

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

ESTUDO NUMÉRICO DA MUDANÇA DE FASE DE
PCMs EMCAVIDADES CILÍNDRICAS

JUTAÍ JUAREZ ESTRÁZULAS

Dissertação de Mestrado

São Leopoldo, junho de 2015.

**ESTUDO NUMÉRICO DA MUDANÇA DE FASE
DE PCMsEM CAVIDADES CILÍNDRICAS**

JUTAÍ JUAREZ ESTRÁZULAS

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof^{ta}. Dr^a Rejane de César Oliveski

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

Prof. Dra. Tatiana Louise Avila de Campos Rocha – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

E82e

Estrázulas, Jutai Juarez.

Estudo numérico da mudança de fase de PCMs em cavidades cilíndricas / Jutai Juarez Estrázulas. – 2015.

76 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

"Orientadora: Profa. Dra Rejane de César Oliveski."

1. Engenharia mecânica. 2. Armazenamento térmico. 3. PCM.
4. CFD. 5. Fluent. I. Título.

CDU 621

AGRADECIMENTOS

A todos os meus familiares, pelo apoio e compreensão.

À professora Rejane de César Oliveski, pela constante orientação na realização deste trabalho e pelo exemplo profissional como docente e pesquisadora.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS, pelo suporte e estrutura acadêmica.

Aos amigos e colegas do PPG em Engenharia Mecânica da UNISINOS, pela amizade e companheirismo.

RESUMO

Inúmeras aplicações residenciais, comerciais e industriais voltadas ao gerenciamento térmico tem seus custos operacionais reduzidos quando um sistema de armazenamento de energia térmica é incorporado. Tal tipo de sistema pode, por exemplo, absorver energia térmica oriunda de fonte solar, de reaproveitamento de calor de processo industrial ou mesmo proveniente de energia elétrica (nos horários em que esta é menos onerosa), e liberá-la em um horário em que estas fontes de calor não estejam presentes e em que a energia elétrica, se utilizada, seria mais onerosa. Os PCMs (Phase Change Materials), devido ao seu alto calor latente de fusão, são materiais que representam uma alternativa viável à implementação de sistemas de armazenamento de energia térmica. No entanto, inúmeros PCMs ainda não tiveram suas características e propriedades fluidodinâmicas investigadas suficientemente. Assim, este trabalho apresenta um estudo numérico da mudança de fase de PCMs da família RT, em cavidades cilíndricas, visando o armazenamento térmico de energia através de calor latente (LHTES). O estudo foi realizado através de simulação numérica por CFD, com o software ANSYS Fluent. O modelo numérico adotado é bidimensional e é composto pelas equações da conservação da massa, quantidade de movimento e energia. Além destas, foi utilizada a técnica de modelamento entalpia-porosidade. A malha computacional é do tipo hexaédrica, com refinamento junto às paredes da geometria e na região de interface entre o PCM e o ar. O modelo implementado foi validado com resultados numéricos e experimentais da literatura, obtendo-se bons resultados. Foi avaliado o processo de fusão de cinco diferentes tipos de PCMs (RT 4, RT 35, RT 35HC (alta capacidade), RT 55 e RT 82), cada um deles com três intervalos de temperatura ($\Delta T=10, 20$ e $30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Além disto, para $\Delta T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, os PCMs RT 27, RT 35, RT 35 HC e RT 82 foram testados para cinco diferentes valores de constante C (Mushy Zone), totalizando trinta diferentes situações. Para os PCMs RT 4, RT 35, RT 55 e RT 82, aumentando-se o ΔT de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, para frações líquidas entre 0,4 e 0,8, a redução média dos tempos de fusão foi de, aproximadamente, 55,8% e 71,8% e os incrementos médios no fluxo de calor foram de 63% e 111 %, respectivamente. Para o RT 35HC, as reduções médias nos tempos de fusão foram de 51,6% e de 67,8%, para a mesma faixa de fração líquida e mesmos ΔT . O RT 35HC, quando comparado com o RT 35, possui calor latente de fusão 41,1% maior e os seus tempos de fusão são entre 100% à 134% superiores, dependendo do ΔT utilizado.

Palavras-chave: Armazenamento Térmico, PCM, CFD, Fluent

ABSTRACT

Several residential, commercial and industrial applications focused on thermal management have their operating costs reduced when a thermal energy storage system is incorporated to them. This type of system can provide, can, for example, absorb thermal energy from solar source, heat reuse from industrial process or even from electrical power (during the time this is less expensive) and release it at a time that these heat sources are not present and the electrical power, if used, would be more expensive. The Phase Change Materials (PCMs), due to their high latent heat of fusion, are materials that represent a viable alternative to the implementation of thermal energy storage systems. However, many PCMs have not had their characteristics and fluid dynamics properties sufficiently investigated. Thus, this paper presents a numerical study of RT phase change materials family, inside cylindrical cavities, aiming at the thermal energy storage through latent heat (LHTES). The study was conducted through a CFD numerical simulation, with ANSYS Fluent software. The numeric model adopted is two-dimensional and is composed by mass conservation, movement amount and energy equations. In addition, the enthalpy-porosity modeling technique was used. The computational mesh is hexaedric, with refinement along the walls of geometry and at the interface area between the PCM and air. The model was validated with numerical and experimental results available in the literature, achieving good results. The fusion process of five different PCMs (RT 4, RT 35, RT 35 HC (high capacity), RT 55 and RT 82) was evaluated, each one of them with three temperature ranges ($\Delta T = 10, 20$ e 30 °C). Furthermore, for $\Delta T = 10$ °C, the PCMs RT 27, RT 35, RT 35 HC and RT 82 were tested for five different values of C constant (Mushy Zone) totaling thirty different situations. For PCMs RT 4, RT 35, RT 55 and RT 82, increasing ΔT from 10 °C to 20 °C and from 10 °C to 30 °C, for liquid fraction between 0,4 and 0,8, the average reduction in fusion time were, approximately, 55.8% and 71.8% and the average increase in heat flow were 63% and 111% respectively. For RT 35 HC, the average reductions in fusion time were 51.6% and 67.8% for the same liquid fraction range and same ΔT . The RT 35 HC, when compared to RT 35, has latent heat of fusion 41.1% greater and its fusion times are between 100% to 134% greater, depending on ΔT used.

Keywords: Thermal Energy Storage, PCM, CFD, Fluent

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (American Society of Mechanical Engineers).
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamic).
ECES	Conservação de energia através de armazenamento de energia (Energy Conservation Trough Energy Storage)
EDF	Grupo de Eletricidade da França (Electricité de France).
HTTES	Sistema de armazenamento térmico de energia a alta temperatura (High Temperature Thermal Energy Storage).
IEA	Agência Internacional de Energia (International Energy Agency).
LHTES	Sistema de armazenamento térmico de energia por calor latente (Latent Heat Thermal Energy Storage).
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (National Aeronautics and Space Administration).
NREL	Laboratório Nacional de Energias Renováveis (National Renewable Energy Laboratory).
PCM	Material com mudança de fase (Phase Change Material).
RT	Rubitherm Technologies GmbH.
SHTES	Sistema de armazenamento térmico de energia por calor sensível (Sensible Heat Thermal Energy Storage).
TES	Armazenamento térmico de energia (Thermal Energy Storage)
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
VOF	Volume de fluido (Volume of Fluid).

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

C	constante Mushy Zone [$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$]
CC	critério de convergência
c_p	calor específico do fluido a pressão constante [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
D	diâmetro do cilindro de PCM [mm]
D_m	diâmetro médio [mm]
g	aceleração da gravidade [m s^{-2}]
h	entalpia específica [J kg^{-1}]
h_s	entalpia sensível [J kg^{-1}]
h_{ref}	entalpia de referência [J kg^{-1}]
H_1	altura da cavidade estudada contendo PCM [mm]
H_2	altura da cavidade estudada contendo ar [mm]
k	condutividade térmica [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
L	calor latente de fusão [J kg^{-1}]
p	pressão [Pa]
q	taxa de transferência de calor [W]
q''	fluxo de calor [W m^{-2}]
\vec{S}	termo fonte de momento [Pa m^{-1}]
t	tempo [s]
T	temperatura [K]
V	volume [m^3]
\vec{V}	vetor velocidade [m/s]

Símbolos Gregos

α_n	fração de volume na enésima célula computacional [-]
$\alpha(t)$	fração de volume do PCM sólido em um instante "t" [-]
Δ	variação
ε	constante numérica (0,001)
ρ	massa específica [kg m ⁻³]
μ	viscosidade dinâmica [Pa s]
γ	fração líquida[-]

Sub-índices

<i>amb</i>	ambiente
<i>f</i>	final
<i>j</i>	contador de planos usados no cálculo do volume de PCM
<i>l</i>	<i>líquido</i>
<i>o</i>	<i>inicial</i>
<i>obj</i>	<i>objeto</i>
<i>pc</i>	<i>troca de fase</i>
<i>ref</i>	<i>referência</i>
<i>s</i>	<i>sólido</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –Projeção da demanda global de energia para uso residencial em aquecimento e refrigeração	14
Figura 1.2 –Número de artigos acadêmicos sobre PCM entre 1996 e 2013	15
Figura 2.1 – Métodos de armazenamentotérmico de energia.....	19
Figura 2.2 – Classificação dos PCMs.....	20
Figura 2.3 – Classes de PCMs e seus valores típicos de temperatura de mudança de fase e entalpia de fusão.....	22
Figura 2.4 – Estratégias usadas para melhorar a condutividade térmica dos PCMs	24
Figura 2.5 – Exemplo de PCM microencapsulado usado em paredes de edificações.....	27
Figura 2.6 – Exemplos de macroencapsulamento de PCM.....	27
Figura 2.7 – Formas de resfriamento de um objeto.....	29
Figura 2.8 – Perfis de temperatura de módulos de baterias com e sem PCM	30
Figura 2.9 – Exemplo de compartimento refrigerado de caminhão dotado de placas de PCM.....	32
Figura 2.10 – Exemplo de embalagem utilizando tecnologia PCM.....	33
Figura 2.11 – Espessura necessária para que diferentes materiais de construção e isolantes armazenem a mesma energia térmica que 10mm de PCM.....	35
Figura 2.12 – Temperaturas registradas em ambientes equipados com e sem Dupont TM Energain [®]	36
Figura 2.13 – Proposta de coletor solar compacto com PCM para aquecimento de água.....	37
Figura 2.14 – Sistema de aquecimento solar de água com tanque de PCM.....	37
Figura 3.1 – Modelo numérico em $t=0s$	44
Figura 3.2 – Esquema ilustrativo da metodologia adotada para o cálculo do volume do PCM ainda sólido em um instante “ t ”	48
Figura 3.3 – Malha computacional utilizada na validação numérica	51
Figura 3.4 – Validação da malha computacional com $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $C = 10^7$	52
Figura 4.1 – Campos de massa específica vs. imagens experimentais.....	54
Figura 4.2 – Vetores velocidade da ´validação numérica.....	55
Figura 4.3 – Comparação de simulações numéricas com resultados experimentais	56
Figura 4.4 – Fração líquida vs. tempo, para RT 27, com diferentes Δt e CC.....	57
Figura 4.5 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 27, variando C, com $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	58
Figura 4.6 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 27, variando ΔT	58

Figura 4.7 – Fluxo de calor vs. tempo, para o RT 27, variando ΔT	59
Figura 4.8 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 4, variando ΔT	60
Figura 4.9 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 35, variando ΔT	61
Figura 4.10 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 35 HC, variando ΔT	61
Figura 4.11 – Reduções médias dos tempos de fusão de PCMs “padrões”, variando α e ΔT ...	63
Figura 4.12 – Reduções médias dos tempos de fusão de PCM de “alta capacidade, variando α e ΔT	63
Figura 4.13 – Fluxo de calor vs. tempo, para o RT 35, variando ΔT	64
Figura 4.14 – Fluxo de calor vs. fração líquida, para o RT 35, variando ΔT	64
Figura 4.15 – Fluxo de calor vs. fração líquida, para o RT 35 HC, variando ΔT	65
Figura 4.16 – Influência da constante C no processo numérico de fusão do RT 35	66
Figura 4.17 – Influência da constante C no processo numérico de fusão do RT 82	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Densidades típicas de armazenamento de calor para diferentes materiais.....	28
Tabela 3.1 – Temperatura de fusão, calor latente e condutividade térmica dos PCMs.....	45
Tabela 3.2 – Casos simulados, tipo de PCM, temperatura de mudança de fase, C e ΔT	46
Tabela 3.3 – Propriedades do PCM RT 27.....	50
Tabela 4.1 – Casos simulados com variação de Δt (time-step) e CC.....	56
Tabela 4.2 – Sumário dos tempos de fusão dos PCMs até a fração líquida de 0,6.....	62
Tabela 4.3 – Sumário dos incrementos obtidos em $\dot{q}''(t = 10 \text{ s})$, variando ΔT	65
Tabela A1 – Propriedades termodinâmicas dos PCMs estudados.....	76
Tabela A2 – Viscosidade dos PCMs estudados.....	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 METODOLOGIA	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE – PCM	18
2.1 MÉTODOS PARA ARMAZENAMENTO TÉRMICO DE ENERGIA	18
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PCMS	20
2.4 REQUISITOS NA ESCOLHA DE PCMS.....	22
2.5 PROBLEMAS TÉCNICOS COM OS PCMS E ESTRATÉGIAS DE CONTORNO.....	23
2.5.1 Condutividade Térmica	23
2.5.2 Separação de Fases do PCM.....	25
2.5.3 Estabilidade a Longo Prazo	25
2.5.4 Subresfriamento.....	26
2.5.5 Formas de Uso dos PCMs	26
2.6 APLICAÇÕES DOS PCM	28
2.6.1 Controle de Temperatura com PCMs	29
2.6.2 Aplicações em Baterias e Dispositivos Eletrônicos	30
2.6.3 Aplicações na Área de Transporte e Armazenamento de Produtos.....	31
2.6.4 Aplicações para o Corpo Humano.....	33
2.6.5 Aplicações Para Conforto Térmico em Edificações.....	34
2.6.6 Aplicações na Área Solar	36
2.7 ESTUDOS DE PCMS EM CAVIDADES	38
3 ABORDAGEM NUMÉRICA	41
3.1 SOFTWARE ANSYS	41
3.1.1 Módulo ICEM-CFD	41
3.1.2 Software ANSYS Fluent	42
3.1.3 Software ANSYS CFX.....	43
3.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	44
3.3 MODELO MATEMÁTICO	46
3.3.1 Obtenção da Fração Líquida e do Fluxo de Calor	48
3.4 VALIDAÇÃO NUMÉRICA	50

3.4.1 Condições de Contorno, Malha Computacional e Demais Parâmetros.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO NUMÉRICA	54
4.2 RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO	59
4.2.1Influência da Temperatura da Parede	60
4.2.2Influência da Constante C na Simulação Numérica do Processo de Fusão dos PCMs	65
5 CONCLUSÕES.....	67
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O contínuo crescimento da emissão de CO₂ na atmosfera, decorrente do aumento da população mundial e os altos custos dos combustíveis fósseis e da energia elétrica são os motivos básicos para uma utilização mais eficiente da energia em todas as áreas da atividade humana. Edifícios comerciais e residências são os consumidores de energia mais intensivos. Esta afirmação é respaldada pelos dados estatísticos do Departamento Americano de Energia, que mostram que 41,1% de toda a energia primária consumida nos Estados Unidos, no ano de 2010, era demandada por consumidores residenciais e comerciais, sendo o aquecimento, refrigeração e iluminação as maiores demandas. Situação similar foi observada na Europa, onde os edifícios residenciais consomem 40% de toda a energia, de acordo com a Comissão Europeia de Energia (2014). No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional (ano base 2013), do Ministério de Minas e Energia, estes setores consomem 13,7% de toda a energia primária.

