 4.2.

$$Q = \frac{(T_\infty - T_{int})}{\frac{1}{4\pi k_{esf}} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_e} \right) + \frac{1}{4\pi h r_e^2}} = \frac{4\pi(T_\infty - T_{int})}{\frac{r_e - r_i}{k_{esf} r_i \cdot r_e} + \frac{1}{h \cdot r_e^2}} \quad (4.3)$$

$$r = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4.4)$$

Como pode ser observado na Figura 4.1 durante o processo de solidificação a fase sólida e líquida coexistem e são separadas pela interface de mudança de fase. Considerando que a equação da condução de calor é que controla o processo de transferência em ambas as fases, portanto, pode-se escrever para o domínio líquido a equação:

$$\frac{\partial T_{liq}}{\partial t} = \frac{k_{liq}}{\rho C p} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T_{liq}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{liq}}{\partial r^2} \right] \quad 0 < r < r_f \quad (4.5)$$

e para o domínio sólido:

$$\frac{\partial T_{sol}}{\partial t} = \frac{k_{sol}}{\rho C p} \left[\frac{2}{r} \frac{\partial T_{sol}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{sol}}{\partial r^2} \right] \quad r_f < r < r_i \quad (4.6)$$

As condições de contorno para solução das equações são:

$$r = 0 \quad \frac{\partial T_{liq}}{\partial r} = 0 \quad (4.7)$$

$$r = r_i \quad -k_{liq}A \frac{\partial T_{liq}}{\partial r} = Q \quad (4.8)$$

$$r = r_f \quad T_{liq} = T_{sol} = T_m \quad (4.9)$$

e

$$-(-k_{liq} \frac{\partial T_{liq}}{\partial r}) + (-k_{sol} \frac{\partial T_{sol}}{\partial r}) = -\rho_{sol}L \frac{dr}{dt} \quad (4.10)$$

4.3.2 Desenvolvimento das condições iniciais e de contorno

No início do processo de solidificação é necessário determinar a primeira camada solidificada durante o primeiro instante da solidificação, assumindo que a troca de calor é entre o fluido externo e a cápsula que, no entanto, é o calor usado para formar a primeira camada solidificada. Então, o balanço de energia para este caso proposto será

$$Q_f = -\rho L \frac{dV}{dt} = -4\pi\rho L r_f^2 \frac{dr_f}{dt} \quad (4.11)$$

onde Q_f é o calor entregue pela cápsula, V é o elemento de volume solidificado e r_f é a posição da interface. O calor entregue pela cápsula pode alternativamente ser calculado, utilizando o conceito de resistência térmica como indicado na Figura 4.2.

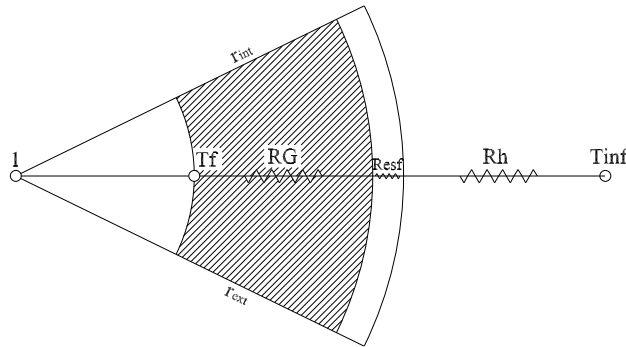


Figura 4.2: Esquema em forma de resistências térmicas.

Escrevendo as equações temos:

$$Q_f = \frac{T_f - T_\infty}{R_{esf} + R_h + R_{sol}} \quad (4.12)$$

onde

$$R_G = \frac{r_i - r_f}{4\pi r_i r_f k_{sol}} \quad (4.13)$$

$$R_{esf} = \frac{r_e - r_i}{4\pi k_{esf} r_f} \quad (4.14)$$

$$R_h = \frac{1}{4\pi r_e^2 h} \quad (4.15)$$

Igualando as duas equações 4.11 e 4.12 em Q_f temos:

$$-4\pi\rho L r f^2 \frac{dr_f}{dt} = \frac{T_f - T_\infty}{R_{esf} + R_h + R_{sol}} \quad (4.16)$$

Integrando a equação anterior e fazendo algumas manipulações:

$$\frac{r_f^2}{2r_i} - \frac{r_f^3}{3r_i^2} + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} \frac{r_f^3}{r_i^2} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_i} \frac{r_f^3}{r_e^2} + \mathbf{C} = -\frac{(T_f - T_\infty) k_{sol}}{\rho L} \frac{t}{r_i} \quad (4.17)$$

Assumindo, também, que o balanço de energia acima é válido somente para o primeiro instante, onde considera-se que $t \rightarrow 0$ e $r_f \rightarrow r_i$. Desse modo, aplicando está condição para a equação 4.17 é determinado o valor da constante $\mathbf{C}$

$$\mathbf{C} = -\left[\frac{r_i}{6} + \frac{r_i k_{sol}}{3 k_{esf}} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_i} \frac{r_i^3}{r_e^2} \right] \quad (4.18)$$

Substituindo a expressão de $\mathbf{C}$ na equação 4.17, obtemos

$$r_i \left[\frac{r_f^2}{2r_i^2} - \frac{r_f^3}{3r_i^3} + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} \frac{r_f^3}{r_i^3} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_i^2} \frac{r_f^3}{r_e^2} \right] - \left[\frac{r_i}{6} + \frac{r_i}{3} \frac{k_{sol}}{k_{esf}} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_i} \frac{r_i^3}{r_e^2} \right] \quad (4.19)$$

Introduzindo uma nova variável na equação acima

$$S(t) = 1 - \frac{r_f}{r_i}$$

$$\frac{r_f}{r_i} = 1 - S(t) \quad (4.20)$$

Da equação 4.19 tem-se:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{(1 - S(t))^2}{2} - \frac{(1 - S(t))^3}{3} + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} (1 - S(t))^3 \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_i} + \frac{(1 - S(t))^3}{r_e^2} r_i^2 \right] - \\ & - \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \frac{k_{sol}}{k_{esf}} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{k_{sol}}{3hr_i} \frac{r_i^3}{r_e^2} \right] = - \frac{(T_f - T_\infty) k_{sol}}{\rho L} \frac{1}{r_i} t \end{aligned} \quad (4.21)$$

Considerando as variáveis adimensionais:

$$\tau = \frac{\alpha t}{r_i^2} \quad (4.22)$$

$$t = \frac{r_i^2 \tau \rho C_p}{k_{sol}} \quad (4.23)$$

$$Bi = \frac{hr}{k_{sol}} \quad (4.24)$$

$$Ste = \frac{C_p(T_f - T_\infty)}{L} \quad (4.25)$$

Introduzindo na equação 4.21, tem-se:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{(1-S(t))^2}{2} - \frac{(1-S(t))^3}{3} + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}}(1-S(t))^3 \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{1}{Bi} \frac{(1-S(t))^3}{3r_e^2} r_i^2 \right] - \\ & - \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \frac{k_{sol}}{k_{esf}} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) + \frac{1}{3Bi} \frac{r_i^3}{r_e^2} \right] = -Ste.\tau \end{aligned} \quad (4.26)$$

ou

$$\begin{aligned} \tau = \frac{1}{Ste} & \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{3Bi} \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^2 (1 - (1-S(t)))^3 + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} (1 - (1-S(t)))^3 \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) \right] - \\ & - \frac{1}{Ste} \left[(1-S(t))^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{(1-S(t))}{3} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.27)$$

No início do processo de solidificação $S(t) \ll 1$, assim, a equação 4.27, torna-se:

$$\tau = \frac{1}{Ste} (1 - (1-S(t))^3) \left[\frac{1}{3Bi} \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^2 + \frac{k_{sol}}{3k_{esf}} \left(\frac{r_e - r_i}{r_e} \right) \right] \quad (4.28)$$

Capítulo 5

Análise Numérica

Neste capítulo será apresentado o modelo numérico utilizado nas simulações. Nas equações foram realizadas a discretização, utilizando diferenças finitas na forma implícita em coordenadas esféricas e, o sistema algébrico resolvido a partir do algoritmo de Thomas.

5.1 Sistemas de equações em diferenças finitas

5.1.1 Método de solução

Como a maioria das equações dos fenômenos de transporte de energia estão na forma diferencial e devem ser resolvidas simultaneamente para simular o processo de formação de gelo dentro da cápsula esférica, as mesmas devem ser transformadas em equações diferenças.

Pela natureza parabólica da equação da energia e o caráter radial das equações da condução foi empregado o método de diferenças finitas e a solução numérica do sistema de equações diferenciais são convertidas em equações diferenças. Deste modo, a partir desta informação, as equações são discretizadas da seguinte forma:

- Equação da condução para a região sólida (gelo);
- Equação da condução para a região líquida.

5.2 Equações na forma adimensional

No processo de formação de gelo existem duas regiões bem definidas quando o PCM não estiver completamente solidificado. Entretanto, a sua natureza dinâmica devido às duas regiões (sólido e líquido) provocam uma diferença de espaços ao longo da região radial, conforme a frente de soli-

dificação avança para o centro da cápsula. Para solucionar o problema será utilizado a técnica da malha móvel para trabalhar os dois domínios. Acrescentando duas variáveis adimensionais, temos:

$$x = 1 - \frac{r}{r_i} \quad \theta = \frac{T - T_\infty}{T_f - T_\infty} \quad (5.1)$$

Transformando a equação 4.1 na forma adimensional

$$\frac{\partial \theta_{liq}}{\partial \tau} = \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \left[\frac{2}{x} \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta_{liq}}{\partial x^2} \right] \quad 0 \leq x \leq S(t) \quad (5.2)$$

Para a região sólida

$$\frac{\partial \theta_{sol}}{\partial \tau} = \frac{2}{1-x} \frac{\partial \theta_{sol}}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta_{sol}}{\partial x^2} \quad S(t) \leq x \leq 1 \quad (5.3)$$

Para as condições de contorno teremos:

$$\theta_{liq} = \theta_{sol} = 1 \quad x = S(t) \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial \theta_{sol}}{\partial x} = \frac{\theta_{int}}{\frac{k_{sol}}{k_{esf}} \frac{r_e - r_i}{r_e} + \frac{1}{Bi} \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^2} \quad x = 1 \quad (5.5)$$

Sabendo-se que θ_{int} é a temperatura adimensionalizada na interface entre a superfície interna e o PCM.