De acordo com Isaac e Van Vuuren (2009), o cenário global de demanda de energia para fins de aquecimento projeta um crescimento até 2030 (em virtude das previsões de aumento da temperatura média mundial) e então se estabiliza. Em contraste, a demanda de energia para fins de refrigeração deve crescer rapidamente durante todo o período compreendido entre 2000 e 2100. Este cenário pode ser visualizado na Fig.(1.1). As emissões de CO₂ associadas ao uso de sistemas de aquecimento e refrigeração crescerão de 0,8 Gt no ano 2000 para 2,2 Gt em 2100, ou seja, aproximadamente 12% das emissões totais de CO₂ serão decorrentes do uso de energia para aquecimento e refrigeração.

A busca de novas tecnologias para diminuir a crescente preocupação com os problemas ambientais atuais, com a possível carência de energia, seu alto custo e os pesados investimentos necessários à criação de novas centrais de geração de energia tem constituído um dos principais problemas científicos nas últimas três décadas. O aspecto central deste problema é a necessidade de armazenamento de energia, térmica ou elétrica, com a finalidade de cobrir as lacunas existentes entre a geração de energia e o seu respectivo consumo. Estas lacunas podem ser de ordem temporal, ou seja, a energia é gerada em um determinado horário e é consumida em outro, e de demanda, quando há um pico de consumo ou de geração em um intervalo de tempo.

Os sistemas de armazenamento térmico de energia por calor latente (LHTES) constituem uma técnica eficaz, tanto para fins de aquecimento quanto refrigeração, porque eles são capazes de prover uma alta densidade de armazenamento de energia. Quando

comparados a sistemas baseados em armazenamento por calor sensível, os sistemas de armazenamento por calor latente requerem menor peso e volume de material para uma determinada quantidade de energia. Adicionalmente, os LHTES possuem a capacidade de armazenar calor, seja para aplicações em aquecimento ou refrigeração, a uma temperatura praticamente constante, que corresponde à temperatura de mudança de fase do PCM (AGYENIM et al., 2010).

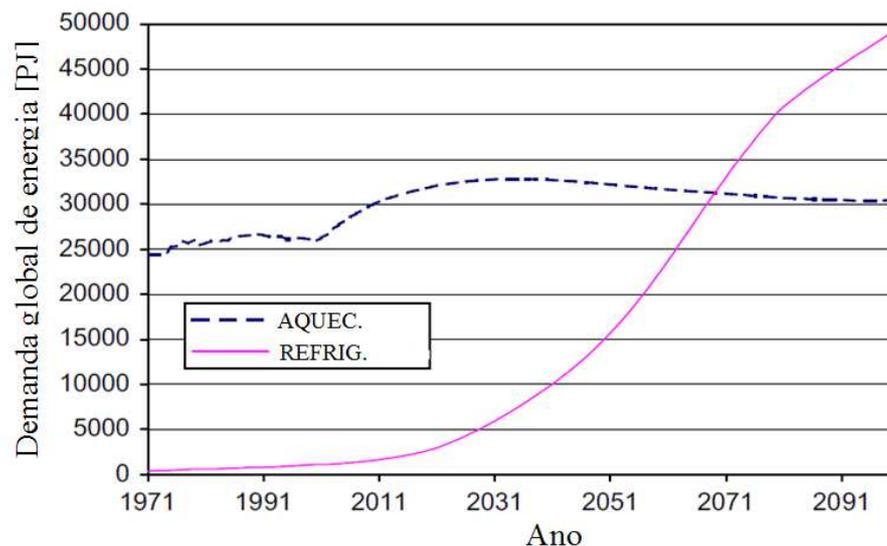


Figura 1.1 – Projeção da demanda global de energia para uso residencial em aquecimento e refrigeração.

Fonte: Isaac e Van Vuuren (2009).

De acordo com Zhang et al. (2014) ainda há um considerável espaço para reduções nos custos operacionais de processos industriais e a cogeração, o reaproveitamento de calor desperdiçado e o uso de diferentes fontes de energia são fatores chave para que estas reduções de custo sejam alcançadas. Além dos processos industriais, os setores de energia sustentável (solar, biomassa, biogás) também necessitam de um novo sistema de armazenamento de energia que permita um balanceamento entre as flutuações na geração de energia e seu consumo.

Os PCMs tem sido largamente utilizados em LHTES para bombas de calor, na área de engenharia solar e controle de aplicações térmicas na área espacial. Os usos de PCMs para aquecimento e refrigeração de edificações tem sido intensivamente investigados nas duas últimas décadas. A Fig.(1.2) apresenta o incremento das pesquisas nesta área. Atualmente é grande a quantidade de PCMs disponíveis no mercado, com temperaturas de fusão e

solidificação variadas, tornando estes materiais atrativos para um elevado número de aplicações (SHARMA et al., 2009).

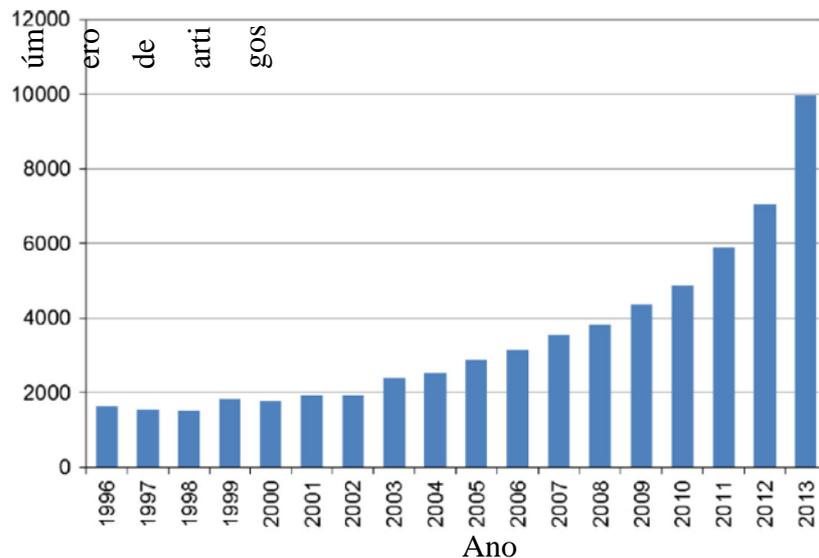


Figura1.2 –Número de artigos sobre PCM entre 1996 e 2013

(Science Direct: “phase change materials” e “thermal energy storage”).

Fonte: Adaptado de Pielichowska e Pielichowski, 2014.

Apesar da potencialidade da utilização dos PCMs na área de armazenamento térmico de energia, eles ainda apresentam deficiências e lacunas que vem sendo analisadas pelos pesquisadores, resultando em técnicas que visam o aprimoramento das características destes materiais e maior previsibilidade nos cálculos de capacidade térmica, tempos de fusão, solidificação e demais parâmetros necessários à correta aplicação dos PCMs. Dentre as deficiências dos PCMs pode-se citar a baixa condutividade térmica, a instabilidade de alguns PCMs ao longo dos ciclos de carga/descarga e a ausência de pesquisas detalhando inúmeros PCMs comercialmente disponíveis no mercado mundial. Esta dissertação visa contribuir para a diminuição desta lacuna, estudando detalhadamente a mudança de fase de cinco diferentes PCMs da família RT (Rubitherm Technologies GmbH) em cavidades cilíndricas.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo investigar numericamente, através de fluido dinâmica computacional (CFD), a mudança de fase de diferentes tipos de PCMs em cavidades cilíndricas. Já os objetivos específicos consistem em: (a) fazer uma ampla revisão bibliográfica sobre PCMs e suas aplicações; (b) implementar numericamente o modelo matemático de mudança de fase; (c) validar a metodologia e o modelo matemático com

resultados da literatura; (d) avaliar e comparar o processo de fusão de diferentes PCMs quando submetidos a diferentes temperaturas acima da sua temperatura de mudança de fase (T_{pc}); (e) verificar a influência da constante C (mushy zone), a qual controla o grau de derretimento; (f) comparar o processo de fusão de PCMs da família RT de capacidade térmica normal com aqueles de alta capacidade térmica para a mesma temperatura de fusão.

1.2 JUSTIFICATIVA

A relevância deste trabalho deve-se ao fato dos PCM's apresentarem alta capacidade de armazenamento térmico, quando comparados aos materiais tradicionalmente usados para esta finalidade, e por serem uma alternativa viável em aplicações voltadas ao conforto térmico de edificações, transporte de produtos perecíveis ou farmacêuticos, atenuação do aquecimento de baterias e produtos eletrônicos, produtos têxteis focados na proteção do corpo humano e armazenamento de calor gerado a partir de fonte solar ou de excedente industrial, dentre outras. Adicionalmente, os PCMs apresentam propriedades técnicas que possibilitam cobrir a lacuna temporal existente entre a demanda de energia térmica (ou elétrica) e o horário em que a mesma é gerada ou que está disponível a um custo menos oneroso.

Complementando as justificativas para este trabalho, inúmeros PCMs, de diferentes fabricantes, não foram suficientemente estudados, havendo ainda discrepâncias entre análises numéricas e experimentais ou mesmo a ausência de pesquisa de certos PCMs em cavidade cilíndrica.

1.3 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido utilizando-se o software comercial ANSYS Fluent. O modelo matemático é composto pelas equações da conservação da quantidade de movimento, massa e energia, acrescidas de equações de fechamento correspondentes às fases líquida e sólida. Malhas computacionais com diferentes graus de refinamento nas áreas que apresentaram os gradientes mais significativos foram construídas, sendo também executadas as verificações de convergência destas malhas computacionais. A validação do modelo numérico foi realizada com resultados numéricos disponíveis na literatura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6Capítulos. No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica abrangendo os métodos de armazenamento térmico de energia, as classificações dos PCMs, suas vantagens e desvantagens, critérios de escolha, os problemas técnicos existentes e respectivas estratégias de contorno, as aplicações e trabalhos já desenvolvidos por pesquisadores desta área. No Capítulo 3 é apresentada a abordagem numérica, incluindo a definição do problema, a organização de casos, o modelo matemático, condições de contorno e iniciais, verificação de convergência de malha e validação numérica. No Capítulo 4 são apresentados os resultados da validação numérica e dos estudos de caso.No Capítulo 5 são indicadas as conclusões e no Capítulo 6 são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE – PCM

De acordo com Agyenim et al. (2010), o estudo dos PCMs teve início nos anos 40, mas eles não receberam muita atenção até a crise de energia ocorrida nos anos 70 e início dos anos 80, quando então foram estudados de forma intensiva para uso em diferentes aplicações, especialmente para sistemas de aquecimento por energia solar. Desde o final dos anos 70 um crescente número de estudos tem sido desenvolvidos no sentido de avaliar o comportamento térmicos de LHTES. As pesquisas tem se concentrado na resolução de problemas e estudos de características dos PCMs e nos critérios de projeto, otimização, comportamento em regime transiente e performance em campo dos LHTES.

Para uma adequada compreensão das potencialidades dos PCMs serão apresentadas, nas Seções seguintes as principais características dos PCMS, os problemas e desafios que eles apresentam e também as áreas de aplicação.

2.1 MÉTODOS PARA ARMAZENAMENTO TÉRMICO DE ENERGIA

Sistemas de armazenamento térmico de energia (TES) podem ser obtidos através de resfriamento, aquecimento, liquefação, solidificação ou vaporização de um material, com a energia sendo disponibilizada na forma de calor quando o processo é revertido. Os métodos usados para os TES são classificados em armazenamento térmico de energia por calor sensível (SHTES) e armazenamento térmico de energia por calor latente (LHTES). Os SHTES dependem do aumento ou redução da temperatura de um material. A eficácia deste tipo de sistema depende do calor específico do material e, se o volume for um fator importante no projeto, de sua massa específica. Já os LHTES dependem da capacidade do material em armazenar energia em uma condição praticamente isotérmica, ou seja, a uma temperatura quase constante, com estreita faixa de variação. Estes tipos de sistemas utilizam PCMs e oferecem como vantagem, além da temperatura constante durante os ciclos de armazenamento e liberação da energia, maior capacidade de armazenamento e menor volume quando comparados aos SHTES(PIELICHOWSKA e PIELICHOWSKI, 2014). Além dos dois sistemas anteriormente descritos, um terceiro método de armazenamento térmico de energia são os baseados em processos químicos que dependem da energia absorvida ou liberada quando a ligação molecular do material é quebrada ou recomposta, em reações químicas completamente reversíveis.

O armazenamento térmico por calor latente pode ser conseguido através de mudança de fase sólido-líquido, líquido-gás, sólido-gás e sólido-sólido. Porém, do ponto de vista prático, apenas as mudanças de fase sólido-líquido e sólido-sólido devem ser consideradas. As mudanças de fase sólido-gás e líquido-gás, apesar de apresentarem alto calor latente de fusão, estão associadas a grandes variações de volume durante a mudança de fase, tornando os sistemas de armazenamento complexos e onerosos (SHARMA e SAGARA, 2005).

Também de acordo com Sharma e Sagara (2005), nas transições sólido-sólido, o calor é armazenado quando o material é transformado de uma estrutura cristalina para outra. Esta transição geralmente possui menor calor latente e variação de volume que as transições sólido-líquido. Os PCMs sólido-sólido oferecem a vantagem de requisitos menos rigorosos, em termos de segurança, para os reservatórios e maior flexibilidade para projetos. Já as transformações sólido-líquido possuem, em termos comparativos, menor calor latente que as mudanças líquido-gás. No entanto, este tipo de transformação envolve uma baixa mudança no volume, usualmente inferior a 10%. Na Fig.(2.1) é apresentado um diagrama detalhando os métodos de armazenamento térmico de energia

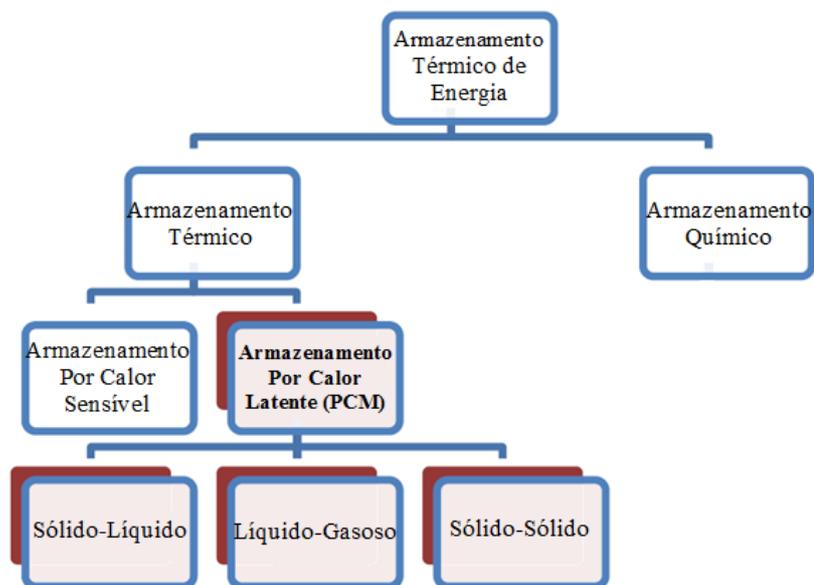


Figura 2.1 – Métodos de armazenamento térmico de energia

Fonte: Adaptado de Anisur et al. (2013).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PCMS

Conforme abordado na Seção anterior, os PCMs com mudança de fase sólido-líquido são os que apresentam maior viabilidade nas aplicações atuais, que serão detalhadas mais a frente, além de possuírem maior capacidade de armazenamento térmico que os PCMs com mudança de fase sólido-sólido.

A classificação dos PCMs com mudança de fase sólido-líquido proposta por Zhou, Zhao e Tian (2012) e também por outros pesquisadores, tais como Oró et al. (2012) e Soares et al. (2013), é apresentada na Fig.(2.2), abrangendo três diferentes famílias de PCMs: inorgânicos, orgânicos e eutéticos. É conveniente esclarecer que materiais eutéticos constituem um composto de dois ou mais componentes que apresentam fusão e resfriamento de forma congruente, ou seja, formam uma mistura homogênea durante os processos de fusão e solidificação.

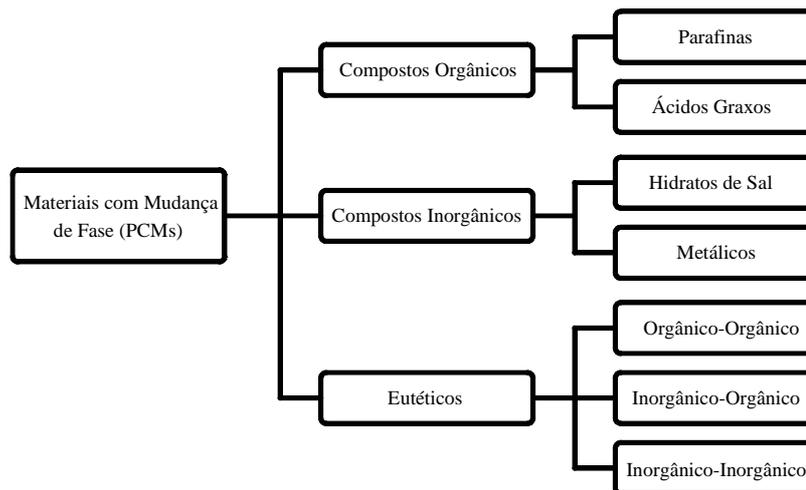


Figura 2.2 – Classificação dos PCMs.

Fonte: Zhou, Zhao e Tian (2014).

Para um melhor entendimento das potencialidades práticas de cada família de PCMs, Soares et al. (2013) apresentam, de forma minuciosa, as seguintes considerações sobre vantagens e desvantagens de cada família:

- a) PCMs Orgânicos (parafínicos e não parafínicos): apresentam como vantagens a disponibilidade em uma ampla gama de temperaturas; possuem alto calor latente de fusão (ácidos graxos possuem maior calor latente de fusão quando comparados às parafinas); apresentam solidificação sem a necessidade de subresfriamento ou com pequeno

subresfriamento e possuem mudança de fase congruente, ou seja, sua composição se mantém homogênea ao longo dos ciclos de fusão/solidificação. Como desvantagens são citadas a baixa condutividade térmica, a sua inflamabilidade (sendo possível a adição de retardantes de fogo), a incompatibilidade com materiais plásticos e o fato de serem comercialmente mais caros (as parafinas comerciais são mais baratas que as parafinas puras e os ácidos graxos);

- b) PCMs Inorgânicos (Hidratos de sal): apresentam características térmicas previsíveis e são quimicamente estáveis, ou seja, este tipo de material mantém as propriedades durante repetidos ciclos térmicos; possuem baixa pressão de vapor na forma líquida; não são perigosos, não reagem e não corroem outros materiais; são compatíveis com materiais convencionais de construção; são recicláveis; possuem alta capacidade volumétrica de armazenamento de calor latente e alto calor de fusão; possuem baixo custo e são facilmente encontrados; possuem condutividade térmica mais alta; não são inflamáveis; apresentam menor variação de volume; são compatíveis com materiais plásticos; representam menor impacto ambiental, tanto na manufatura quanto no descarte. As desvantagens compreendem problemas quanto à necessidade de subresfriamento (reduzir a temperatura do PCM abaixo da sua temperatura de mudança de fase) e pobre nucleação (estágio inicial da solidificação). Apresentam também fusão incongruente, problemas quanto à estabilidade térmica e segregação dos componentes, incompatibilidade com alguns materiais usados em edificações, além de serem corrosivos para a maioria dos metais e levemente tóxicos;
- c) PCMs Eutéticos: suas vantagens são apresentar uma temperatura de mudança de fase precisa (podendo ser usados para fornecer uma temperatura requerida para um processo), possuem densidade de armazenamento térmico volumétrico levemente acima dos PCMs orgânicos e sua mudança de fase é congruente, sem segregação dos componentes. Como desvantagens são citadas a falta de dados sobre propriedades termofísicas e o odor apresentado por alguns destes PCMs.

Na Fig.(2.3) pode ser contemplada a ampla gama de temperaturas de mudança de fase e as respectivas entalpias de fusão para as diversas famílias de PCMs atualmente disponíveis. Pode-se observar que os PCMs inorgânicos (hidratos de sal, nitratos, hidróxidos) abrangem

um amplo leque de temperaturas. Quando comparados com os PCMs orgânicos (parafinas e ácidos graxos), os PCMs inorgânicos apresentam maior entalpia de fusão (ECES/IEA, 2001).

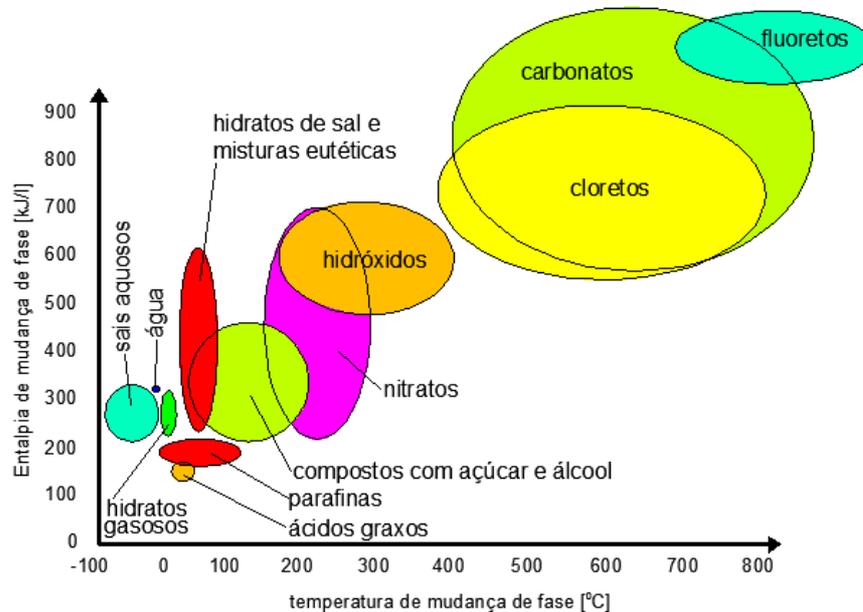


Figura 2.3 – Classes de PCMs e seus valores típicos de temperatura de mudança de fase e entalpia de fusão.

Fonte: Adaptado do Anexo 17 – ECES/IEA, 2001.

2.4 REQUISITOS NA ESCOLHA DE PCMS

Uma compilação dos critérios de escolha de PCMs apontados por pesquisadores como Pielichowska e Pielichowski (2014), Soares et al. (2013), Oró et al. (2012), Anisur et al. (2013), Sharma e Sagara (2005), entre outros, permite apontar os seguintes requisitos para escolha de PCMs:

- quanto às propriedades termofísicas: que possua temperatura de mudança de fase adequada à aplicação desejada, com alto calor latente de fusão por unidade de volume, com alto calor específico, a fim de propiciar armazenamento significativo também por calor sensível, apresente alta condutividade térmica, tanto no estado sólido quanto líquido, com baixa variação volumétrica durante a mudança de fase e baixa pressão de vapor na temperatura de operação. Além disso, que possua mudança de fase congruente, mantendo a capacidade de armazenamento constante a cada ciclo fusão/solidificação;

- b) quanto às propriedades cinéticas: que apresente alta taxa de nucleação (processo inicial na cristalização e solidificação) e que não seja necessário subresfriamento ou que este seja o menor possível;
- c) quanto às propriedades químicas: que tenha ciclos de fusão/solidificação completamente reversíveis, apresente estabilidade química a longo prazo, sem apresentar degradação após elevada quantidade de ciclos de fusão/solidificação, que não seja corrosivo, que apresente compatibilidade com materiais usados para TES e edificações e que não seja tóxico, inflamável ou explosivo;
- d) quanto aos aspectos econômicos: que seja disponível, abundante e tenha baixo custo;
- e) quanto aos aspectos ambientais: que tenha baixo impacto ambiental e não seja poluente, que seja reciclável e de fácil separação de outros materiais.

2.5 PROBLEMAS TÉCNICOS COM OS PCMS E ESTRATÉGIAS DE CONTORNO

Nas aplicações práticas não é possível encontrar um PCM que possua a habilidade de preencher todos os requisitos apontados na Seção 2.4. A grande quantidade de PCMs disponíveis no mercado, a carência sobre estudos científicos dos mesmos e a existência de problemas técnicos representam o principal desafio aos pesquisadores da atualidade. Assim sendo, para cada lacuna técnica dos PCMs, estratégias de contorno tem sido desenvolvidas, viabilizando o uso, em termos de eficiência e competitividade, destes materiais em sistemas LHTES. Nas subseções seguintes são apresentadas as principais carências técnicas dos PCMs e as estratégias adotadas para contorná-las atualmente.

2.5.1 Condutividade Térmica

De acordo com Zhou, Zao e Tian et al. (2012), a maioria dos PCMs sofre de um problema comum que é a baixa condutividade térmica, com valores ao redor de 0,2W/mK para os materiais parafínicos e 0,5W/mK para os hidratos de sal e materiais eutéticos. Esta baixa condutividade aumenta o tempo dos processos de carga e descarga de um LHTES que utiliza PCM como meio de armazenamento térmico. Al-Abidi et al. (2012) destacam que a maioria das técnicas propostas para a melhoria na condutividade térmica tem sido baseadas na introdução de aletas metálicas, nas mais variadas formas e configurações, nos PCMs. Este

fato é devido à simplicidade deste tipo de implementação, facilidade de fabricação e baixo custo envolvido. Outras estratégias abordadas na pesquisa de Agyenim et al. (2012) e apresentadas na Fig.(2.4) abrangem o uso de múltiplos tubos metálicos, a agitação através da inserção de bolhas, o uso de anéis metálicos, o uso de multitubos e escovas de carbono, o encapsulamento do PCM em material polimérico (microencapsulamento), o uso de uma matriz metálica ou de grafite, o uso de esferas metálicas ou de material poliolefínico, a adição de flocos de grafite e a compactação do PCM em painéis planos ou na forma de barras. Em alguns casos, como no acréscimo de anéis metálicos ao PCM, a condutividade térmica foi aumentada em 10 vezes.

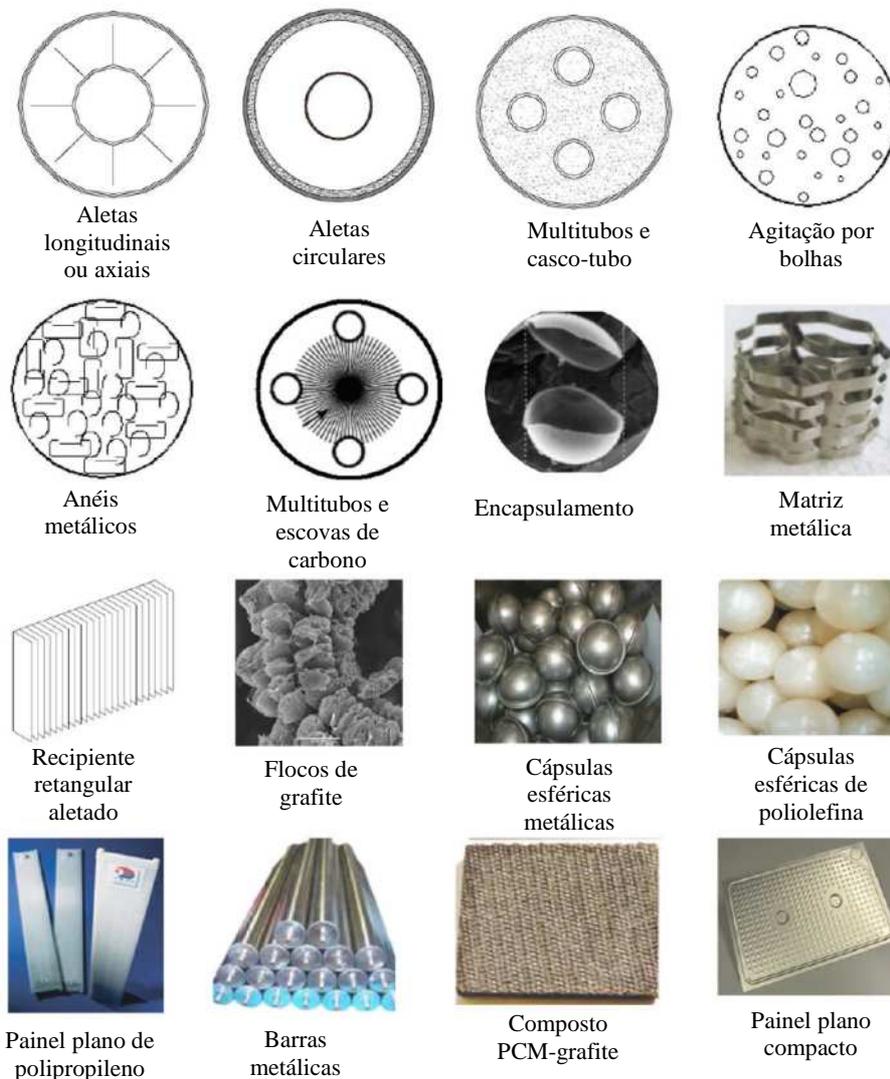


Figura 2.4 – Estratégias usadas para melhorar a condutividade térmica dos PCMs.