Para o balanço de energia na interface sólido-líquido a sua forma adimensional é

$$Ste \frac{\partial \theta_{sol}}{\partial x} - Ste \frac{k_{liq}}{k_{sol}} \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial x} = \frac{dS(t)}{d\tau} \quad (5.6)$$

As equações diferenças para a região sólida e para líquido, sob um esquema de malha regular variável são obtidas através da derivada substancial da temperatura com respeito ao tempo, que por sua vez é aplicada ao processo de condução de calor com mudança de fase em coordenadas esféricas. No entanto as equações podem ser descritas em relação a θ_{sol} e θ_{liq} em função do tempo

e da coordenada em x e a coordenada x de cada ponto N da malha em função do tempo t . Pode-se aplicar a derivada de θ_{sol} e θ_{liq} com respeito ao tempo, através da regra da cadeia:

$$\frac{d\theta_{sol,liq}}{d\tau} = \frac{\partial\theta_{sol,liq}}{\partial x} \frac{dx}{d\tau} + \frac{\partial\theta_{sol,liq}}{\partial\tau} \quad (5.7)$$

A posição dos pontos arbitrários dentro da grade na região sólida é dada por:

$$x_i = \frac{i}{N} S(t) \quad (5.8)$$

A mudança na posição do ponto x_i no tempo devido a mudança do tamanho da grade, pode ser escrita como:

$$\frac{dx_i}{d\tau} = \frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \quad (5.9)$$

Combinando as equações 5.9, 5.10 e 5.7, obtém a relação:

$$\frac{\partial\theta_{sol}}{\partial\tau} = \frac{\partial^2\theta_{sol}}{\partial x^2} + \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1-x} \right) \frac{\partial\theta_{sol}}{\partial x} \quad (5.10)$$

Escrevendo a equação 5.10 em diferenças finitas

$$\frac{\theta_{sol,i}^{t+1} - \theta_{sol,i}^t}{\Delta\tau} = \frac{\theta_{sol,i+1}^{t+1} - 2\theta_{sol,i}^{t+1} + \theta_{sol,i-1}^{t+1}}{\Delta x^2} + \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1-x} \right) \frac{\theta_{sol,i+1}^{t+1} - \theta_{sol,i-1}^{t+1}}{2\Delta x} \quad (5.11)$$

Organizando os termos da equação acima

$$\begin{aligned} \theta_{sol,i}^t = & \left[\frac{\Delta\tau}{2\Delta x} \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1-x} \right) - \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \right] \theta_{sol,i-1}^{t+1} + \left[1 + \frac{2\Delta\tau}{\Delta x^2} \right] \theta_{sol,i}^{t+1} - \\ & - \left[\frac{\Delta\tau}{2\Delta x} \left(\frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} - \frac{2}{1-x} \right) + \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \right] \theta_{sol,i+1}^{t+1} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Substituindo $\Delta x = \frac{S(t)}{N}$ na equação 5.12, tem-se

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

$$\dots \theta_{sol,i}^t + \left[\frac{N}{2S(t)} \left(\frac{2}{1 - \frac{iS(t)}{N}} - \frac{i}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \right) - \left(\frac{N}{S(t)} \right)^2 \right] \Delta\tau \theta_{sol,i+1}^{t+1} \quad (5.13)$$

A equação acima é válida para os pontos entre 2 e N da malha na região sólida e no ponto $N+1$ a temperatura é específica que é igual a temperatura de mudança de fase, como mostra o esquema da Figura 5.1, dada pela equação 5.4.

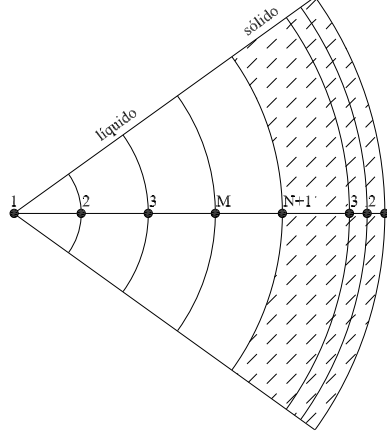


Figura 5.1: Grade utilizada para discretização das equações governantes.

Utilizando a equação 5.7 para a região líquida e a equação 5.2 e 5.9 teremos:

$$\frac{\partial \theta_{liq}}{\partial \tau} = \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \frac{\partial^2 \theta_{liq}}{\partial x^2} + \left[\frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \frac{2}{x} - \frac{x}{1 - S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\partial \theta_{liq}}{\partial x} \quad (5.14)$$

Discretizando a função no ponto genérico

$$\begin{aligned} \frac{\theta_{liq,i}^{t+1} - \theta_{liq,i}^t}{\Delta\tau} &= \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \left[\frac{\theta_{liq,i+1}^{t+1} - 2\theta_{liq,i}^{t+1} + \theta_{liq,i-1}^{t+1}}{\Delta x^2} \right] + \left(\frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \frac{2}{x} - \frac{x}{1 - S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right) \dots \\ &\dots \left[\frac{\theta_{liq,i+1}^{t+1} + \theta_{liq,i-1}^{t+1}}{2\Delta x} \right] \end{aligned} \quad (5.15)$$

Isolando o valor de θ , tem-se:

$$\theta_{liq,i}^t = \left[\frac{1}{\Delta x x} - \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{2\Delta x} \frac{x}{1 - S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \Delta\tau \theta_{liq,i+1}^{t+1} + \left[\frac{2\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} + 1 \right] \theta_{liq,i}^{t+1} +$$

$$+ \left[\frac{1}{\Delta x} - \frac{1}{\Delta x^2} - \frac{1}{2\Delta x} \frac{x}{1-S(t)} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \Delta\tau \theta_{liq,i-1}^{t+1} \quad (5.16)$$

Modificando o valor da equação acima por $\Delta x = \frac{1-S(t)}{N}$:

$$\begin{aligned} \theta_{liq,i}^t &= \left[\frac{1}{(i-1)\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta x^2} - \frac{1}{2\Delta x} \frac{(i-1)}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \Delta\tau \theta_{liq,i-1}^{t+1} + \left[1 + \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \frac{2\Delta\tau}{\Delta x^2} \right] \theta_{liq,i}^{t+1} + \\ &+ \left[\frac{1}{(i-1)\Delta x^2} - \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{2\Delta x} \frac{(i-1)}{N} \frac{dS(t)}{d\tau} \right] \frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \Delta\tau \theta_{liq,i+1}^{t+1} \end{aligned} \quad (5.17)$$

A equação é válida para as temperaturas de 2 até N na região líquida. Para os nós 1 e 2 temos a equação na forma adimensional

$$\theta_{liq,1}^t = \left(1 + 24 \left(\frac{\alpha_{liq}}{\alpha_{sol}} \right) \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \right) \theta_{liq,1}^{t+1} + \left(1 + 24 \frac{\Delta\tau}{\Delta x^2} \right) \theta_{liq,2}^{t+1} \quad (5.18)$$

5.3 Fração de massa solidificada

Inicialmente foi calculado a massa total do material de mudança de fase em uma esfera e a sua parcela que ainda esteja na fase líquida. Em seguida foi determina qual seria a massa total do material de mudança de fase quando estivesse completamente solidificado e, foi comparado com a massa do material de mudança de fase solidificada calculada anteriormente.

$$M_{sol,t} = \left[\frac{4}{3} \pi (r_i^3 - r_f^3) \right] \rho_{sol} \quad (5.19)$$

Para a massa total solidificada do PCM

$$M_{total} = \left[\frac{4}{3} \pi r_i^3 \right] \rho_{sol} \quad (5.20)$$

A fração de massa solidificada é

$$FM_t = \frac{M_{sol,t}}{M_{total}} \quad (5.21)$$

5.4 Simulação do processo de solidificação

5.4.1 Número de pontos da grade

Os testes numéricos foram realizados para otimizar os cálculos numéricos e obter um melhor refinamento do tamanho da grade. Na Figura 5.2, temos o comportamento do número de pontos na direção radial em função do tempo operacional quando ocorreu a solidificação completa do material de mudança de fase. Analisando o gráfico observamos que a partir de 30 pontos há uma tendência a estabilizar o tempo adimensional, assim, pode-se concluir que o ponto a ser escolhido para direção radial foi de 30 e consequentemente este valor foi usado em todas as simulações numéricas.

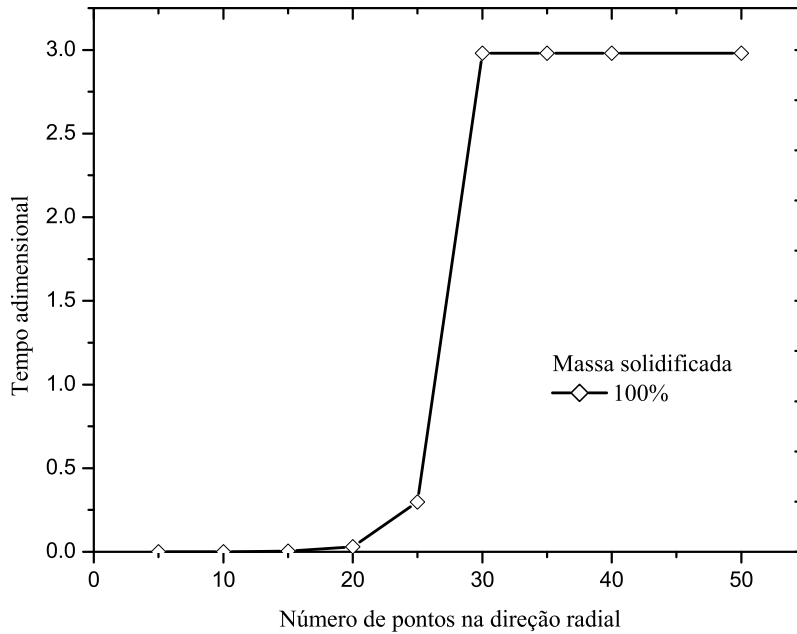


Figura 5.2: Avaliação do número de pontos na direção radial

As Figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 mostram a variação da temperatura no centro da cápsula esférica no tempo para diâmetros de 106 mm em temperaturas do banho de -5°C , -12°C , -15°C e -20°C . Observa-se que as curvas apresentam super resfriamento antes de iniciar a solidificação. Em seguida, por um longo período de tempo até a solidificação atingir o centro da cápsula esférica, inicia-se um período de resfriamento por calor sensível. Este tipo de comportamento foi observado por Bédécarrats (1996) e Ismail e Henríquez (2002). Os resultados comparativos entre a numérica e experimental apresentaram boa concordância, sendo que a região de super resfriamento no início e fim do processo foram negligenciados. Notou-se, também, que a temperatura experimental está sempre abaixo dos dados numéricos para uma determinada faixa de tempo.

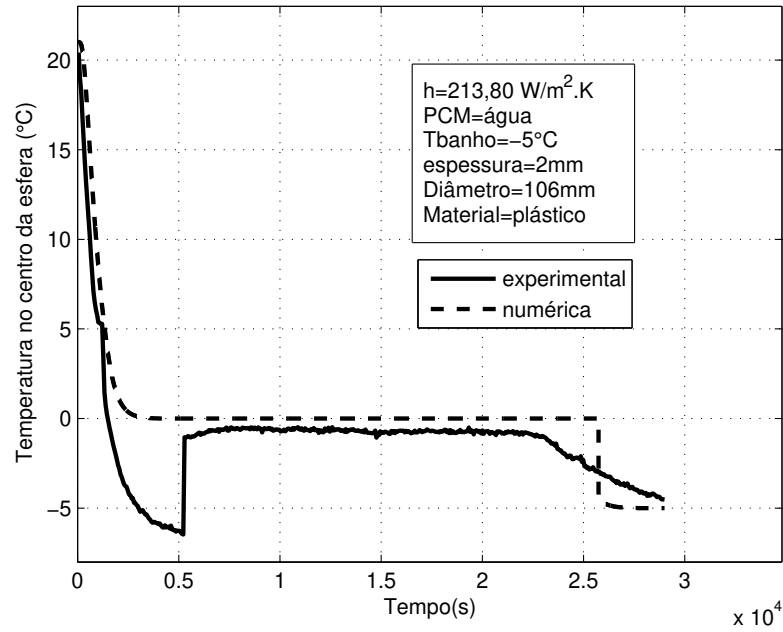


Figura 5.3: Variação da temperatura no centro da esfera no tempo

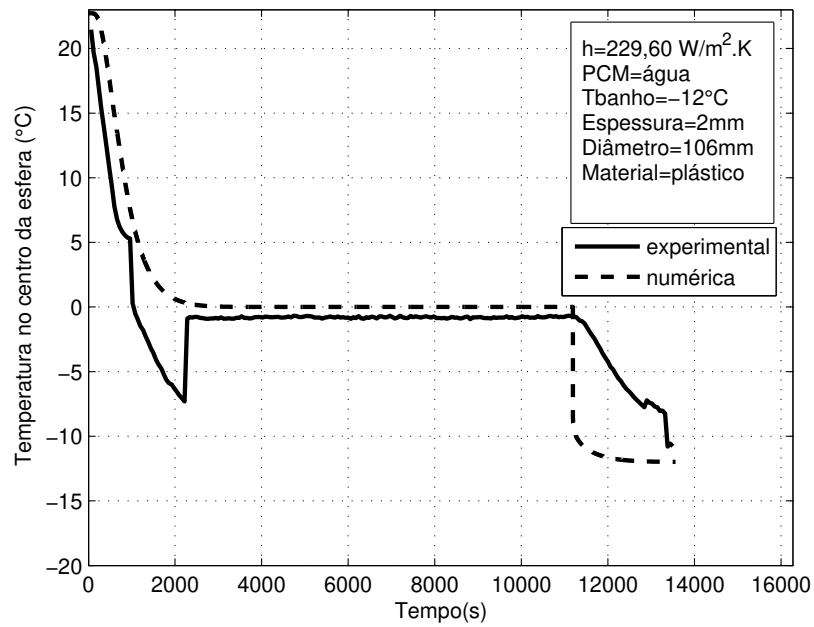


Figura 5.4: Variação da temperatura no centro da esfera no tempo

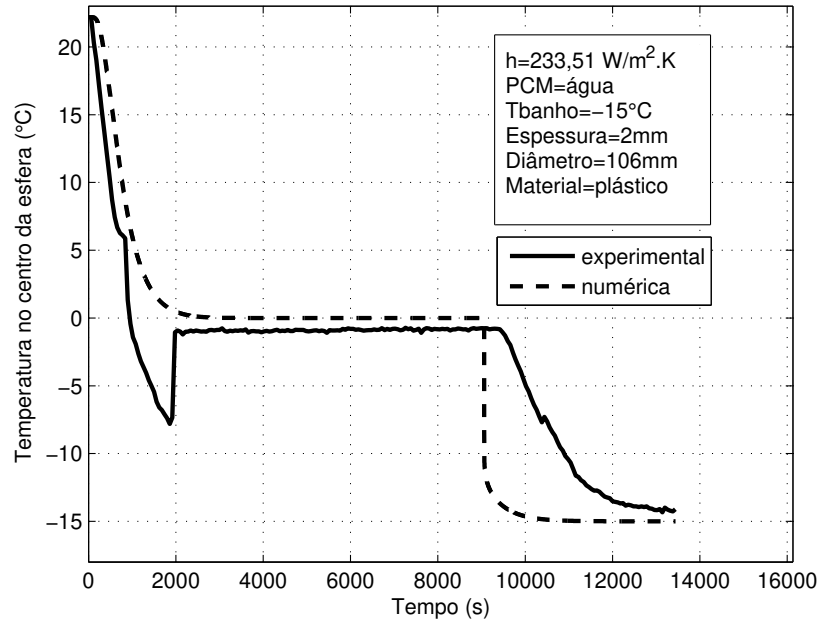


Figura 5.5: Variação da temperatura no centro da esfera no tempo

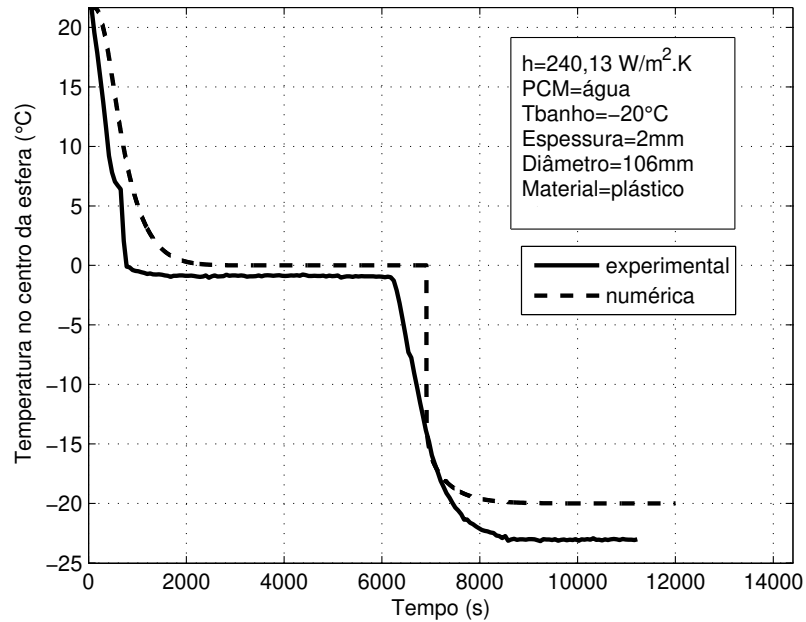


Figura 5.6: Variação da temperatura no centro da esfera no tempo

Na Figura 5.7 foi observado a posição da interface no tempo. A curva apresenta um desvio maior em temperaturas de superfície maiores devido ao baixo coeficiente de película no processo de solidificação. Pode-se notar que o crescimento da interface praticamente não foi afetada pelas condições de contorno exterior, devido ao efeito do material da cápsula nos primeiros instantes de tempo.

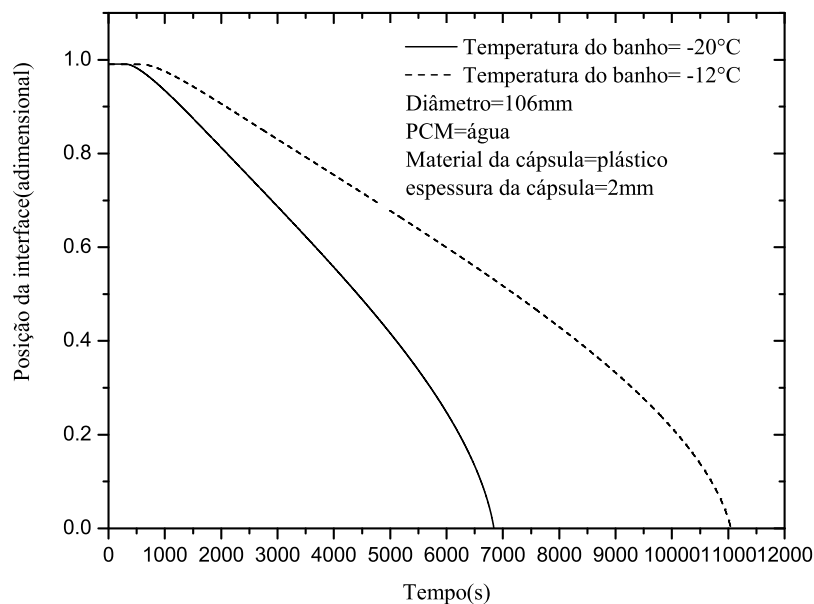


Figura 5.7: Variação da posição da interface no tempo com relação as temperatura de banho de -12 e -20 °C.

Na Figura 5.8 observa-se o efeito da temperatura de banho na fração de massa solidificada. Observou-se também que o tamanho da cápsula, neste caso, tem grande influência sobre o tempo de solidificação completa, por causa do volume de massa a ser solidificada Figura (5.9). Para este caso, em armazenadores de energia, é mais econômico utilizar cápsulas de 106 mm para formar a massa solidificada do que em cápsulas de 131 mm, em virtude da solicitada exigência que o sistema de refrigeração necessita para formar o frio dentro das cápsulas nos tanques de congelamento.

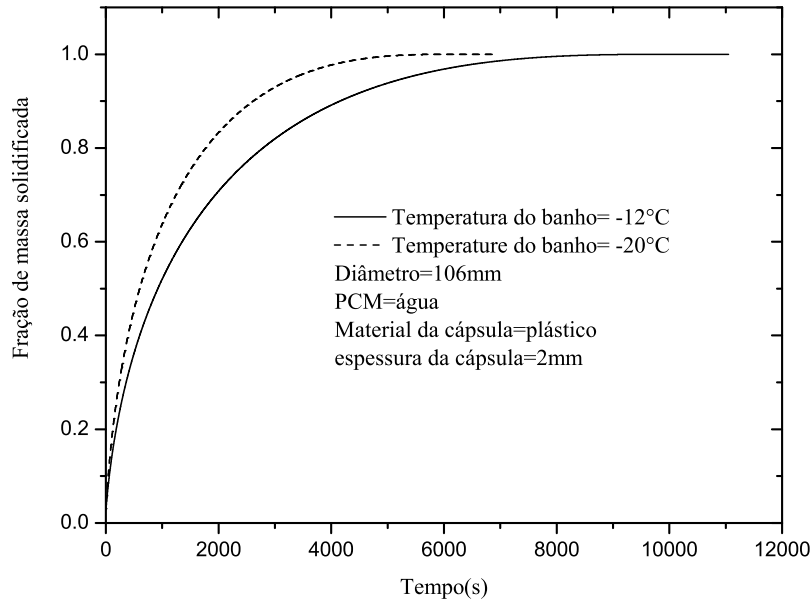


Figura 5.8: Variação da fração de massa solidificada no tempo com relação as temperaturas de banho de -12 e -20°C .

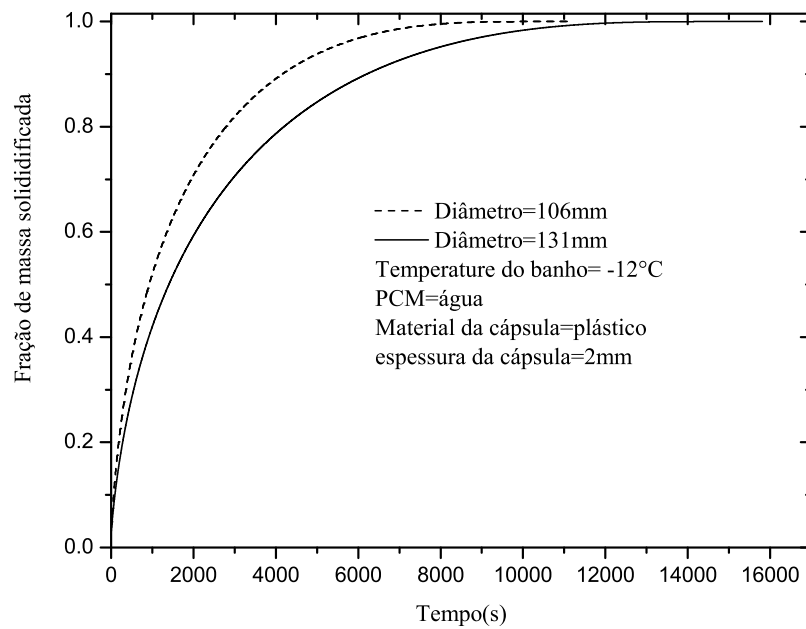


Figura 5.9: Variação da fração de massa solidificada no tempo com relação aos tamanhos das cápsulas

A Figura 5.10 representa a velocidade da frente de solidificação, onde se nota uma queda bastante rápida pelo fato da camada solidificada oferecer uma resistência térmica cada vez maior,

difficultando à retirada de calor pelo fluido de trabalho. A velocidade da frente de solidificação correspondente é calculada no balanço térmico na interface em cada passo de tempo e se torna nula no instante em que a frente atinge o centro da cápsula na posição radial.

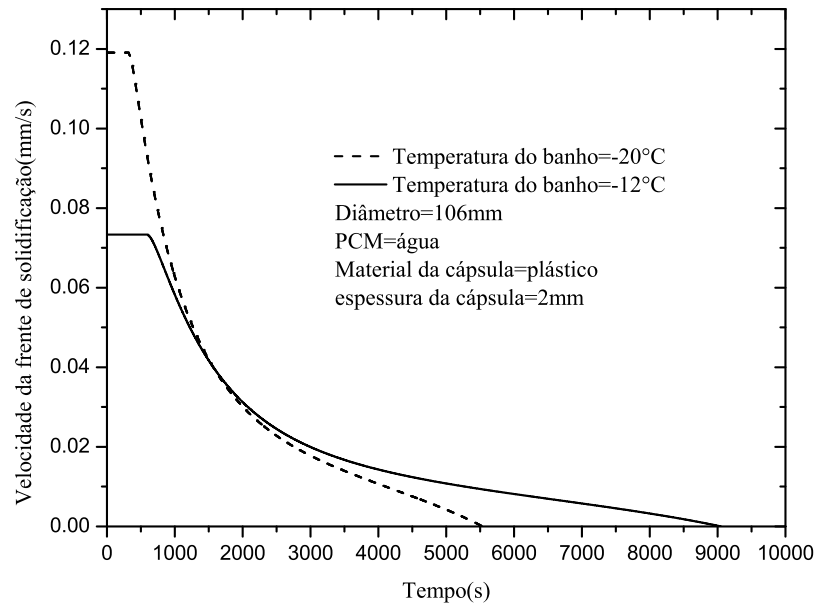


Figura 5.10: Velocidade da frente de solidificação.