Fonte: Adaptado de Agyenim et al. (2010).

2.5.2 Separação de Fases do PCM

Um PCM apresenta fusão congruente quando a sua composição se mantém homogênea ao longo dos ciclos fusão/solidificação e sua entalpia de mudança de fase se mantém constante. Alguns PCMs, como os hidratos de sal, apresentam dificuldade em manter a homogeneidade de sua composição e, como consequência, ocorre a diminuição da capacidade de armazenamento térmico ao longo dos ciclos fusão/solidificação. Uma das estratégias possíveis para contornar este problema é a agitação do PCM líquido através de mecanismo externo, acoplado ao tanque usado como reservatório. Outra técnica, denominada de “gelling” consiste em adicionar um material responsável por formar, a nível microscópico, uma rede tridimensional no volume de PCM, mantendo juntas as diferentes fases do material. Uma terceira técnica disponível é chamada de “thickening”, que consiste em adicionar um componente ao PCM para aumentar sua viscosidade. Desta forma, com viscosidade alta, as diferentes fases do PCM não conseguem se separar até que todo o material se solidifique. Também é citada na literatura a possibilidade de agregar um componente ao PCM, alterando a sua composição até que a fusão congruente seja atingida. Esta técnica, porém, é reconhecidamente mais complexa porque envolve conhecimento aprofundado para análise do comportamento do material (CABEZA et al., 2011).

2.5.3 Estabilidade a Longo Prazo

Pesquisadores como Pielichowska e Pielichowski (2014), Oró et al. (2012), Zalba et al. (2003), entre outros, reportam que a viabilidade econômica dos PCMs usados em LHTES depende da sua vida útil, durante a qual não deve haver grande alteração, tanto na temperatura de mudança de fase como no calor latente de fusão, devido à ciclagem térmica do material. Os dois fatores responsáveis por conferir uma estabilidade inadequada a um LHTES são: a fraca estabilidade do material do qual o PCM é composto e/ou a corrosão entre o PCM e o recipiente que o contém. Assim sendo, os pesquisadores sugerem que o desenvolvimento do recipiente que irá conter o PCM deve ser feito levando-se em conta a demonstração da estabilidade física e térmica, ou seja, o sistema contendo o PCM deve suportar repetitivos ciclos de aquecimento e resfriamento. A compatibilidade do PCM com outros materiais é, portanto, fator importante no que diz respeito à vida útil do recipiente que contém o PCM e no potencial de dano que um eventual vazamento possa trazer ao meio-ambiente. Os problemas

de compatibilidade de materiais mais comuns são a corrosão de metais em contato com PCM inorgânicos e a perda de estabilidade de materiais plásticos quando em contato com PCMs orgânicos (CABEZA et al., 2011).

2.5.4 Subresfriamento

Diz-se que um determinado PCM apresenta característica de subresfriamento quando ele não se solidifica imediatamente após sua temperatura estar abaixo da temperatura de mudança de fase. Neste caso a solidificação do PCM só é conseguida levando-se sua temperatura bem abaixo da temperatura de mudança de fase, para iniciar a cristalização do material e liberar o calor latente nele armazenado. Se a solidificação do material não é atingida, o calor latente não é liberado e o material armazena calor apenas na forma sensível. Assim sendo, o subresfriamento é um sério problema nas aplicações dos PCMs. A técnica mais comumente usada para contornar este tipo de problema é a incorporação de aditivos especiais, denominados “nucleadores”, aos PCMs. Tais aditivos auxiliam na nucleação das moléculas do material, ou seja, auxiliam o processo que dá início à solidificação. A limitação atualmente existente é que tais “nucleadores” somente são eficazes numa faixa de temperatura entre 10 a 20 K acima ou abaixo da temperatura de mudança de fase (ORÓ et al., 2012; MEHLING e CABEZA, 2008).

2.5.5 Formas de Uso dos PCMs

Oró et al. (2012) destacam que, em praticamente todas as aplicações, os PCMs tem que ser encapsulados pois, em caso contrário, ocorreria vazamento. O recipiente usado para armazenamento do PCM deve possuir as seguintes características: atender aos requisitos de resistência, flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica; atuar como barreira para proteger o PCM de interações perigosas com o meio-ambiente; prover uma superfície de troca térmica suficiente e propiciar estabilidade estrutural e facilidade de manuseio. As três diferentes formas de encapsulamento do PCM são o uso de tanques de armazenamento, o microencapsulamento e o macroencapsulamento.

Na Fig.(2.5) pode ser visto um exemplo de PCM microencapsulado, aplicado a placas utilizadas em paredes de edificações.

O macroencapsulamento compreende a inclusão do PCM em embalagens com formas definidas, tais como tubos, bolsas, esferas, painéis ou outros tipos de recipientes. Esta técnica de utilização é a mais usual porque estes tipos de embalagens já são disponíveis em grande variedade a partir de outras aplicações. Nestes casos o macroencapsulamento é usado primordialmente para conter o PCM líquido e evitar mudanças em sua composição devido ao contato com o meio-ambiente (ORÓ et al., 2012).

Na Fig.(2.6) são apresentados alguns exemplos das formas de macroencapsulamento: recipientes termoplásticos em formato plano, esférico, barras tubulares e bolsas.

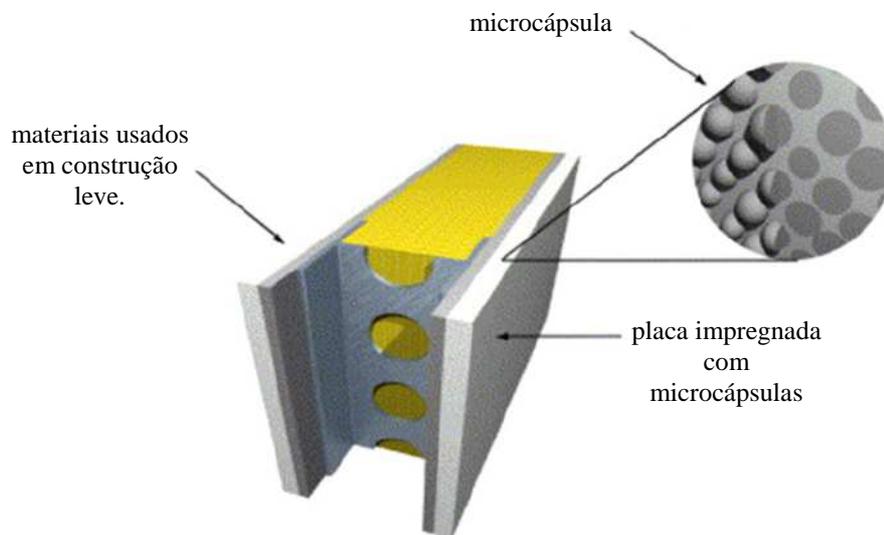


Figura 2.5 – Exemplo de PCM microencapsulado usado em paredes de edificações.

Fonte: Soares et al. (2013).

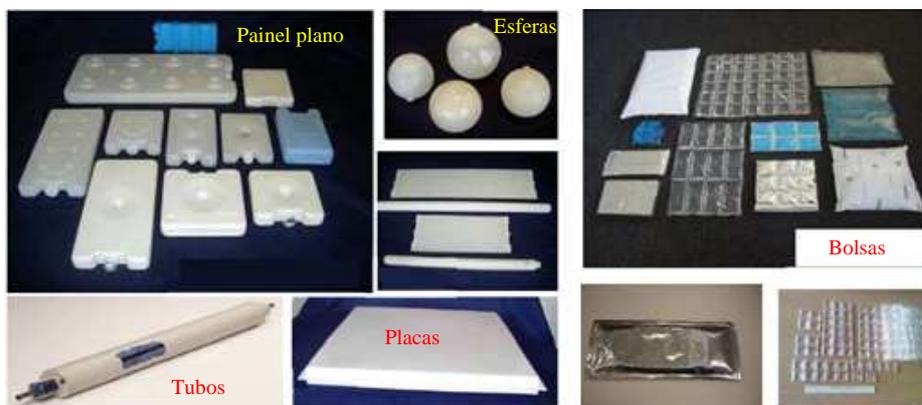


Figura 2.6 – Exemplos de macroencapsulamento de PCM.

Fonte: www.pcmproducts.net

2.6 APLICAÇÕES DOS PCM

Um dos campos nos quais os PCMs tem forte aplicação é no controle e manutenção de temperatura. Eles apresentam tal característica pelo fato de absorverem ou liberarem calor sem uma mudança significativa de sua temperatura durante a mudança de fase. Assim sendo, o leque de aplicações é amplo, indo desde o conforto térmico residencial ou predial, passando pelo transporte de alimentos e produtos médicos/farmacêuticos e mesmo no controle de temperatura e incremento de performance ou vida útil de dispositivos eletrônicos e baterias.

A Tab.(2.1) apresenta uma interessante comparação de densidades de armazenamento volumétrico de energia para armazenamento por calor sensível e por calor latente. Observa-se que os PCMs (água, parafinas, hidratos de sal e sais) são capazes de armazenar entre 3 a 4 vezes mais calor por volume do que é armazenado como calor sensível em materiais sólidos ou líquidos em um intervalo de temperatura de 20 °C. Isto propicia uma vantagem significativa em diversas aplicações. Além disso, como já foi destacado anteriormente, a mudança de fase dos PCMs ocorre a uma temperatura constante, viabilizando também uma ampla gama de aplicações que se utilizam desta característica. Assim sendo, é crescente a quantidade de novos materiais e pesquisas envolvendo o armazenamento térmico de energia para fins de aquecimento ou refrigeração (conforto térmico) em residências e indústrias. O uso de PCMs nestas aplicações representa a possibilidade de redução na demanda de energia, tanto no horário de ponta (custo mais elevado) como fora de ponta.

Tabela 2.1 – Densidades típicas de armazenamento volumétrico de energia para diferentes materiais.

	MJ m⁻³	kJ kg⁻¹	Comentários
Calor sensível			
granito	50	17	DT=20 °C
água	84	84	DT=20 °C
Calor latente de fusão			
parafinas	180	200	T _{pc} : 5 °C a 130 °C
hidratos de sal	300	200	T _{pc} : 5 °C a 130 °C
sais	600 - 1500	300 - 700	T _{pc} : 300 °C a 800 °C

Fonte: Mehling e Cabeza (2008)

2.6.1 Controle de Temperatura com PCMs

Nos anos 2000 o uso dos PCMs em “containers” e recipientes de transporte se tornou uma das primeiras aplicações comerciais desta tecnologia, conforme Mehling e Cabeza (2008). Exemplos são o transporte de alimentos, medicamentos e produtos farmacêuticos. Em todos estes casos é importante manter a temperatura do produto acima ou abaixo de um certo limite. Em muitas situações, dependendo do tipo de transporte utilizado ou de quão remoto é o destino da carga, a energia elétrica não está disponível para prover o aquecimento ou resfriamento necessário ao produto transportado. Nestes casos o uso da tecnologia PCM oferece uma solução única.

Mehling e Cabeza (2008, p. 192-196) apresentam gráficos que possibilitam, de forma simples, uma visualização da influência que o acréscimo do PCM pode ter sobre a manutenção de temperatura de um corpo. Na curva (i) da Fig.(2.7) é apresentado o comportamento da temperatura de um objeto que armazena apenas calor sensível quando é exposto ao ar ambiente. Nesta situação o comportamento da temperatura do objeto (T_{obj}) segue uma curva exponencial decrescente, partindo de uma temperatura inicial e chegando à temperatura ambiente (T_{amb}). Esta curva depende, principalmente, de parâmetros como a área do objeto, o coeficiente de transferência de calor, a massa e a capacidade calorífica do objeto.

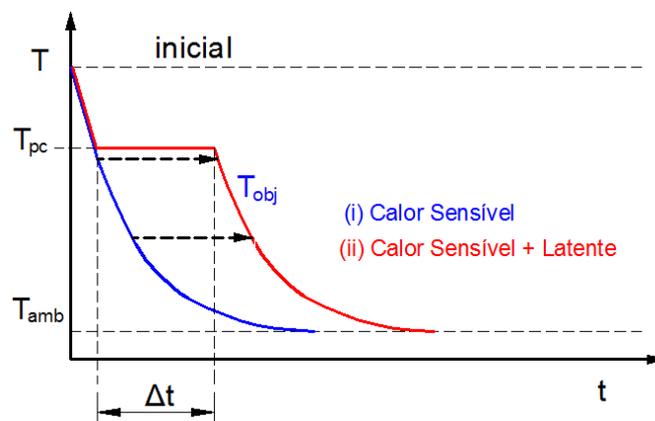


Figura 2.7–Formas de resfriamento de um objeto:
(i) apenas calor sensível; (ii) calor sensível e latente.

Fonte: Adaptado de Mehling e Cabeza (2008).

Quando o objeto é composto por PCM (situação mostrada na curva (ii) da Fig.(2.7)), e atinge a temperatura de mudança de fase (T_{pc}), o PCM libera calor, compensando a perda do mesmo e mantendo a temperatura por um tempo Δt suficiente até que a mudança de fase seja concluída. Deste ponto em diante a curva de temperatura segue o mesmo padrão do objeto que possui apenas calor sensível.

2.6.2 Aplicações em Baterias e Dispositivos Eletrônicos

O gerenciamento térmico de baterias de íons de lítio tem um papel significativo em aplicações de potência no sentido de propiciar segurança, além de incrementar a performance e estender a vida útil. Um dos efeitos colaterais da exposição a altas temperaturas é o acelerado desgaste e redução da capacidade (KHATEEB et al., 2005). Exemplos deste desgaste foram apresentados nos estudos de Ramadass et al. (2002) comprovando que a manutenção regulada e contínua de temperatura é uma necessidade básica para um sistema de gerenciamento térmico eficiente em aplicações que façam uso intensivo de baterias de íons de lítio.