Capítulo 6

Resultados e discussão

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados dos testes experimentais feitos nas cápsulas cilíndrica (recipientes recicláveis) e esférica com o material de mudança de fase (PCM). As propriedades termofísicas do material mudança de fase (água), a condutividade das cápsulas são dados nas Tabelas 6.1, 6.2. Para o Polietilenoglicol os dados das propriedades termofísicas não são fornecidos na literatura especializada, inviabilizando a simulações com as concentrações utilizadas nos testes, mas seu uso mostrou um grande potencial em sistemas de baixa temperatura.

Tabela 6.1: Propriedades termofísicas da água

Material de mudança de fase (água)	
Condutividade térmica (fase líquida)	0,56 W/mK
Condutividade térmica (fase sólida)	2,25 W/mK
Calor específico (fase líquida)	4210 J/kgK
Calor específico (fase sólido)	2040 J/kgK
Calor latente	333400 J/kg
Densidade (fase líquida)	999,80 kg/m^3
Densidade (fase sólida)	917,80 kg/m^3

Tabela 6.2: Condutividade térmica dos materiais

Material da cápsula	k
Plástico	0,35 W/mK
Vidro	1,4 W/mK

6.1 Cápsulas esféricas

Como foi observado no Capítulo 3, foram realizados testes de medidas de temperaturas em função do tempo. O tempo de duração dos experimentos variaram entre 0,25 a 19 horas. O

fator mais importante para limitar o tempo de solidificação no interior da cápsula foi o controle da temperatura do fluido de trabalho que se tornava cada vez mais crítico com a redução da temperatura.

6.1.1 Efeito da variação da quantidade de polietilenoglicol no PCM

Os materiais usados como PCM nos testes foram: água e uma mistura de água e polietilenoglicol. Os testes realizados usando encapsulados esféricos de plástico e de vidro com diferentes concentrações, são mostrados na Figura 6.1. A variação da temperatura de mudança de fase da mistura foi linear com a quantidade de polietilenoglicol que é feita nos testes. Esta relação de linearidade é útil para avaliar rapidamente a temperatura de mudança de fase de novas misturas.

Na Figura 6.2, é apresentada o efeito da variação do PCM no tempo de solidificação completa. No presente caso, a concentração foi variada enquanto as outras variáveis do processo mantiveram-se constantes. A quantidade de polietilenoglicol na mistura testada foi de 7,5; 15; 30 e 50 %. Foi observado que quando a temperatura da superfície é reduzida o tempo de solidificação completa diminui. Da forma inversa, aumentando a quantidade de polietilenoglicol na água, o tempo de solidificação completa aumenta em aproximadamente 30000 s.

Na Figura 6.3 observa-se que a variação do tempo de solidificação completa foi afetada pela temperatura do fluido de trabalho para duas quantidades de polietilenoglicol, quando colocadas no interior da cápsula de vidro.

6.1.2 Efeito da variação do tamanho da cápsula esférica

A Figura 6.4 mostra o efeito da variação do diâmetro da cápsula esférica no tempo de solidificação completa. Foi verificado que o tempo de solidificação aumenta drasticamente com o aumento do diâmetro da cápsula. No caso de cápsulas esféricas de 76 mm de diâmetro, a variação do tempo de solidificação foi relativamente pequena para uma determinada faixa de temperatura do fluido de trabalho. A transferência de calor dominante causada neste caso é a condução. O fluxo convectivo cresce fortemente com o aumento do tamanho da cápsula, predominando a transferência de calor por convecção.

6.1.3 Efeito da temperatura do fluido de trabalho

A Figura 6.5, mostra um resumo do resultado experimental para quatro cápsulas esféricas de diferentes tamanhos, sujeitas a diferentes temperaturas de fluido de trabalho. Observa-se que o

tempo de solidificação completa foi marginalmente afetada pela temperatura do fluido de trabalho ou quando o tamanho da cápsula está abaixo de 76 mm de diâmetro. Em outras palavras, o efeito no tempo de solidificação completa é bastante acentuado em cápsulas de 106 e 131 mm de diâmetro. Este fenômeno foi verificado para baixas temperaturas utilizadas nos testes experimentais.

6.1.4 Efeito do material da cápsula esférica

O estudo do efeito com o material vidro e plástico foi realizado a partir de algumas condições de trabalho, tais como: PCM e a temperatura do fluido. A Figura 6.6, mostra o efeito da variação de dois parâmetros: efeito do material da cápsula no tempo de solidificação e a influência do PCM. Foi observado que o tempo de solidificação com o vidro foi menor que com o plástico. Isso é bastante evidente por causa da condutividade térmica do material. Testes realizados com cápsulas metálicas confirmaram os resultados.

A Figura 6.7 mostra o efeito da condutividade térmica do material. Como pode ser observado o tempo de solidificação aumenta com o aumento da temperatura do fluido de trabalho.

6.2 Cápsulas cilíndricas (materiais recicláveis)

Para o caso das cápsulas cilíndricas, o objetivo foi de encontrar um material barato e reciclável para utilizá-lo como recipiente para o encapsulamento do material de mudança de fase. Testes foram realizados com latas de refrigerantes e garrafas de água comercial com PCM no interior. Ver Apêndice-B.

A Figura 6.8 mostra a temperatura no centro da cápsula (garrafa de água comercial). Os resultados indicaram que a mudança na temperatura de banho e a quantidade de polietilenoglicol, também, influenciam no tempo de solidificação, devido ao avanço da camada solidificada no interior da cápsula. Observou-se também que há um decaimento bastante rápido da temperatura que corresponde a uma zona de super resfriamento do PCM no interior da cápsula cilíndrica.

Na Figura 6.9 mostra a variação do tempo de solidificação com a concentração de polietilenoglicol. Como pode-se verificar, o aumento da quantidade de polietilenoglicol aumenta o tempo de solidificação, como já tinha sido observado em resultados anteriores com as cápsulas esféricas.

Os resultados com cápsulas de plástico mostraram-se quase com a mesma tendência aos da lata de refrigerante, Figura 6.10. Este comportamento entre as duas cápsulas cilíndricas, se diferenciam apenas no tempo de solidificação, devido ao efeito da condutividade térmica do material. Zonas de

super resfriamento são observados em alguns experimentos, devido a rápida troca de calor naquela região que passa a retirar calor sensível da massa solidificada.

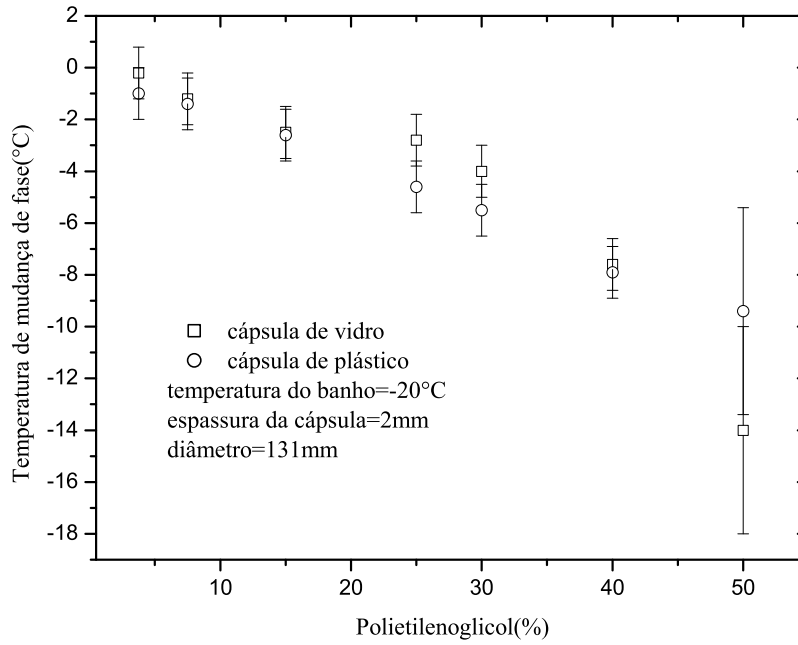


Figura 6.1: Temperatura de mudança de fase em função da concentração de polietilenoglicol para diferentes materiais das cápsulas.

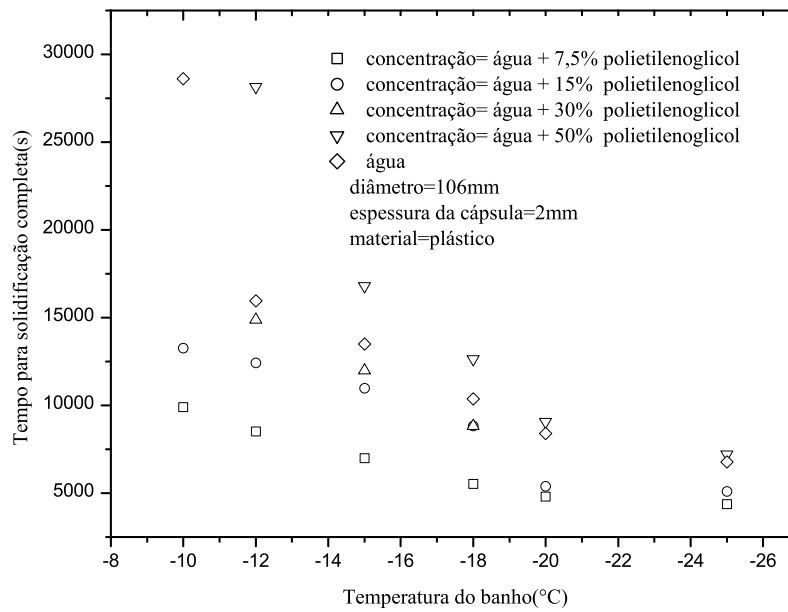


Figura 6.2: Variação do tempo para solidificação completa na temperatura de banho para diferentes concentrações de polietilenoglicol.

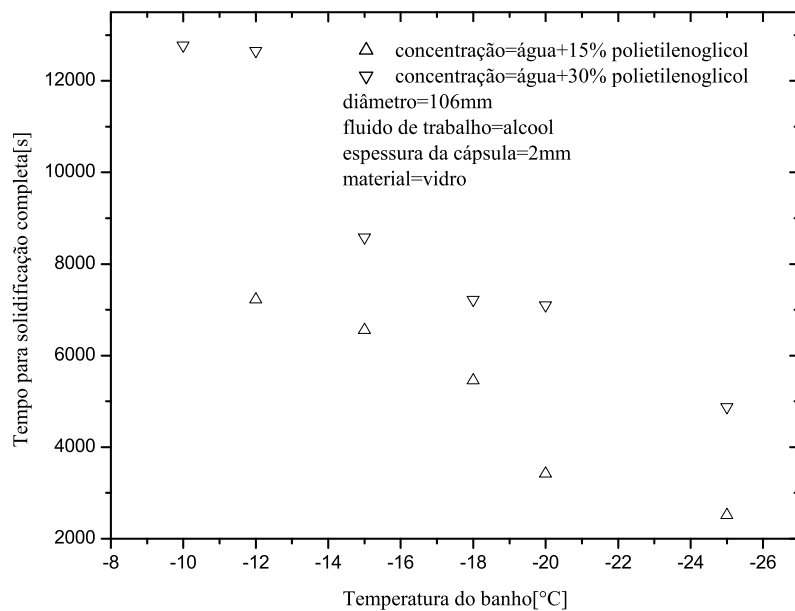


Figura 6.3: Variação do tempo para solidificação completa na temperatura de banho para diferentes concentrações de polietilenoglicol.

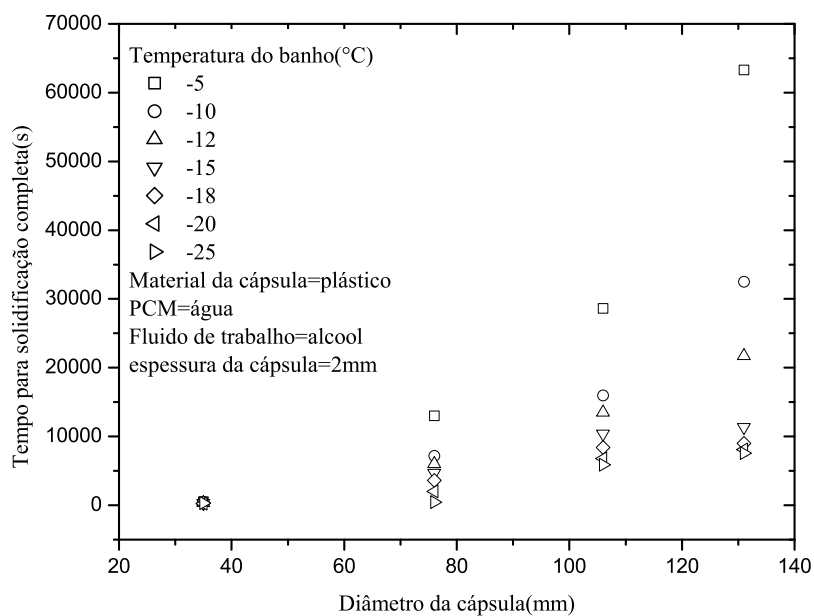


Figura 6.4: Variação do tempo para solidificação completa no diâmetro para diferentes temperaturas de banho.

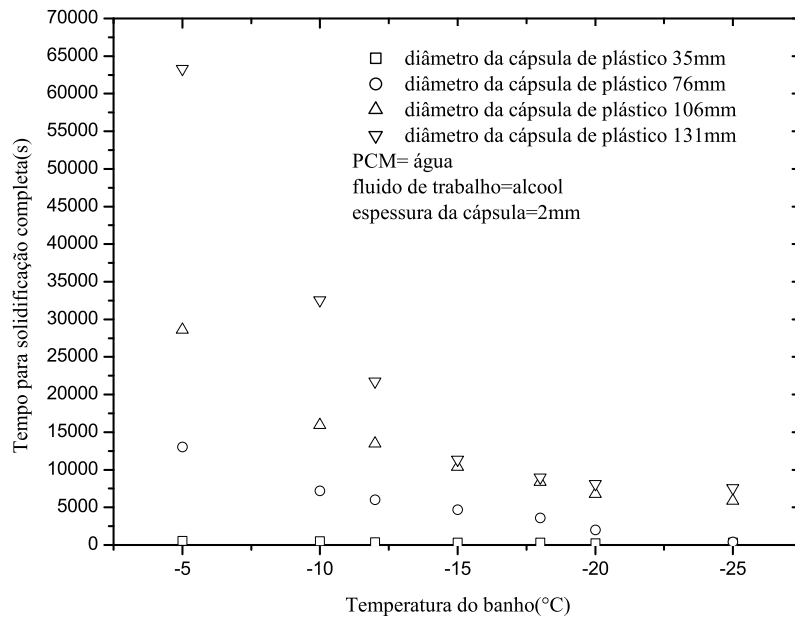


Figura 6.5: Variação do tempo para solidificação completa na temperatura de banho para diferentes diâmetros.

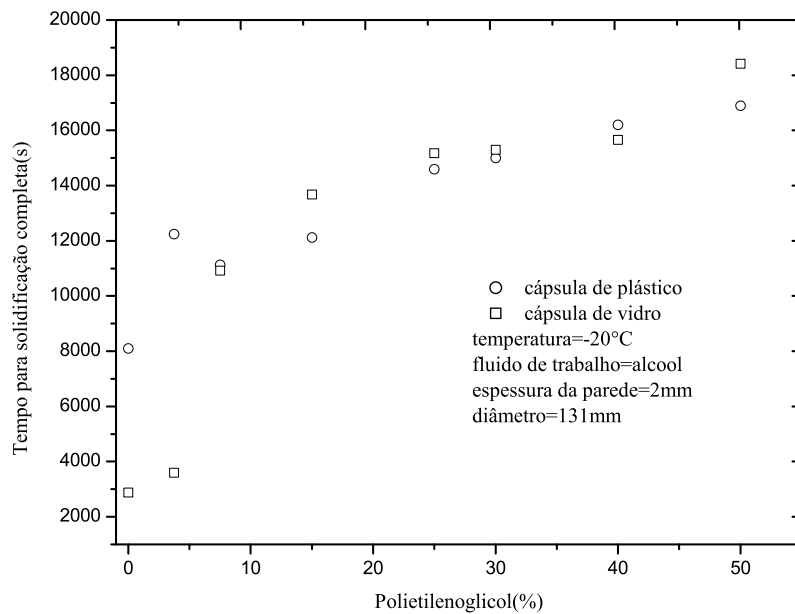


Figura 6.6: Tempo para solidificação completa em função da concentração de polietilenoglicol para diferentes materiais das cápsulas.

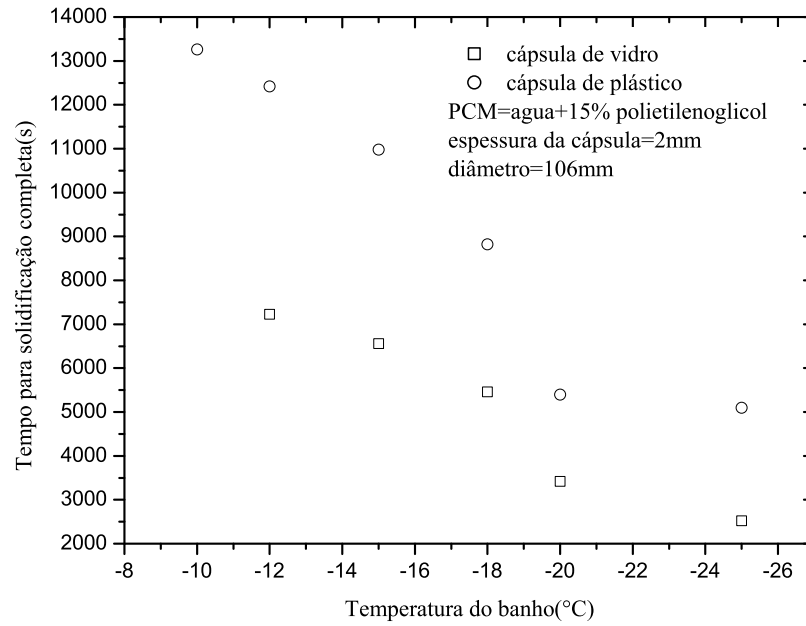


Figura 6.7: Efeito da condutividade térmica no tempo de solidificação completa.

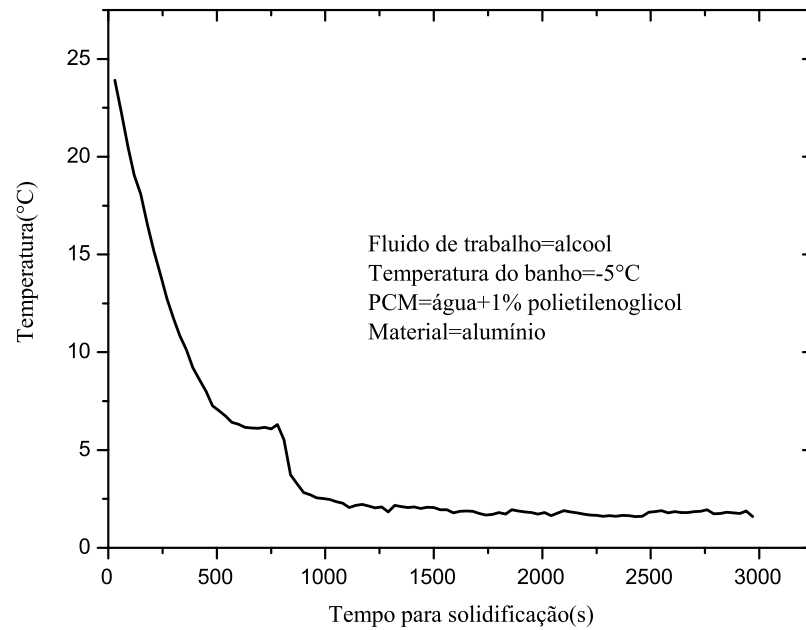


Figura 6.8: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa.

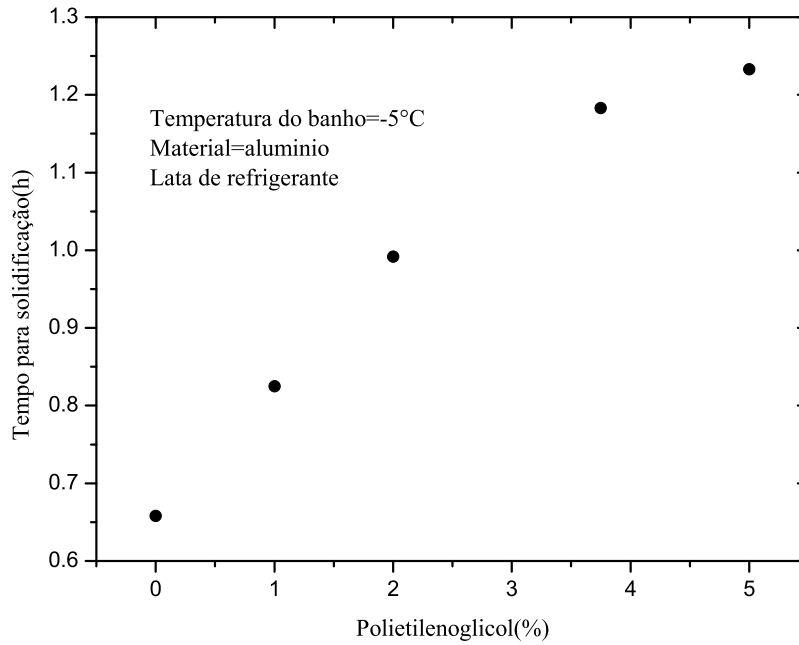


Figura 6.9: Variação do tempo para solidificação na concentração de polietilenoglicol.

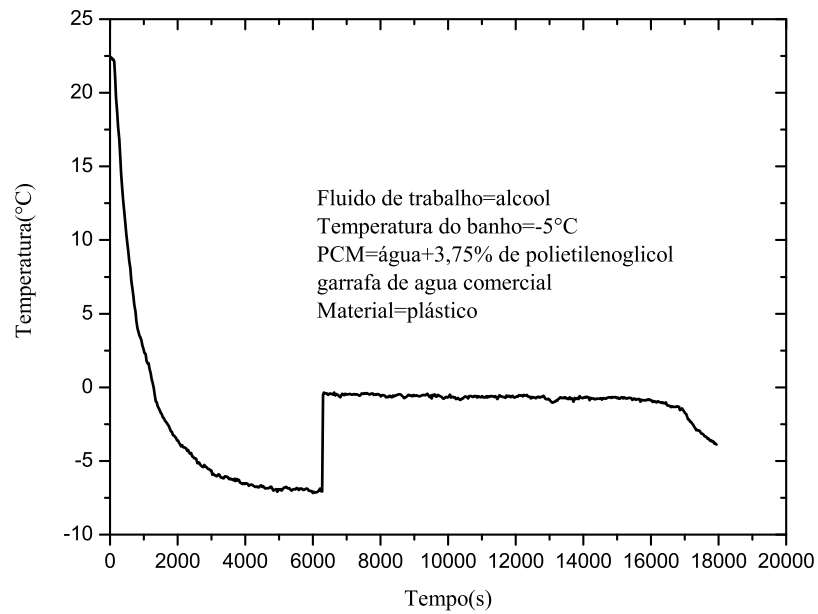


Figura 6.10: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa.