Os estudos de Khateeb et al (2005) e de Al-Hallaj et al. (2005) demonstraram a eficácia do PCM no sentido de prolongar a vida útil de baterias de íons de lítio, largamente empregadas em automóveis elétricos e híbridos. A Fig. (2.8) apresenta os perfis de temperatura com e sem PCM quando o módulo de bateria era submetido a uma carga de 10 A à temperatura ambiente. Percebe-se claramente a eficácia do PCM em reduzir a temperatura de operação da bateria.

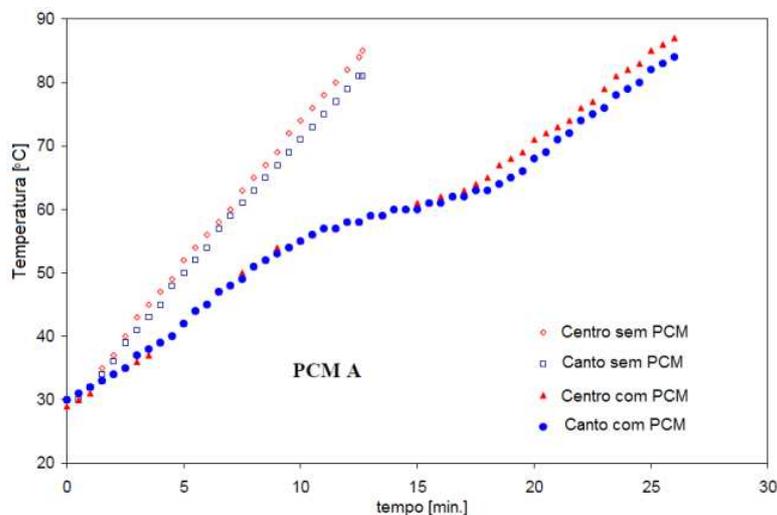


Figura 2.8 – Perfis de temperatura de módulos de baterias com e sem PCM.

Fonte: Adaptado de Al-Hallaj (2005).

Na área de refrigeração de componentes eletrônicos, Weng et al. (2011) demonstraram experimentalmente que um módulo de tubo de calor preenchido com PCM é capaz de reduzir o consumo de energia de ventilação em até 46% e 12,3 °C na temperatura média, quando comparado a outros materiais utilizados para o mesma finalidade, porém sem a característica de armazenamento térmico dos PCMs.

Setoh, Tan e Fok (2010) demonstraram experimentalmente que o uso de PCM em dissipadores de calor de múltiplas aletas pode estabilizar a temperatura de telefones móveis por períodos mais longos e incrementar seu tempo de utilização. Sem o uso de PCM o telefone móvel pode, em situações de uso prolongado, atingir temperaturas que causem desconforto ao usuário final. Como é esperado que as futuras gerações de telefones móveis possuam inúmeras novas funções, a potência requerida por estes equipamentos irá, necessariamente, aumentar, ensejando novas oportunidades para o uso dos PCMs.

Na área automotiva, um estudo experimental desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL, 2007) onde foi analisado o potencial uso de baterias de íons de lítio feitas a partir de composto de grafite e PCM em veículos híbridos, apresentou os seguintes resultados:

- o gerenciamento térmico de baterias mostrou excelente performance no que diz respeito a limitar o pico de temperatura na condição de uso extensivo por curtos períodos;
- o uso de PCM sem o método de resfriamento convectivo apropriado pode não ser aplicável em veículos híbridos;
- a combinação de técnicas atuais com o uso da tecnologia PCM pode permitir o desenvolvimento de sistemas de refrigeração a ar de menor tamanho e menor necessidade de limitar a potência de saída da bateria em condição de alta temperatura;
- os projetistas de automóveis terão que avaliar o potencial acréscimo na massa e custo da inclusão do PCM ao sistema da bateria com relação aos benefícios obtidos.

2.6.3 Aplicações na Área de Transporte e Armazenamento de Produtos

O transporte refrigerado é necessário para a manutenção da qualidade e prolongamento da vida útil de produtos frescos, congelados ou perecíveis durante o transporte. A temperatura deste tipo de produto necessita ser mantida em um ponto no qual a deterioração metabólica e microbiológica seja minimizada. O crescimento da população mundial e a contínua demanda dos consumidores por alimentos frescos tem contribuído para o aumento significativo do transporte refrigerado. De acordo com Billiard (2003), nos Estados Unidos, os alimentos são transportados, em média, 2,5 vezes ou mais por uma distância de 2.100 km antes de chegarem aos locais de consumo e a estimativa é de que 75% dos alimentos são produzidos, embalados, transportados e armazenados sob certos níveis de refrigeração. Em 2002, o número calculado de caminhões refrigerados disponíveis

mundialmente era de 1,2 milhão e o custo total com transporte de produtos refrigerados era de, aproximadamente, 1,2 trilhão de dólares. Assim sendo, a distância da jornada, a energia requerida e as emissões de gases associados ao transporte de alimentos tem recebido uma considerável atenção recentemente.

Liu, Saman e Bruno (2012) desenvolveram um sistema de refrigeração baseado em um dispositivo de armazenamento de energia térmica através de PCM, de baixo custo, passível de ser instalado no próprio caminhão ou em uma unidade de refrigeração, externa ao veículo. A quantidade de PCM, resfriada externamente ao veículo,foicapaz de manter o espaço refrigerado a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 10 horas em condições de calor extremo, na cidade de Adelaide, na Austrália.Este novo sistema de refrigeração de caminhões apresentou um custo energético 86,4% inferior aos sistemas tradicionais, além de implicar numa produção muito inferior de CO_2 e ruído.A Fig.(2.9) apresenta uma solução similar, desenvolvida pela empresa Frigoblock, na qual placas de PCM são fixadas ao topo do compartimento refrigerado do caminhão, sendo resfriadas à noite, através de sistema de refrigeração externo, e durante o dia mantém a temperatura dos alimentos dentro dos padrões estabelecidos.



Figura 2.9 – Exemplo de compartimento refrigerado de caminhão dotado de placas de PCM.

Fonte: Frigoblock (www.frigoblock.de)

Os estudos experimentais de Oró et al. (2012) demonstraram que o uso de PCM com temperatura de mudança de fase de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, na forma de painéis, com 10 mm de espessura, posicionados em diferentes locais no interior de um freezer vertical, permitiram que a temperatura permanecesse entre $4\text{ a }6\text{ }^{\circ}\text{C}$ abaixo da temperatura máxima aceitável para

produtos congelados quando o freezer era submetido a uma falta de energia elétrica de 3 horas.

Em termos comerciais, empresas especializadas em embalagens voltadas ao transporte de produtos sensíveis ao calor, como Air Container, SkyCell e Criopak já disponibilizam embalagens de variados tamanhos utilizando a tecnologia PCM e abrangendo diversas faixas de temperatura tais como: $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (para transporte de produtos congelados); $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (para transporte de produtos refrigerados) e $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (transporte de produtos à temperatura ambiente).

Na Fig.(2.10) é apresentada uma embalagem da empresa SkyCell que utiliza tecnologia PCM. Esta embalagem possui volume útil de 850 litros e é capaz de manter uma temperatura interna entre $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 100 horas quando submetida a uma temperatura ambiente de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. A preocupação dos fabricantes de embalagens e também da cadeia logística com a temperatura de produtos sensíveis é de tal ordem que vários fabricantes de embalagens com tecnologia PCM oferecem também data loggers para monitoramento da temperatura. Também a empresa Fedex oferece o serviço SenseAware visando o contínuo monitoramento da temperatura de produtos perecíveis, farmacêuticos, derivados do sangue e sensíveis à temperatura.



Figura 2.10 – Exemplo de embalagem utilizando tecnologia PCM.

Fonte: SkyCell (<http://www.skycell.ch>).

2.6.4 Aplicações para o Corpo Humano

De acordo com Mondal (2007) a tecnologia para a incorporação de microcápsulas de PCM na estrutura das fibras têxteis aumentando sua performance térmica foi desenvolvida no

início dos anos 80, em um programa de pesquisa da NASA. A intenção inicial era usar fibras com PCM nos uniformes dos astronautas de forma a aumentar a proteção térmica contra as temperaturas extremas do espaço. Esta tecnologia atualmente está disponível em roupas destinadas a práticas esportivas, roupa de cama, tecidos utilizados como forração em móveis, uniformes de bombeiros, forças armadas e qualquer atividade em que operários tenham que trabalhar sob condições de temperatura desfavoráveis ao corpo humano.

De acordo com Sarier e Onder (2012) o isolamento térmico dos materiais têxteis pode ser alcançado através do uso de materiais isolantes passivos ou ativos. Os isolantes térmicos passivos compreendem os materiais têxteis tradicionais, como tecidos fabricados de algodão, lã, seda, poliéster, etc. Estes tipos de fibras possuem condutividade térmica muito baixa e tem a capacidade de aprisionar grandes quantidades de ar, propiciando a manutenção da temperatura corporal. Roupas com PCM podem absorver calor do corpo humano ou do ambiente em condições de alto índice de atividade física e/ou clima excessivamente quente. De modo oposto, elas redistribuem e liberam calor quando em ambientes frios.

2.6.5 Aplicações Para Conforto Térmico em Edificações

Em edificações antigas, construídas com paredes grossas de alvenaria ou concreto, temperaturas amenas são atingidas no verão devido à grande massa e ao calor específico destes materiais, fatores que conferem uma “inércia térmica” a este tipo de construção. Em contraste, os edifícios modernos, construídos com materiais leves, tem capacidade de armazenamento térmico muito menor, resultando em sobreaquecimento dos ambientes durante o verão. Os modernos escritórios, dotados de muitas superfícies de vidro, sofrem incremento de temperatura adicional, devido ao alto ganho de energia solar (VOELKERS, KORNADT e OSTRY, 2008).

Considerando-se a alta capacidade de armazenamento térmico dos PCMs e as características das construções atuais, inúmeros pesquisadores tais como Zhou et al. (2012), Pomianowski, Heiselberg e Johannes (2013), Cabeza et al. (2007), Tyagi, e Buddhi (2007), Baetens, Jelle e Gustavsen (2010), Alawadhi (2012), Goya et al. (2014), Huang, Feng e Zhang (2014), entre outros, tem apresentado estudos e revisões mostrando a viabilidade da aplicação dos PCMs em paredes (uso de placas), assoalhos, forros, sótão, no concreto, em tijolos, nos vidros e em persianas ou venezianas.

A Fig.(2.11) mostra uma interessante comparação entre a espessura que materiais usuais da construção civil deveriam ter para armazenarem a mesma quantidade de calor, em termos volumétricos, que 10mm de PCM. Neste comparativo, o PCM utilizado tem uma capacidade de armazenamento de 130 MJm^{-3} e a diferença de temperatura considerada foi de 4 K.

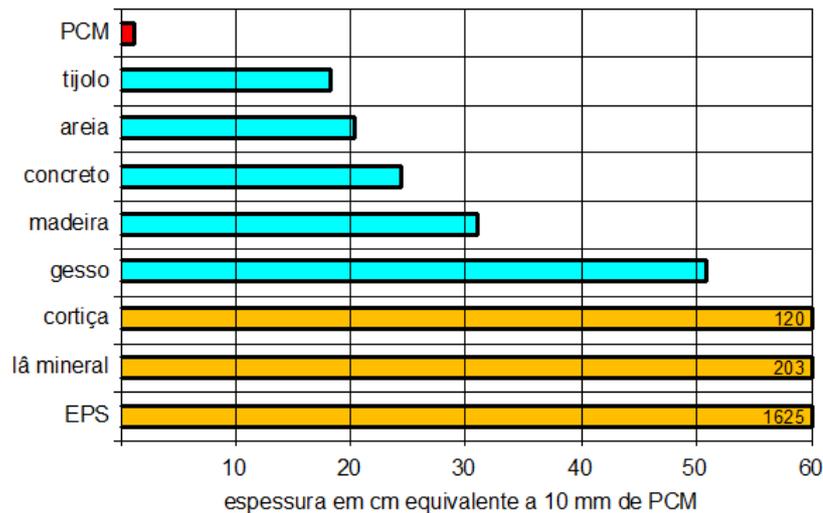


Figura 2.11–Espessura necessária para que diferentes materiais de construção armazenem a mesma energia térmica que 10mm de PCM.

Fonte: Adaptado do Anexo 17 – ECES/IEA, 2001

A Fig.(2.12) mostra os resultados obtidos em testes experimentais realizados pela empresa Dupont, com a supervisão do grupo Electricité de France (EDF), em duas residências idênticas, localizadas na França, sendo que em uma delas foi aplicado o produto Energain[®] como revestimento do sótão e a outra foi mantida com os materiais tradicionais de construção. É importante destacar que o sótão foi escolhido por representar a parte da residência mais sujeita a sobreaquecimento, sendo as placas de Energain[®] aplicadas na superfície interna ao telhado, nas paredes laterais e no forro. Os resultados obtidos indicaram uma redução média de $4,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e máxima de $6,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura ambiente da casa equipada com Energain[®]. Estudos similares realizados por Khudair e Farid (2004), Cabeza et al. (2007) reportaram uma redução na temperatura interna em torno de $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas reduções implicam diretamente em menor consumo de energia elétrica para refrigeração de ambientes.

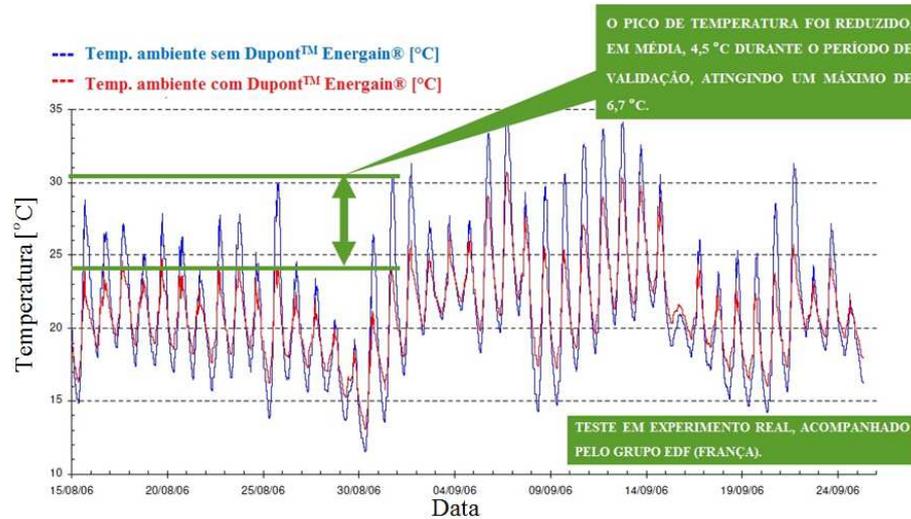


Figura 2.12 – Temperaturas registradas em ambientes com e sem Dupont™ Energain®.

Fonte: Adaptado de Dupont (www.energain.dupont.com).