Capítulo 7

Conclusão

O tempo de solidificação completa representa um dos parâmetros mais importantes na operação dos armazenadores de calor latente, portanto com os resultados do presente trabalho foi possível apresentar as seguintes conclusões:

1. Com relação ao método numérico utilizado, pode-se concluir que a comparação da temperatura no centro da esfera ao longo do tempo usando diferenças finitas, ficaram bastante próximos com os resultados experimentais, utilizando uma correlação de fluxo de calor constante.
2. O aumento da concentração de polietilenoglicol na mistura conduz a redução da temperatura de mudança de fase, alcançando -15°C . Consequentemente o aumento da concentração de polietilenoglicol no PCM, aumentou o tempo de solidificação completa.
3. O efeito do tamanho da cápsula, influencia no aumento do tempo de solidificação completa, devido a maior massa a ser solidificada no interior da cápsula. Para cápsulas de 76 mm de diâmetro o aumento é relativamente pequeno, predominando a transferência de calor por condução.
4. Mantendo-se o tamanho da cápsula e mudando a condutividade termica, observou-se um forte efeito no tempo de solidificação do PCM.
5. Com o aumento do tamanho da cápsula para 131 mm, a convecção na região líquida se desloca em direção a frente de solidificação, aumentando o tempo de solidificação completa em até 60000 s.
6. O efeito da temperatura do fluido de trabalho na taxa de solidificação foram estudados. Foi verificado que a temperatura do fluido reduz o tempo de solidificação completa.

Capítulo 8

Sugestões para trabalhos futuros

Portanto, como sugestões para trabalhos futuros e para continuidade a este estudo sugerimos que seja investigado e modelado a região de super resfriamento e analisado o efeito da gravidade na convecção natural em cápsulas esféricas. Outro trabalho que deve ser feito para o aprimoramento do estudo é uma bancada de teste para armazenar energia fria, utilizando cápsulas esféricas e recipientes recicláveis com PCM no seu interior. O layout da bancada de teste é apresentada na Figura 8.1. São utilizados no interior do armazenador, cápsulas esféricas, latas de alumínio e garrafas recicláveis com PCM. Pois, este estudo torna-se relevante para aprimorar a tecnologia de armazenadores e dimensionar de forma otimizada as cápsulas para testes, sem desperdiçar energia para gerar o congelamento completo do material de mudança de fase, a serem utilizados na climatização de ambientes.



Figura 8.1: Armazenador de energia

Referências

- Akio, Saito. (2002). Review-Recent advances in reserarch on cold thermal energy storagy. *International journal of refrigeration*, 25:177-189.
- Abugderah, Mabruk Mansur. Análise de solidificação em geometrias cilíndricas e a sua aplicação em armazenadores térmicos. *Faculdade de engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas*, 1999.P.112, Tese (Mestrado)
- Assis, E. Katsman, L. Zisking e G. Letan, R. (2007). Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. *International journal of heat and mass transfer*, 50:1790-1804.
- Bilir, levent. e Ilken, Zafer. (2005). Total solidification time of a liquid phase change material enclosure in cylindrical/spherical containers *Applied Thermal Engineering*, 25:1488-1502.
- Barba, A. e Spiga, M. (2003). Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks. *Solar energy*, 74:141-148.
- Bairi, Abderrahmane e Laraqi, Najib. (2003). Diagrams for fast transient conduction in sphere and long cylinder subject to sudden an violent thermal effects on its surface. *Applied thermal engineering*, 123:1373-1390.
- Bédécarrats, J. P., Strub, F., Falcon, B. e Dumas, J. P. (1996). Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant. *International journal refrigeration*, 19:187-196.
- Caldwell, James e Chan, Ching-Chuen. (2000). Spherical solidification by the enthalpy method and and the heat balance integral method. *Applied mathematical modelling*, 24:45-53.
- Cho, Keumnam e Choi, S.H. (2000). Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes. *International journal of heat and mass transfer*, 43:3183-3196.

- Ettouney, Hisham. Alatiqi, Imad. Al-Sahali, Mohammad. e Al-Hajirie, Khalida. (2006). Heat transfer enhancement in energy storage in spherical capsules filled with paraffin wax and metal beads. *Energy conversion and management*, 47:211-228.
- Eams, Ian W. e Adref, Kamal T. (2002). Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type use in thermal (ice) storage systems. *Applied thermal engineering*, 22:733-745.
- Farid, Mohammed M., Khudhair, Amar M., Razack, Sinddique Ali e Al-Hallaj, Said. (2004). Review - A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy conversion and management*, 45:1597-1615.
- Figliota, R.S. e Beasley, D.E. (2000). *Theory and design for mechanical measurements*. John Wiley and Sons Inc., New York, 536p.
- Formin S.A. e Saitoh T.S. (1999). Melting of unfixed material in spherical capsules with non-isothermal wall. *International journal of heat and mass transfer*, 42:4197-4205.
- Hammou, Zouhair Ait. e Lacroix, Marcel. (2006). A hybrid thermal energy storage system for managing simultaneously solar and electric energy. *Energy conversion and management*, 47:273-288.
- Ismail, K. A. R e Moraes, R. I. R. (2007). *Análise experimental da solidificação completa em geometrias esféricas*. In: CIBIM (8o Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica), Cusco, Peru.
- Ismail, K .A .R., Henriquez, J. R. e da Silva, T. M. (2003). A parametric study on ice formation inside a spherical capsule. *International journal of thermal science*, 42:881-887.
- Ismail, K .A .R., Henriquez, J.R. (2003). Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system. *Applied thermal engineering*, 22:1705-1716.
- Ismail, K. A. R. e Henriquez, J.R. (2000). Solidification of pcm inside a spherical capsule. *Applied mathematical modelling*, 41:173-187.
- Ismail, Kamal A. R. (1998). *Bancos de gelo: fundamentos e aplicações*. Campinas, SP: Ed. do autor.

- Jesus, Antonio Batista. Estudo Numérico da Solidificação em Geometria Anular. *Faculdade de engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas*, 1998.P.116, Tese (Mestrado)
- Kousksou, T. Bédécarrats, J.P. Dumas e J.P. Mimet, A. (2005). Dynamics modelling of the storage of an encapsulated ice tank. *Applied Thermal Engineering*, 25:1534-1548.
- Khodadadi, J. M. e Zhang, Y. (2001). Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers. *International journal of heat and mass transfer*, 44:1605-1618.
- Koizumi, H. (2004). Time and spatial heat transfer performance around an isothermally heated sphere in a uniform, downwardly directed flow (in relation to the enhancement of latent heat storage rate in a spherical capsule). *Applied Thermal Engineering*, 24:2583-2600.
- Liao, Shijun., Su, Jian. e Chwang, Allen T. (2006). Series solutions for a nonlinear model of combined convective and radiative cooling of spherical body. *International journal of heat and mass transfer*, 49:2437-2445.
- Lin, Sui. e Jiang, Zheng. (2003). An improved quasi- steady analysis for solving freezing problems in a plate, cylinder and sphere. *Journal of heat transfer*, 125:1123-1128.
- Moraes, R. I. R e Ismail, K. A. R . (2007). *Estudo do armazenamento de energia por calor latente em cápsulas esféricas de plástico para bancos de gelo*. In: UNIVAP (VI Encontro Latino Americano de Pós Graduação), São José dos Campos, Brasil.
- Monteiro, J. H. P. *et al.* (2001). *Manual de Gerenciamento Integral de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, RJ: Ed. IBAM.
- Nallusamy, N. Sampath e S. Velraj, R. (2007). Experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage integrated with constant/varying (solar) heat sources. *Renewable energy*, 32:1207-1227.
- Revankar, Shripad T. e Croy, Travis. (2006). Visualization study of the shrinkage void distribution in thermal energy storage capsules of different geometry. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31:181-189.
- Strub, M., Jabbour, O., Strub, F. e Bédécarrats, J.P. (2003). Experimental study and modelling of the crystallization of a water droplet. *International journal of refrigeration*, 26:59-68.

- Stoeker, W. F e Jones J. W. (2002) Apostila "Guia de eficiência Energética nas Micro, Pequenas e Médias empresas", Energia Brasil. *Refrigeração Industrial*, capítulo 12, McGraw Hill.
- Stoeker, W. F. (1958). Refrigeration and Air Conditioning. Mc Graw-Hill Book Company, Inc., New York.
- Vargaftik, N.B., Filipov, L.P., Tarzimanov, A.A. e Totskii, E.E. (1994). *Thermal conductivity of liquid and gases*. Boca Roton , CRC Press, Inc.
- Wei, Jinjia., Kawagushi, Yauo., Hirano, Satoshi. e Takeuchi, Hiromi. (2005). Study on a PCM heat storage system for rapid heat supply. *Applied Thermal Engineering*, 25:2903-2920.
- Wilchinsky, Alexander V., Formin, Sergei A. e Hashida, Toshiyuki. (2003). Contact melting inside an elastic capsules. *International journal of heat and mass transfer*, 45:4097-4106.
- Yuksel, Numan., Avci, Atakan e kilic, Muhsin. (2006). A model for latent heat energy storage systems. *International journal of energy research*, 30:1146-1157.
- Zelba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F e Mehling, H. (2003). Review of thermal energy storage with phase: material, heat transfer analysis and aplications. *Applied thermal engineering*, 23:251-283.

Apêndice - A

A.1 - Descrição do Cálculo do coeficiente de película do etanol (h_{et})

$$h_{et} = \frac{\overline{N}_{uD} k_{et}}{Dia}$$

onde k_{et} varia entre $0,173 \frac{W}{mK}$ a temperatura de $280K$ a $0,183 \frac{W}{mK}$ a temperatura de $240K$, segundo Vergaftik et al. (1994), e o diâmetro da cápsula esférica é de $Dia = 131$ e 106 mm.

O número de Nusselt N_{uD} para a condição de temperatura superficial prescrita é determinada por uma correlação:

$$\overline{N}_{uD} = 2 + \frac{0,589 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{[1 + (\frac{0,469}{Pr})^{\frac{9}{16}}]^{\frac{4}{9}}}$$

onde $Ra_D = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)Dia^3}{\alpha\nu}$, T_w é a temperatura da superfície externa e T_∞ é a temperatura do fluido de trabalho.

Segundo Vergaftik et al. (1994) para o etanol μ_{et} varia de $1,786 \times 10^{-3}$ a $0^\circ C$ até $3,262 \times 10^{-3}$ a $-25^\circ C$, $\rho_{et} = 789,30 \frac{Kg}{m^3}$ e $C_{pet} = 2955,26 \frac{J}{Kg.K}$.

Apêndice - B

B.1 - Resultados da solidificação do PCM em materiais recicláveis

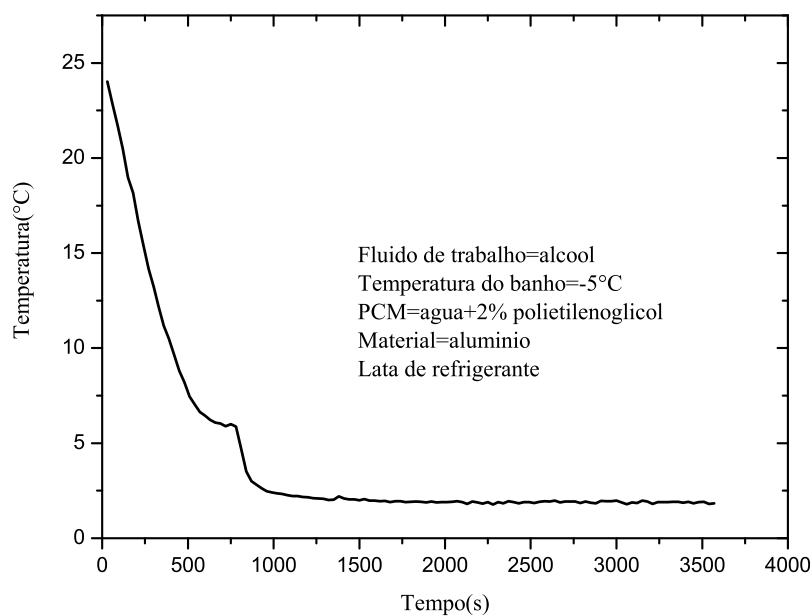


Figura 8.2: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

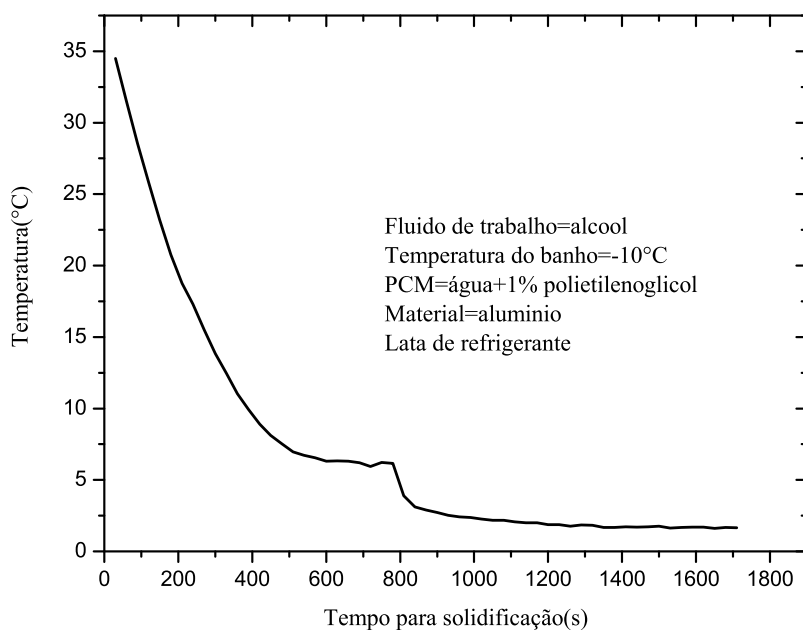


Figura 8.3: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

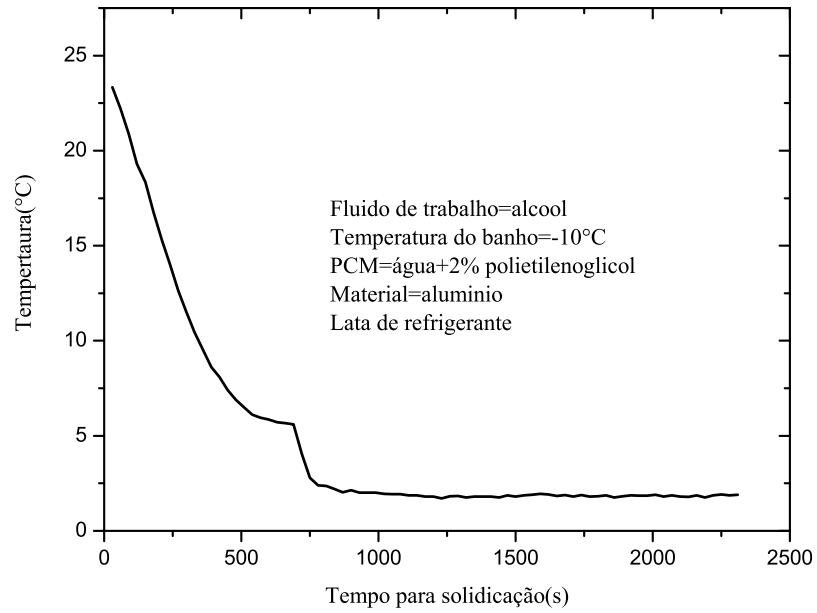


Figura 8.4: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

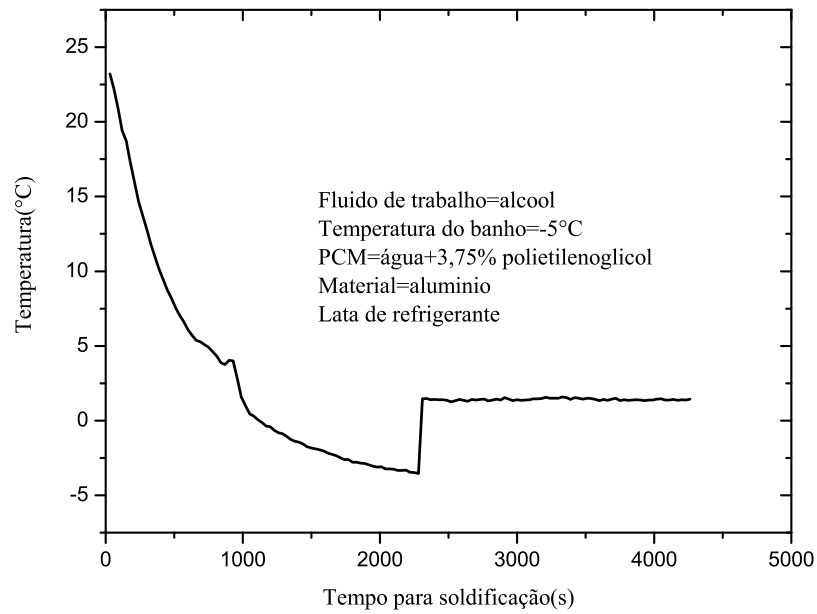


Figura 8.5: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

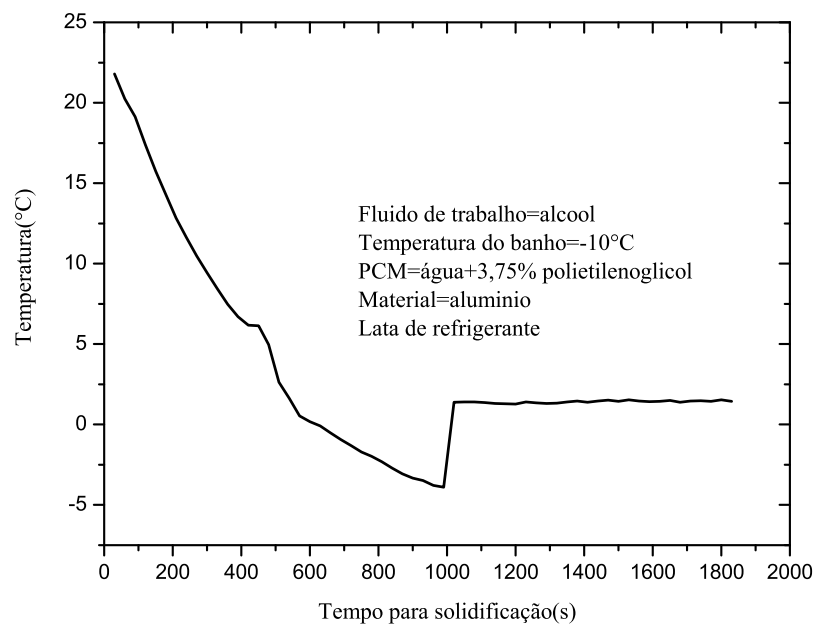


Figura 8.6: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

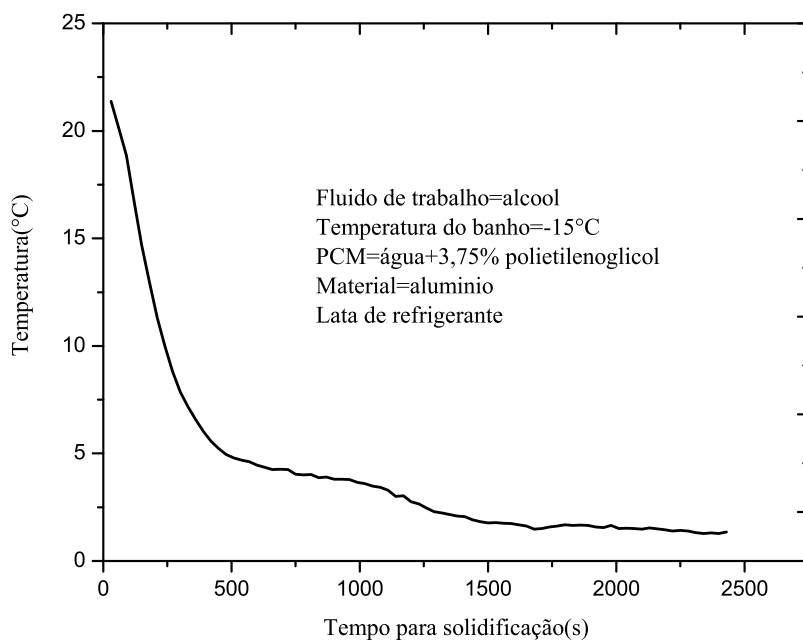


Figura 8.7: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

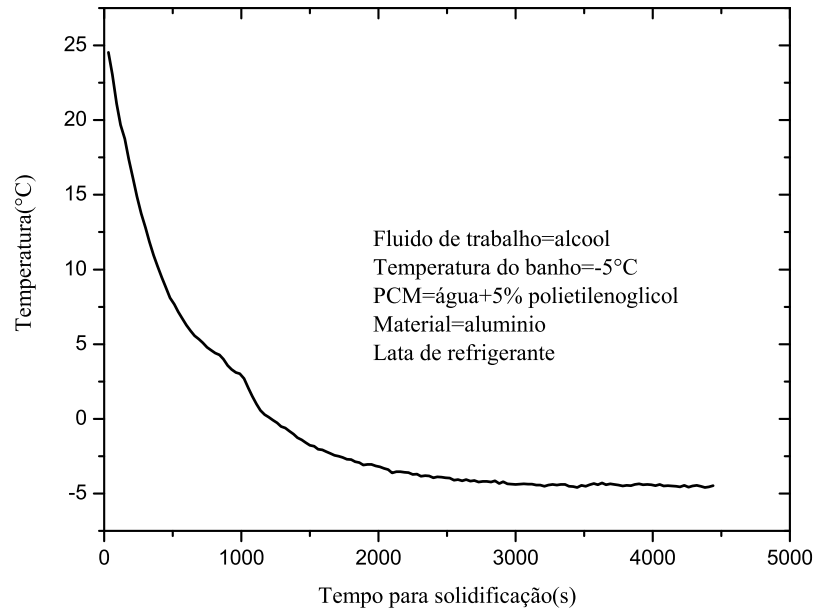


Figura 8.8: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

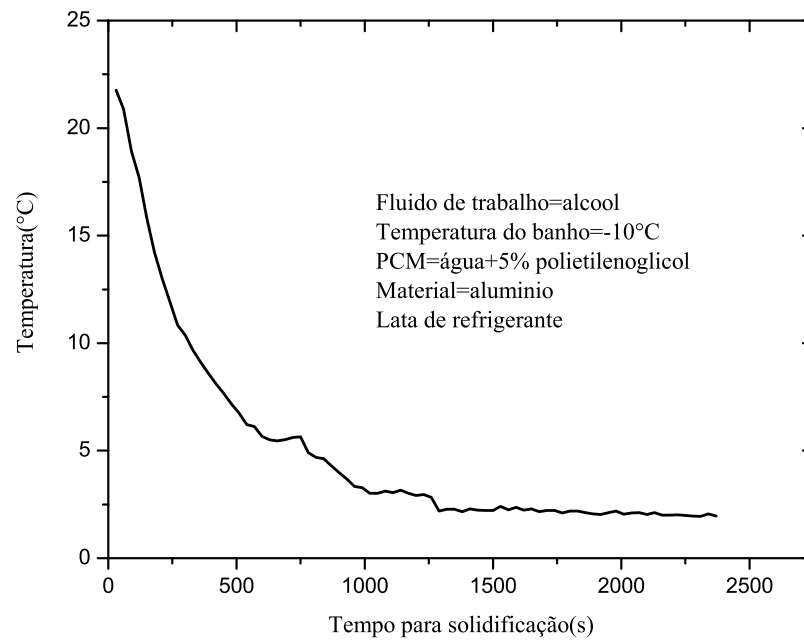


Figura 8.9: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

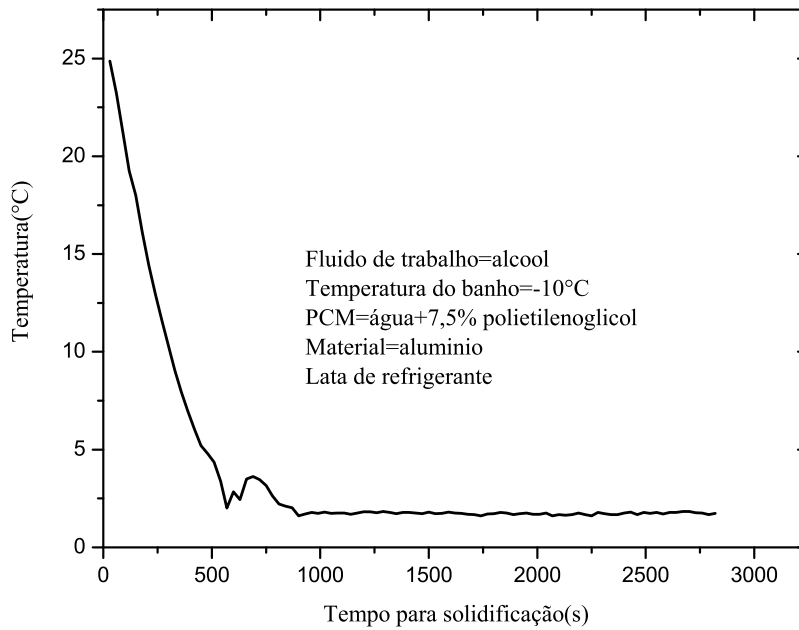


Figura 8.10: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

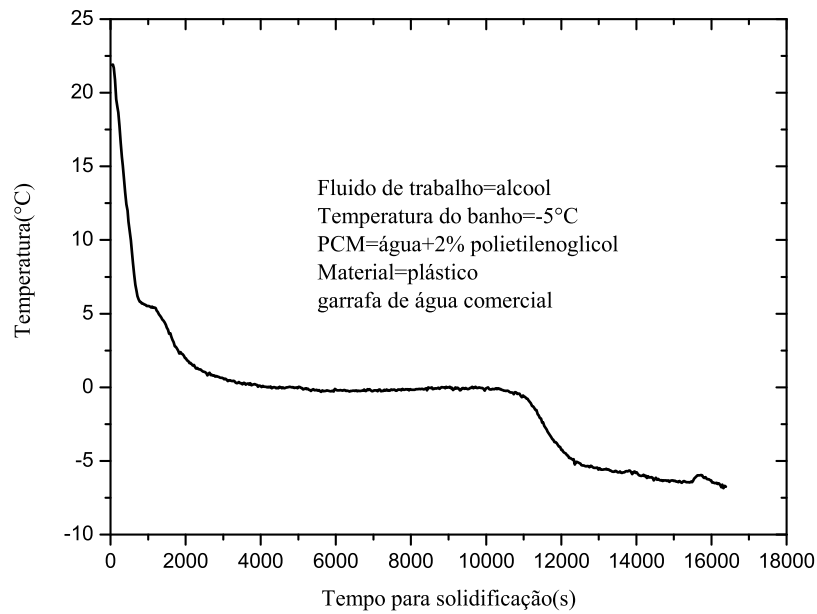


Figura 8.11: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