2.6.6 Aplicações na Área Solar

Os trabalhos de Hammou e Lacroix (2006), Charvát, Klimes e Ostrý (2014) e Karthikeyan et al. (2014) demonstraram a viabilidade de diferentes PCMs para uso em sistemas de aquecimento ambiental a partir de energia solar. Particularmente, o trabalho de Hammou e Lacroix (2006) comprovou que um sistema de aquecimento composto por coletores solares planos e armazenamento térmico com PCM foi capaz de reduzir em 32% o consumo de energia elétrica de uma residência no Canadá, apresentando, portanto, um retorno de investimento muito atrativo.

Dang (1985), Hussein, El-Ghetany e Nada (2008), El-Sebaei et al. (2011) e Sharma et al. (2009) desenvolveram estudos mostrando a viabilidade dos PCMs em fogões solares. Hussein, El-Ghetany e Nada (2008) demonstraram que um fogão solar dotado de armazenamento térmico com PCM é capaz de apresentar temperatura mínima de 76 °C e máxima de 109 °C, possibilitando o cozimento de alimentos entre 10 h e 12 h e o reaquecimento dos mesmos durante os períodos da noite ou da manhã seguinte.

Na área de aquecimento de água destacam-se os seguintes trabalhos: Serale et al. (2014), demonstrando que o uso de sistema de aquecimento dotado de PCM apresentou eficiência superior aos sistemas convencionais de aquecimento por energia solar; Metawee e Assassa (2006) apresentando a proposta do coletor solar compacto mostrado na Fig.(2.13), contendo PCM com $T_{pc}=54,5$ °C e $L=266$ kJ kg⁻¹; e os trabalhos Qarnia (2009) e Mahfuz et al.

(2014) sobre aquecimento solar de água com tanque de PCM, como o mostrado na Fig.(2.14) ($T_{pc}=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $L=200,74\text{ kJ kg}^{-1}$).

Outras áreas nas quais a aplicação de PCMs vem sendo estudadas são: secagem de grãos, plantas medicinais, frutas e outros vegetais, através de pesquisadores como Shalaby e Bek (2014) e Çakmak e Yildiz (2011); e o uso de PCM em grandes centrais de geração de energia elétrica solar a partir de concentradores cilindro-parabólicos, como o estudo de Hoshi et al. (2005).

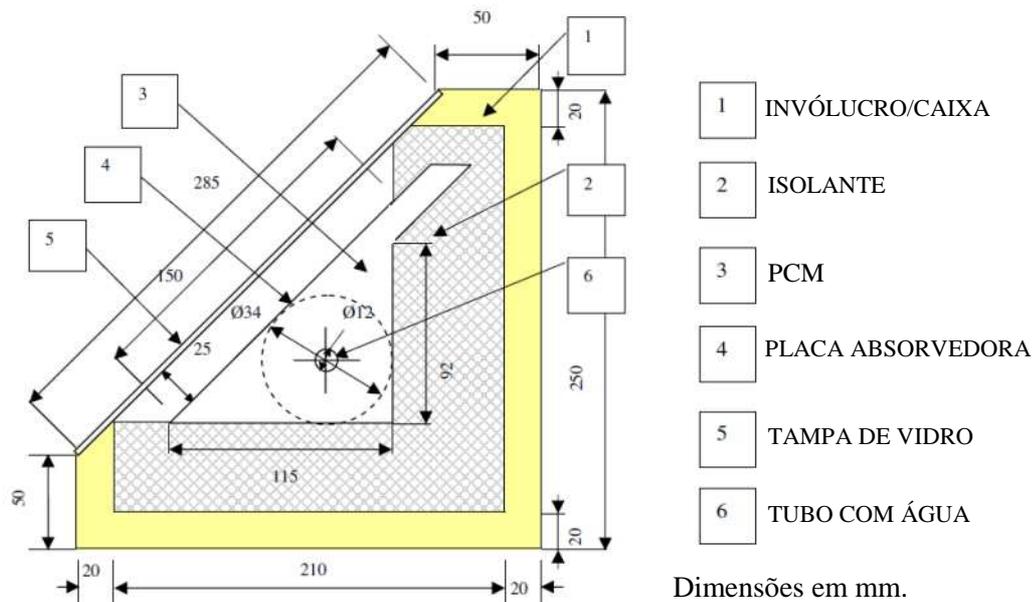


Figura 2.13 – Proposta de coletor solar compacto com PCM para aquecimento de água.

Fonte: Adaptado de Metawee e Assassa, 2004.

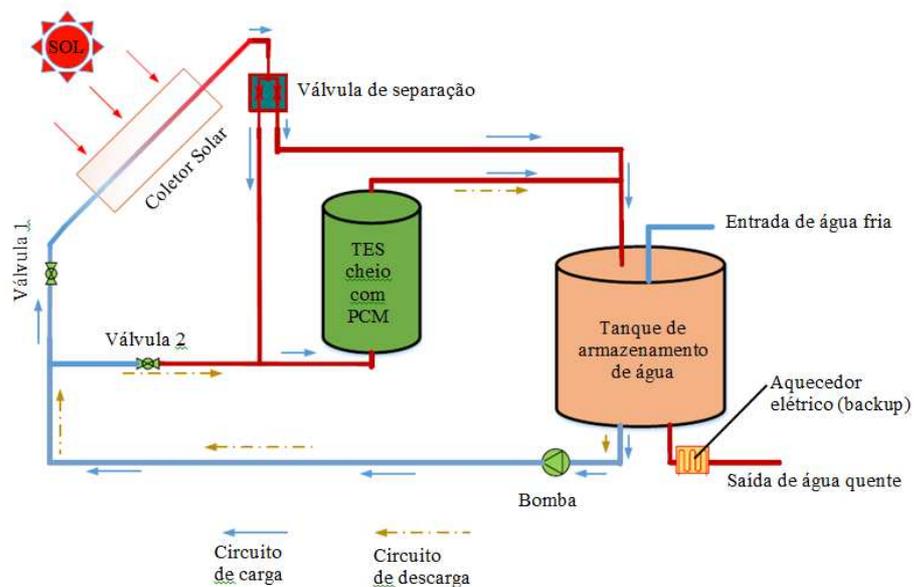


Figura 2.14 – Sistema de aquecimento solar de água com tanque de PCM.

Fonte: Adaptado de Mahfuz et al., 2014.

2.7 ESTUDOS DE PCMS EM CAVIDADES

Além do trabalho de Shmueli et al. (2010), utilizado para a validação numérica e abordada no Item 5.2, diversos pesquisadores focaram seus esforços no estudo de geometrias cilíndricas. Murray e Groulx (2014) analisaram experimentalmente o processo de transferência de calor durante consecutivos ciclos carga/descarga de PCM visando aplicação em sistema de aquecimento solar de água. Eles demonstraram que o aumento da taxa de escoamento do líquido de transferência térmica (HTF), durante o processo de carga, resulta em fusão significativamente mais rápida. Por outro lado, durante o processo de descarga, um aumento do escoamento não afeta o tempo requerido para a solidificação do PCM

Longeon et al. (2013) estudaram, de forma numérica e experimental, a influência do ponto de entrada do fluido de transferência térmica (HTF) no tempo de fusão/solidificação do PCM RT 35 em um trocador de calor tipo casco-tubo. Os autores concluíram que o melhor rendimento do sistema era obtido executando a entrada do HTF pelo topo do trocador de calor durante o processo de carga e pela base durante o processo de descarga.

Zeng et al. (2013) analisaram experimentalmente a fusão de PCM com propriedades térmicas incrementadas através da adição de nanopartículas (NePCM). Estes concluíram que a melhoria na troca térmica, propiciada pelas nanopartículas, não se traduz em redução no tempo de fusão devido à diminuição da viscosidade do PCM e dos processos de convecção que nele acontecem.

Al-Abidi et al. (2013) investigaram numericamente os processos de solidificação do PCM RT 82 em um trocador de calor composto por três tubos verticais concêntricos, sendo o PCM armazenado no tubo intermediário, dotado de diferentes configurações de aletas e espessura destas aletas. Eles concluíram que o número de aletas e o comprimento delas influenciam diretamente na redução dos tempos de solidificação, ao passo que a espessura das aletas não tem efeito sobre o processo de solidificação.

Tay, Bruno e Belusko (2013) executaram análise experimental do processo de fusão de PCM em tanque cilíndrico vertical dotado de tubos de cobre que executavam a circulação do fluido de transferência térmica e também da recirculação do PCM já liquefeito, processo ao qual estes autores deram o nome de “dynamic melting”. Com a adoção deste tipo de técnica, os autores demonstraram que os resultados obtidos são equivalentes à duplicação da condutividade térmica do PCM, sendo este efeito comparável ao conseguido com a adição de aletas ao sistema.

Kalaiselvam et al. (2008) avaliaram, tanto de forma experimental como numérica, os processos de fusão e solidificação de três PCMs parafínicos. Na etapa de solidificação, os processos numéricos resultaram em um tempo 11% inferior aos obtidos experimentalmente. Já durante o processo de fusão, os tempos obtidos numericamente foram 16,11% inferiores aos coletados nos testes.

O estudo de PCMs em cavidades retangulares também tem crescido nos anos recentes, principalmente com vistas ao uso em dissipadores de calor e atenuação de aquecimento de dispositivos eletrônicos, conforme abordado na Seção 2.6.2. Shatikian, Ziskind e Letan (2005), Fok, Shen e Tan (2010), Hosseinizadeh, Tan e Moosania (2011), Ye, Zhu e Wang (2011) concentraram seus esforços de pesquisa nesta área. Chen, Gao e Shi (2014) e Li et al. (2012) avaliaram, de forma experimental e numérica, o processo de fusão de PCMs em cavidades retangulares preenchidas, respectivamente, com espuma de cobre e alumínio, visando o incremento da condutividade térmica do PCM. Os resultados obtidos mostraram que as espumas metálicas são capazes de aumentar a transferência de calor sólido-líquido. A transferência de calor no composto PCM/espuma é dominado pela condução de calor na matriz metálica e o efeito desta estrutura é significativo durante o processo de fusão do PCM.

Kamkari, Shokoumand e Bruno (2014) estudaram, experimentalmente, através de um trocador de calor com cavidade retangular, a influência da inclinação desta cavidade no tempo de fusão do PCM, constatando que a melhoria na taxa de transferência de calor usando cavidade horizontal é mais de duas vezes superior ao observado com a cavidade na posição vertical.

MacDevette e Myers (2012) analisaram, numérica e experimentalmente, o processo de fusão de um cubo contendo o PCM n-octadecano, recebendo calor a partir da superfície inferior. Eles constataram que a redução da altura do PCM sólido era, aproximadamente, linear, permitindo a obtenção de uma forma para o cálculo do tempo de fusão. Adicionalmente, os parâmetros que mais influenciam no processo de fusão são o coeficiente de troca térmica e a temperatura da parede quente.

Zhang et al. (2012) analisaram, experimentalmente, as características de transferência térmica de um composto de PCM microencapsulado na forma pastosa (MPCMS – Microencapsulated Phase Change Material Slurry), constatando que ele tem um grande efeito na transferência de calor, por convecção natural, em cavidades retangulares horizontais.

Quanto ao estudo da utilização de PCM em cavidades esféricas, pode-se destacar os seguintes trabalhos: Assis et al. (2007) avaliaram, de forma numérica e experimental, o processo de fusão do RT27 em diferentes diâmetros esféricos e variando a temperatura da

parede entre 2 à 20 °C acima da temperatura de mudança de fase, estabelecendo correlações com os números de Fourier, Stefan e Grashof. As simulações realizadas conseguiram reproduzir o fenômeno de aumento de volume devido à mudança de fase, o movimento de "imersão" do PCM, ainda sólido, para a parte inferior da esfera, contendo o PCM já liquefeito, bem como o avanço da fusão nesta região.

Assis et al. (2007) estudaram o processo de solidificação do RT27 para diferentes diâmetros e com a temperatura da parede variando entre 10 a 40 °C abaixo da temperatura de mudança de fase e demonstraram que, dependendo do diâmetro da esfera e da velocidade do processo de solidificação, ocorre a formação de vazios no interior do PCM, que ocasionam uma redução no armazenamento térmico do sistema.

Tan (2008) e Khot, Sane e Gawali (2011) verificaram que a fusão de PCM em cavidades esféricas abertas é mais rápida do que em cavidades esféricas fechadas.

Ettouney et al. (2006) demonstraram que o uso de capsulas esféricas contendo PCM e partículas metálicas pode reduzir em 15% o tempo de fusão do PCM.

3 ABORDAGEM NUMÉRICA

A fluidodinâmica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics) é o conjunto de ferramentas numéricas e computacionais utilizadas para resolver, visualizar e interpretar a solução das equações de balanço de momento, massa e energia. Tal ferramenta utiliza técnicas numéricas avançadas para solucionar problemas complexos de engenharia, física e muitas outras áreas, já que esse tipo de simulação computacional é capaz de prever fenômenos físicos e físico-químicos que ocorrem em um dado escoamento. Hoje em dia, essa ferramenta vem sendo cada vez mais utilizada no desenvolvimento de produtos de consumo, aplicações industriais, aeroespaciais e de defesa. Em qualquer aplicação que envolva o escoamento de gases, escoamento de líquidos ou transferência de calor, a análise por CFD possibilita a inovação e novos patamares de eficiência para produtos e processos. Atualmente existem diversos softwares comerciais de CFD disponíveis no mercado. Dentre os mais conhecidos destacam-se o ANSYS CFX, o ANSYS Fluent, o Star-CD e o Flow-3D, entre outros.

O presente estudo foi desenvolvido utilizando-se os softwares CFD ANSYS Fluent, ANSYS CFX e ANSYS ICEM, todos disponíveis no Laboratório de Simulação Numérica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UNISINOS.

3.1 SOFTWARE ANSYS

Neste trabalho foram utilizados vários softwares da empresa ANSYS, que são brevemente descritos na sequência.

3.1.1 Módulo ICEM-CFD

O software ICEM-CFD, parte integrante do pacote computacional ANSYS CFX, é utilizado para a criação da malha computacional, passo inicial e indispensável para qualquer simulação numérica. Nesta etapa são criadas as geometrias 2D ou 3D, as quais devem representar o modelo físico que se deseja simular. Cada uma das superfícies da geometria recebe nomes para a sua correta identificação e posterior definição das condições de contorno aplicáveis.

As geometrias são então subdivididas formando uma malha computacional, a qual deve conter um número de elementos adequado aos cálculos da solução numérica. Uma malha

computacional com quantidade de elementos extremamente baixa levará a um resultado numérico incorreto. Por outro lado, uma malha computacional com número de elementos excessivamente alto, demandará um tempo de processamento que pode, em alguns casos, inviabilizar as tarefas de análise. Os resultados obtidos com uma determinada malha computacional são considerados corretos quando é apresentada, junto com os resultados numéricos, a validação da malha computacional. Basicamente a validação da malha computacional consiste em avaliar quais os valores de variáveis de importância para o objetivo do problema são obtidos quando são utilizadas malhas computacionais com 30% e com 60% a mais elementos do que a malha computacional inicial. Se os resultados gráficos obtidos com estas duas novas malhas computacionais forem muito próximos (ou idênticos) aos da malha computacional inicial, considera-se que a malha computacional inicial está adequadamente dimensionada.

3.1.2 Software ANSYS Fluent

O software ANSYS Fluent é o software comercial mais utilizado nas pesquisas envolvendo PCMs, a exemplo dos trabalhos de Shmueli et al. (2010), Assis et al. (2007) e Al-Abidi et al. (2013), entre outros. Além disso, ele é amplamente empregado em várias áreas da indústria devido ao fato de incorporar inúmeros modelamentos que descrevem escoamentos físicos complexos. Este software permite a importação de malhas computacionais geradas a partir de vários geradores de malha, tais como o ANSYS ICEM, ou mesmo a importação de volumes gerados a partir dos principais softwares CAD 3D disponíveis no mercado.

Para a solução dos problemas de escoamento estão disponíveis, segundo a documentação técnica do software Fluent, quatro diferentes "solvers", dentre eles "solvers" baseados em acoplamento de pressão, e "solvers" baseados em massa específica. Para estudo de escoamentos turbulentos, o ANSYS Fluent dispõe de diversos modelos de turbulência, tais como os populares modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$, além de modelos apropriados à análise de escoamentos altamente anisotrópicos. Outras funcionalidades do software permitem a simulação de escoamentos reativos, escoamentos multifásicos e análises avançadas na área acústica.

Para a simulação do processo de fusão de PCM no Fluent, são necessárias as seguintes etapas: importação e verificação da malha computacional; definição das equações governantes, do tipo de escoamento (se laminar ou turbulento), do tipo de regime (se permanente ou transiente); direção da aceleração da gravidade (quando necessária), se mono ou multifásico,

entre outros. Outras condições que devem ser especificadas são aquelas chamadas de condições de controle de simulação, tais como: critério de convergência, número de iterações e intervalo de tempo, entre outros. Além disso, também devem ser especificadas as condições iniciais e de contorno do problema, bem como a definição das propriedades termofísicas dos materiais utilizados na simulação.

No caso de um problema multifásico, como são os casos envolvendo o estudo de PCMs, são igualmente importantes a definição dos modelos numéricos a serem utilizados na solução do problema: multifásico do tipo volume de fluido (VOF), com análise dos balanços de energia, escoamento do tipo laminar e modelo de fusão e solidificação (solidification and melting) com a especificação do valor da constante C (mushy zone) a ser utilizada nos cálculos. O modelo de “volume de fluido” (VOF) pode ser aplicado quando há dois ou mais fluidos ou fases imiscíveis, ou seja, não há interpenetração entre os fluidos, havendo uma interface bem definida entre eles, cujo formato ou deslocamento se deseja estudar. Exemplos típicos de simulação numérica com o uso do VOF são análises envolvendo o deslocamento de bolhas em um líquido, o deslocamento de um líquido após o rompimento de uma comporta, o deslocamento transiente ou permanente de uma interface gás-líquido, o escoamento da água pelo casco de um navio, processos de moldagem por sopro ou o preenchimento de moldes de injeção.

3.1.3 Software ANSYS CFX

O software ANSYS CFX possui quatro módulos básicos: ICEM CFD, CFX-Pré, CFX-Solver e CFX-Post. O módulo ICEM-CFD já foi detalhado na Seção 3.1.1. No módulo CFX-Pré a malha computacional é importada e são aplicadas as condições iniciais e de contorno, além de serem definidos todos os parâmetros da simulação, modelos matemáticos e controles de convergência, da maneira similar ao que foi descrito para o software ANSYS Fluent. No CFX-Solver são executados os cálculos da simulação e é feito o acompanhamento da evolução do processo numérico através das curvas de convergência. O módulo CFX-Post permite uma ampla gama de análise dos resultados, possibilitando inclusive a exportação dos resultados obtidos para uso em outros aplicativos, como planilhas eletrônicas, por exemplo.

3.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A geometria estudada consiste de uma cavidade cilíndrica vertical, conforme apresentado na Fig. (3.1). Nesta geometria o diâmetro (D) é de 30 mm e a altura do PCM ($H1$) é de 170 mm, sendo a aceleração da gravidade contrária ao eixo Y .

Devido à variação de temperatura, ocorre variação do volume do PCM. Por isso, é necessário que exista certa quantidade de ar na cavidade que contém o PCM, representado pela altura $H2$, que é de 40 mm. Assim, durante o processo de aquecimento, ocorre um deslocamento ascendente da interface PCM-ar, sem que haja escape de PCM. Na Fig.(3.1), a fase sólida é mostrada em cor azul e o ar, na parte superior, é mostrado em cor vermelha.

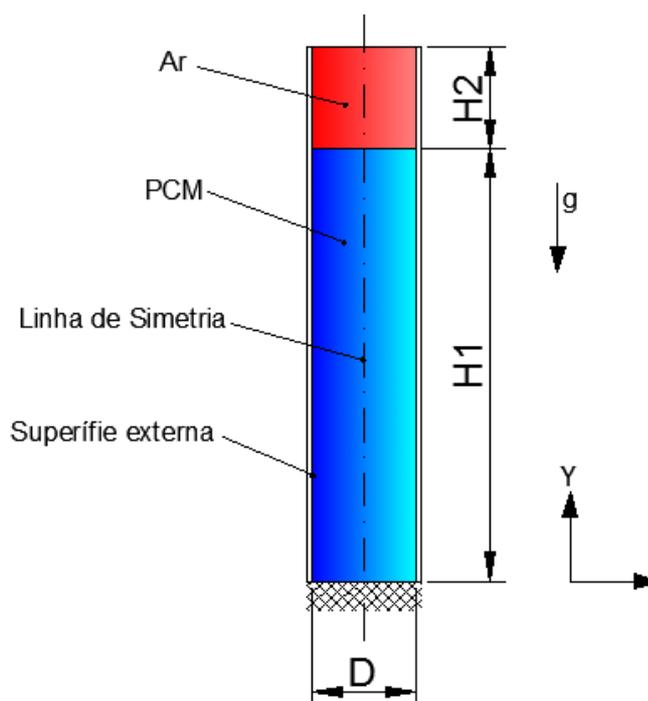


Figura 3.1 – Modelo numérico em $t = 0$ s.

Fonte: Adaptado de Shmueli et al. (2010).

Como visto anteriormente, os PCMs apresentam alguns problemas técnicos e os pesquisadores têm feito esforços no sentido de apresentar estratégias de solução para os mesmos. No entanto, devido à diversidade de PCMs disponíveis, vários destes materiais ainda não foram estudados detalhadamente.

Os PCMs da empresa alemã Rubitherm Technologies GmbH, uma das pioneiras nesta área, são PCMs parafínicos (orgânicos) e abrangem temperaturas de mudança de fase de -9 °C até 100 °C. São denominados “RT”, seguido do valor correspondente a temperatura de

mudança de fase. Além disso, para algumas temperaturas de mudança de fase existem dois tipos de PCM: aqueles considerados padrão e aqueles considerados de alta capacidade térmica. Assim, na denominação destes últimos (de alta capacidade térmica), após a indicação da temperatura de mudança de fase, é acrescentado as letras HC. Assim, os RT9 e RT9HC representam o PCM com mudança de fase à 9°C, com capacidade térmica padrão e com alta capacidade térmica, respectivamente.

As análises propostas para este trabalho compreendem o estudo numérico do processo de fusão dos PCMs relacionados na Tab. (3.1), quando submetidos a temperaturas de 10, 20 e 30 °C acima de suas respectivas temperaturas de mudança de fase (T_{pc}), ou seja com $\Delta T=10$, 20 e 30 °C. Algumas propriedades adicionais destes PCMs foram obtidas diretamente com o fabricante e constam no apêndice A deste trabalho.

Tabela 3.1 – Temperatura de fusão, calor latente e condutividade térmica dos PCMs.

PCM	Temperatura de Fusão [°C]	Calor Latente de Fusão. $L_{\pm 7,5\%}$ [kJ kg ⁻¹]	Condutiv. Térmica k [W m ⁻¹ K ⁻¹]
RT 4	2 – 4	182	0,2
RT 35	29 – 36	170	0,2
RT 35 HC	34 – 36	240	0,2
RT 55	51 – 57	172	0,2
RT 82	77 - 85	176	0,2

Fonte: Adaptado de Rubitherm Technologies GmbH. (www.rubitherm.com)

A escolha dos PCMs a serem investigados numericamente foi feita visando possíveis aplicações de mercado. Assim sendo, o RT 4 pode ser utilizado para aplicações de conservação e transporte de alimentos ou produtos farmacêuticos; o RT 55 é de interesse na área de aquecimento solar de água; o RT 35 e o RT 35 HC foram incluídos no estudo para que se possa avaliar a diferença entre os PCMs que possuem calor latente de fusão “padrão” com um de “alta capacidade” e, por fim, o RT 82 também foi acrescentado por ter uma das temperaturas de mudança de fase mais altas dentre as oferecidas pela Rubitherm Technologies GmbH e poder ser utilizado em reaproveitamento de calor de processos industriais.

Na Tab. (3.2) são apresentados os casos simulados (1-30) e detalhes do tipo de PCM, constante C (*mushy zone*) e ΔT investigados. Para os casos 1 à 15 serão analisadas a influência da temperatura sobre a velocidade do processo de fusão dos PCMs. Nos Casos 16 à 30 é investigada a influência da constante C e realizada a comparação entre o PCM RT

35(padrão) com o RT 35 HC (alta capacidade). Vale destacar que a constante C é detalhada no modelo matemático, Seção 3.3.

Tabela 3.2 – Casos simulados, tipo de PCM, temperatura de mudança de fase, C e ΔT .

Caso	PCM	T_{pc} [°C]	C [kg m ⁻³ s ⁻¹]	ΔT [°C]
1- 3	RT 4	2-4	10^7	10, 20 e 30
4- 6	RT 35	29-36	10^7	10, 20 e 30
7-9	RT 35 HC	34-36	10^7	10, 20 e 30
10- 12	RT 55	51-57	10^7	10, 20 e 30
13- 15	RT 82	77-85	10^7	10, 20 e 30
16- 20	RT 35	29-36	$10^{5, 6, 7, 8, 9 e 10}$	10
21- 25	RT 35 HC	34-36	$10^{5, 6, 7, 8, 9 e 10}$	10
26-30	RT 82	77-85	$10^{5, 6, 7, 8, 9 e 10}$	10

Vale destacar que as simulações foram feitas utilizando as especificações técnicas de cada PCM (temperaturas de fusão e solidificação, calor latente de fusão, massas específicas nos estados sólido e líquido, condutividade térmica e viscosidade dinâmica) disponíveis no website da empresa Rubitherm Technologies GmbH e também através de contatos pessoais, feitos via e-mail, com o Sr. Andreas Lärz, gerente de produção da mesma.

3.3 MODELO MATEMÁTICO

As equações que compõem o modelo numérico são a equação da conservação da massa (Eq. 3.1), da quantidade de movimento (Eq. 3.2), da energia (Eq. 3.3) e da fração volumétrica (Eq. 3.4) (ANSYS, 2013).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = - \nabla p + \nabla (\mu \nabla \vec{V}) + \rho g + \vec{S} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial(\alpha_n)}{\partial t} + \nabla (\alpha_n \vec{V}) = 0 \quad (3.4)$$

onde α_n é a fração volumétrica do PCM na enésima célula computacional, podendo assumir três condições: se $\alpha_n = 0$, a enésima célula não contém o PCM; se $\alpha_n = 1$, a enésima célula está cheia de PCM; se $0 < \alpha_n < 1$, a enésima célula contém a interface entre o PCM e um ou mais fluidos existentes no domínio computacional; ρ é a massa específica, k é a condutividade térmica, μ é a viscosidade dinâmica, \vec{S} é o termo fonte da quantidade de movimento, \vec{V} é o vetor velocidade, T é a temperatura, h é entalpia específica e p é a pressão.

A entalpia específica é definida como a soma da entalpia sensível (h_s , Eq. 3.5) e da variação de entalpia devida à mudança de fase (γL), onde h_{ref} é a entalpia de referência na temperatura de referência (T_{ref}), C_p é o calor específico a pressão constante, L é a entalpia de fusão (calor latente de fusão do material) e γ é a fração líquida durante a mudança de fase, que ocorre em uma faixa de temperatura $T_s < T < T_l$, definida pela Eq. (3.6) (Shmueli et al., 2010).

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT, \quad (3.5)$$

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s, \\ 1 & \text{se } T > T_l, \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{se } T_s < T < T_l. \end{cases} \quad (3.6)$$

A técnica entalpia-porosidade, analisada por Brent e Voller (1988), trata a região de mudança de fase (parcialmente solidificada), como se fosse um meio poroso. A porosidade em cada célula é definida como igual à fração líquida naquela célula. Em regiões totalmente solidificadas a porosidade é igual a zero, o que extingue as velocidades nestas regiões. O termo fonte (\vec{S}) da equação da quantidade de movimento (3.2) toma a seguinte forma:

$$\vec{S} = -A(\gamma)\vec{V} \quad (3.7)$$

onde $A(\gamma)$ é a “função porosidade” definida por Brent e Voller (1988), é definida pela Eq. (3.8).

$$A(\gamma) = \frac{C(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)}, \quad (3.8)$$

onde ε é uma pequena constante para evitar a divisão por zero, recebendo valor de 0,001 e C é a constante que reflete o processo cinético e a morfologia da região de mudança de fase. Entre outros, esta constante foi estudada por Brent e Voller (1988) e Shmueli et al. (2010). Estes pesquisadores demonstraram que C controla, efetivamente, o grau de penetração de massa

região de mudança de fase e, desta maneira, conduz a um processo de fusão (ou solidificação) mais rápido ou mais lento, dependendo do valor adotado. Normalmente estes valores variam entre 10^5 à 10^{10} . Pesquisadores como Voller e Prakash (1987), Pal e Joshi (2001), além dos acima já citados, estudaram o processo de fusão de PCMs utilizando a constante C na faixa de 10^5 - 10^6 e Katsman (2006) demonstrou que o uso de $C=10^5$ resultava em tempos de fusão 2,5 vezes menores que os obtidos em resultados experimentais.

3.3.1 Obtenção da Fração Líquida e do Fluxo de Calor

Apesar dos softwares ANSYS CFX e Fluent contarem com inúmeras ferramentas para pós-processamento, a fração líquida não é obtida de forma direta. Para obtê-la foi necessário desenvolver uma rotina extra, a qual é descrita na sequência. A fração líquida é obtida através das Eq. (3.9)-(3.13) juntamente com o esquema geométrico mostrado na Fig. (3.2), a qual apresenta as etapas do processo de cálculo e identifica a área e linha, na cor laranja, como área ou limite da fase sólida, respectivamente.