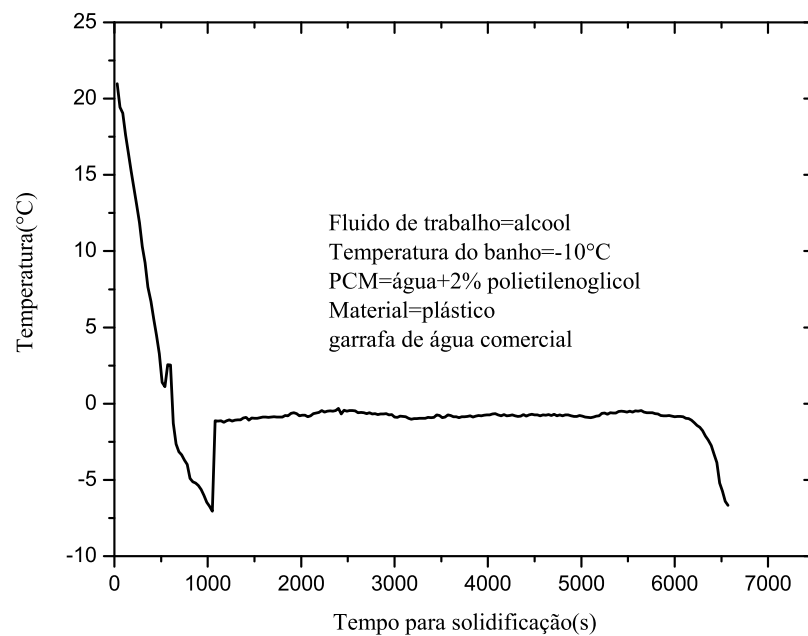


Figura 8.12: Variação da temperatura no tempo para solidificação completa

Apêndice - C

C.1 - Curvas de calibração dos termopares

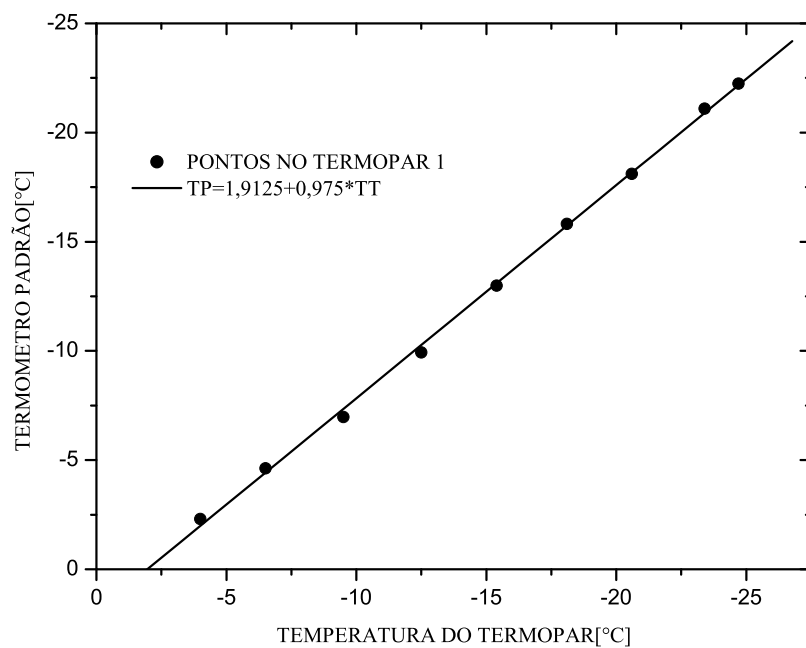


Figura 8.13: Curva de calibração para o termopar 1

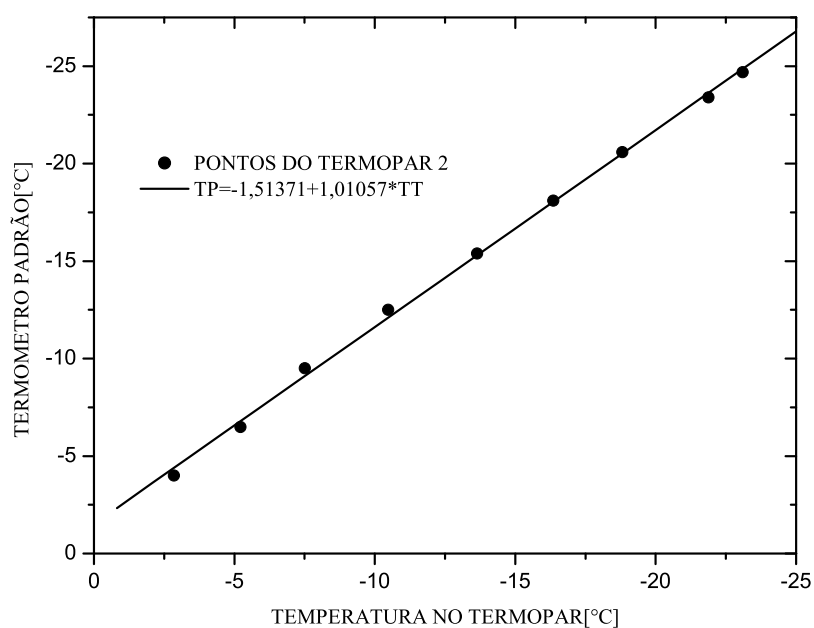


Figura 8.14: Curva de calibração para o termopar 2

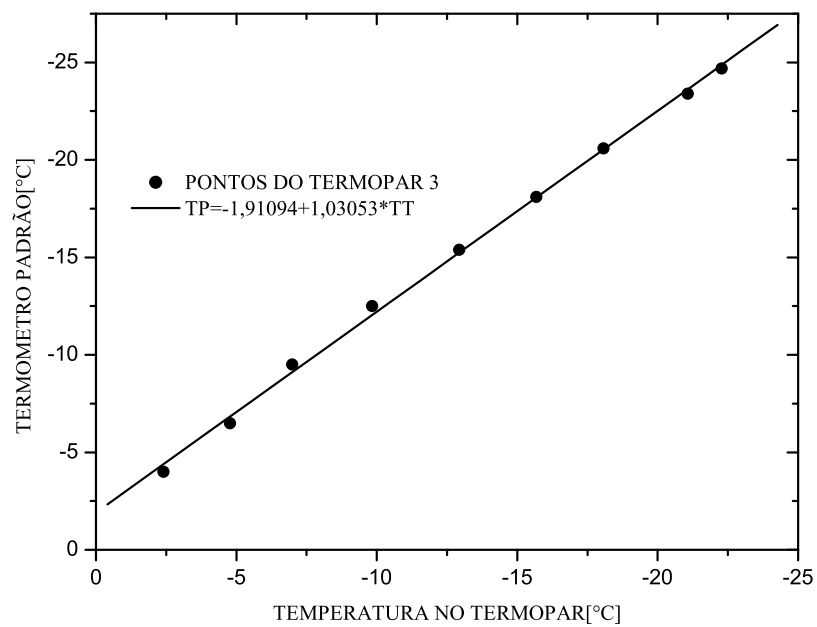


Figura 8.15: Curva de calibração para o termopar 3

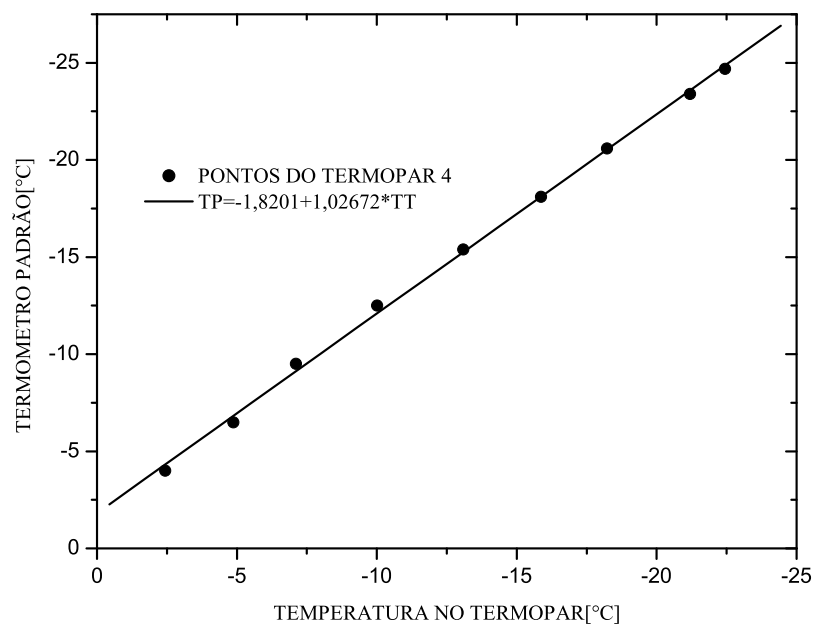


Figura 8.16: Curva de calibração para o termopar 4

Apêndice - D

D.1 - Distribuição dos ensaios

Tabela 8.1: Alguns parâmetros para execução dos experimentos

esfera de plástico(mm)	131	106	76	35
Número de experimentos	27	21	7	7
Número de concentrações	7	7	0	0
Número de Temperatura do banho	7	7	7	7
esfera de vidro(mm)	131	106		
Número de experimentos	21	11	0	0
Número de concentrações	7	7	0	0
Número de Temperatura do banho	5	6	0	0
garrafa plástica				
Número de experimentos	3			
Número de concentrações	2			
Número de Temperatura do banho	1			
latas de alumínio				
Número de experimentos	10			
Número de concentrações	5			
Número de Temperatura do banho	3			