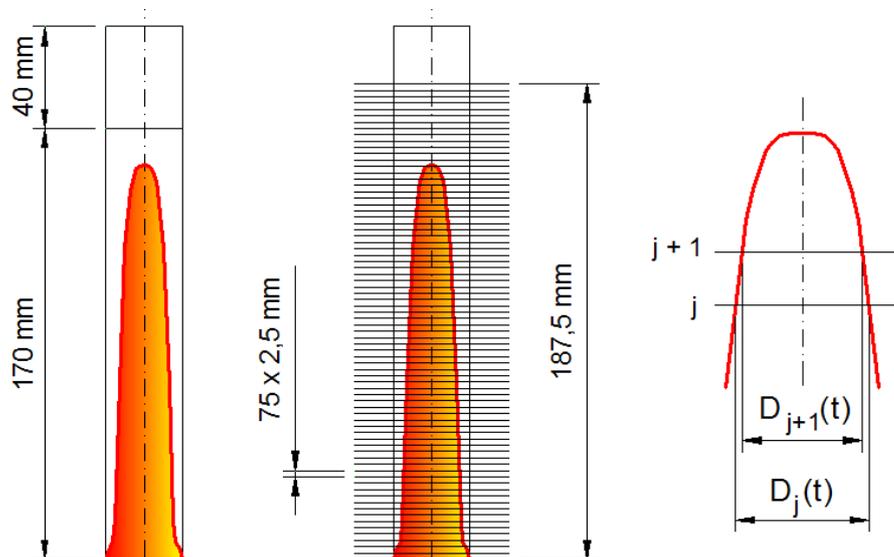


Figura 3.2 – Esquema ilustrativo da metodologia adotada para o cálculo do volume do PCM ainda sólido em um instante “ t ”.

Após a obtenção do contorno do PCM ainda sólido, através do módulo CFX-POST, foram criados 75 planos, a partir da base da geometria, com espaçamento de 2,5 mm entre os mesmos. Expressões matemáticas inseridas no CFX-POST permitiram obter os diâmetros do PCM ainda sólido, em todos os 75 planos criados. Para um determinado instante “ t ”, o cálculo de volume entre dois planos consecutivos, “ j ” e “ $j+1$ ”, é feito através da seguinte equação:

$$V(t)_{j,j+1} = \frac{\pi D_m^2(t) H_{j,j+1}}{4} \quad (3.9)$$

onde $D_m(t)$ é o diâmetro médio em um instante "t", calculado a partir dos diâmetros D_j e D_{j+1} naquele mesmo instante.

Os volumes das 74 "fatias" do PCM são então calculados, exportados para uma planilha Excel e somados para a obtenção do volume total do PCM ainda sólido. A fração líquida de PCM, também conhecida na bibliografia como "melt fraction" ou "fração derretida", é obtida através da Eq. (3.10).

$$\alpha(t) = 1 - \frac{V_{total}(t)}{V_0} \quad (3.10)$$

onde $V_{total}(t)$ é o volume total de PCM ainda sólido no instante "t" e V_0 é o volume inicial do PCM sólido (no instante $t = 0$ s).

A taxa de transferência de calor é obtida através da seguinte equação:

$$q = \rho L \frac{\delta V}{\delta t} \quad (3.11)$$

onde L é o calor latente de fusão e $\frac{\delta V}{\delta t}$ é a variação de volume em relação ao tempo, que pode ser descrita como o produto da fração líquida e do volume inicial de PCM sólido, dividido pelo tempo. Assim sendo, a Eq. (3.11) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q = \frac{\rho L V_0 \alpha(t)}{t} \quad (3.12)$$

Para a obtenção do fluxo de calor, divide-se o calor transferido (Eq. 3.12) pela área de troca de calor. Neste caso, para uma geometria cilíndrica, o fluxo é calculado através da Eq. (3.13).

$$q'' = \frac{\rho L r H_1 \alpha(t)}{2t(H_1 + H_2)} \quad (3.13)$$

3.4 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Para a validação do modelo numérico utilizou-se os resultados de Shmueli et al. (2010). Estes autores investigaram a fusão do PCM RT 27 em cavidade cilíndrica vertical, mostrada na Fig. (3.1), e compararam diversas simulações com os resultados experimentais de Katsman et al. (2006).

O problema consiste em manter a temperatura da superfície externa 10 °C acima da temperatura média de fusão do PCM. A parte superior do tubo é exposta ao ar ambiente e a parte inferior foi considerada adiabática. As propriedades do RT 27, cuja temperatura de mudança de fase é 27 °C, são apresentadas na Tab.(3.3).

Tabela 3.3 – Propriedades do RT 27.

Estado:	c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	k [W m ⁻¹ K ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	L [kJ kg ⁻¹]	μ [Pa s]
Sólido	2500	0,2	870	170	-
Líquido	2500	0,2	870 @ 299K 781,5 @ 310K 750 @ 343K	---	-1,137439x10 ⁻⁸ T ³ + 1,1788188x10 ⁻⁵ T ² - 0,004111388T + 0,4857203

Fonte: Adaptado de Shmueli et al. (2010).

Na simulação executada, a temperatura inicial de todo o sistema foi definida como 22 °C, ou seja, o PCM está ligeiramente subresfriado, de forma a garantir que esteja em estado sólido no início da simulação. Foi assumido que ambas as fases, sólida e líquida, do PCM são homogêneas e isotrópicas e que o processo de fusão é simétrico em relação ao eixo central (Fig. (3.1)). Adicionalmente foi considerado que a fase líquida do PCM e o ar são fluidos Newtonianos incompressíveis e escoamento laminar foi assumido para ambos.

3.4.1 Condições de Contorno, Malha Computacional e Demais Parâmetros

Para realizar as simulações foi utilizado o software ANSYS Fluent. As condições de contorno adotadas foram as mesmas especificadas no trabalho de Shmueli et al. (2010). Para descrever a interface entre o PCM e o ar, a qual se desloca com o tempo, sem interpenetração dos dois fluidos, o modelo de “volume de fluido” ou VOF foi utilizado na simulação.

As condições de contorno para as velocidades são de não-deslizamento e não-penetração em todos os contornos sólidos. A parede externa da geometria cilíndrica foi mantida a uma temperatura constante de 38°C (10°C acima da temperatura máxima de fusão do RT 27, que é de 28 °C) e na superfície inferior foi considerada a condição adiabática. No contorno superior, exposto à atmosfera ambiente, a condição de pressão de saída (Pressure Outlet) foi utilizada e a temperatura ambiente assumida foi de 38 °C. A temperatura inicial considerada para todo o sistema foi de 22 °C, inclusive para o ar no interior do tubo.

A geração da malha computacional constitui uma etapa determinante no processo de análise numérica. Uma malha pobre, ou seja, com poucos elementos, faz com que o processo numérico não represente com a acuracidade necessária os diferentes processos físicos que ocorrem durante a mudança de fase do PCM. Por outro lado, deve-se ter sempre em conta que, quanto maior o número de volumes de controle de uma malha, tanto maior será o custo computacional, em termos de tempo de processamento e de capacidade de equipamentos.

A malha computacional mostrada na Fig. (3.3) foi criada seguindo as recomendações do trabalho de Shmueli et al. (2010), tendo cada um de seus elementos, no mínimo, 0,5 mm de lado, com um total de 13.652 elementos.

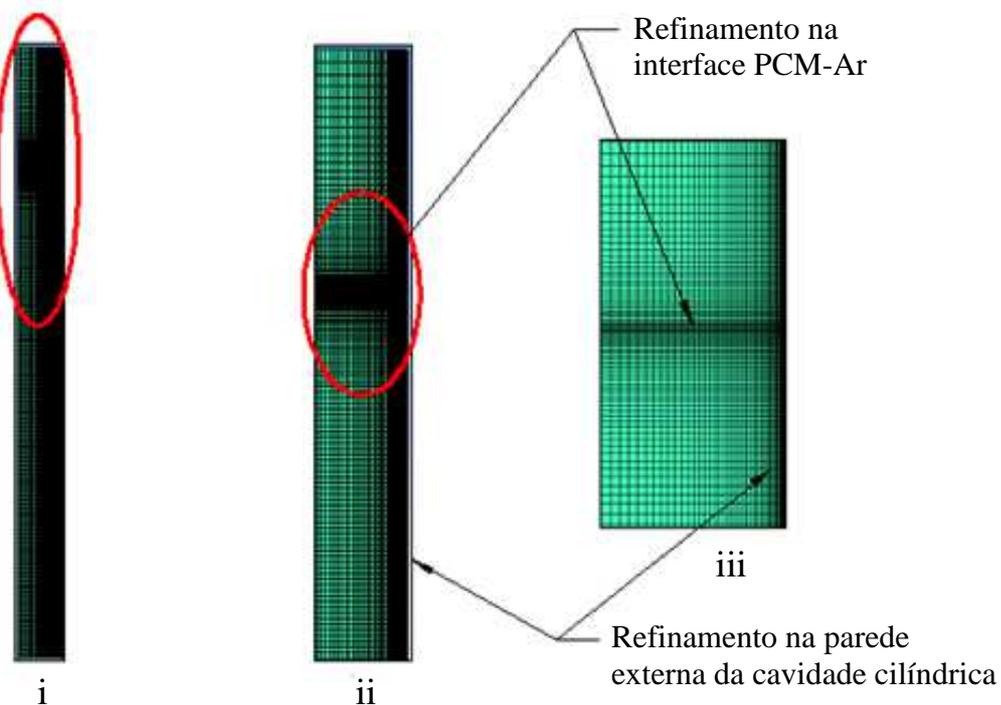


Figura 3.3 - Malha computacional utilizada na validação numérica: (i) aspecto geral da malha, (ii) detalhe da extremidade superior e (iii) detalhe da interface PCM-Ar.

Foi adotado um refinamento em duas regiões distintas: junto à parede externa do cilindro e junto à interface entre o PCM e o ar. Estes refinamentos têm como objetivo,

respectivamente, capturar de forma mais detalhada os efeitos de condução e convecção nos instantes iniciais da simulação e melhor acompanhar o deslocamento da interface, a qual ocorre em função do aumento de volume do PCM.

Na validação numérica foi utilizado intervalo de tempo (Δt) de 0,01 s e os critérios de convergência (CC) para continuidade e as componentes de velocidade foram de 10^{-3} , sendo de 10^{-6} para a energia. A constante C, a qual influencia o comportamento e a evolução da região de mudança de fase (também conhecida como “mushy zone”), foi assumida igual a 10^7 , mesmo valor utilizado por Shmueli et al. (2010).

A presente validação consistiu em uma análise do tipo transiente em um espaço planar bidimensional. Para solução do problema foram adotados os seguintes modelos: volume de fluido (VOF) como modelo multifásico, escoamento laminar como modelo de viscosidade e modelo de solidificação e derretimento. Os resultados parciais da validação foram salvos a cada 600 passos de tempo e o número máximo de iterações para cada passo de tempo foi definido como 1000.

Além da malha padrão, foram executadas simulações com malhas adicionais, contendo um número de elementos 30% e 60% acima da malha padrão. As curvas mostradas na Fig. (3.4) representam a fração líquida do PCM para as três malhas citadas. Percebe-se que os resultados obtidos com a malha padrão foram, praticamente, os mesmos daqueles obtidos com as duas malhas mais refinadas. Numericamente o desvio máximo observado entre a malha padrão e a malha mais refinada (60%) foi de 0,5%. Tal fato significa que a malha padrão é adequada ao uso nas simulações deste trabalho.

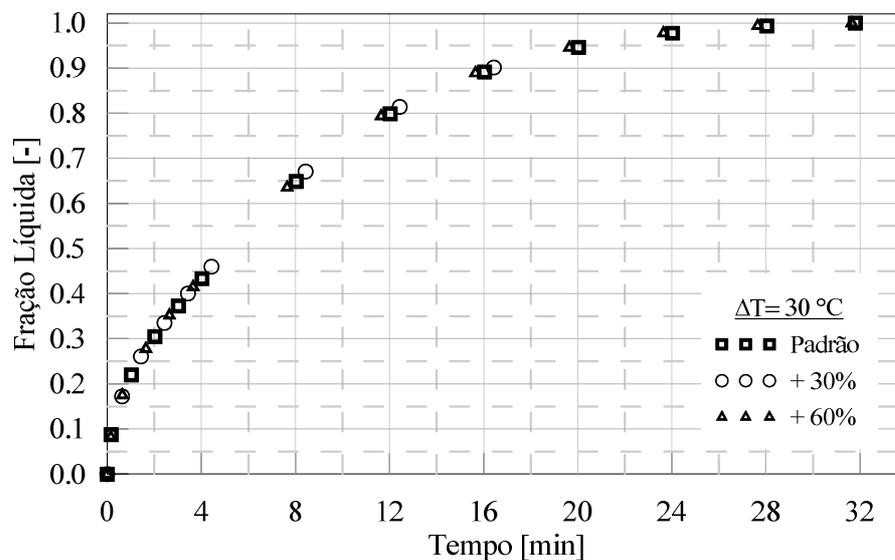


Figura 3.4 – Validação da malha computacional com $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ e $C = 10^7$.

Destaca-se que os resultados apresentados referem-se a $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta condição implica em processos térmicos e fluidodinâmicos mais intensos do que aqueles obtidos com $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, exigindo assim malhas computacionais mais refinadas. Portanto, uma vez feita a validação da malha computacional com o processo mais intenso, os menos intensos também estão assegurados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este Capítulo é dividido em duas partes, as quais apresentam resultados da validação numérica e dos Estudos de Caso, os quais são apresentados na sequência.

4.1 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Na Fig. (4.1) são apresentadas as comparações entre os resultados numéricos obtidos por Shmueli et al. (2010), (Fig. 4.1(i)), experimentais de Katsman (2006), (Fig. 4.1(ii)), e os obtidos na presente validação, (Fig. 4.1(iii)), para tempos de 4 à 36 min. Para facilitar a comparação, nestas figuras é indicada uma linha horizontal tracejada a partir do ponto mais alto de PCM sólido do estudo experimental de Katsman (2006). Comparando-se os resultados verifica-se uma boa concordância entre eles até 16 min. No intervalo de 20 à 24 min, as massas específicas obtidas nos processos numéricos apresentam uma altura de PCM ainda sólido ligeiramente acima do resultado experimental. No intervalo de 28 à 36 min as diferenças de altura e, conseqüentemente, de volume, do PCM ainda sólido são maiores que os obtidos experimentalmente. Esta diferença de altura e volume acentua-se ainda mais aos 36 min.

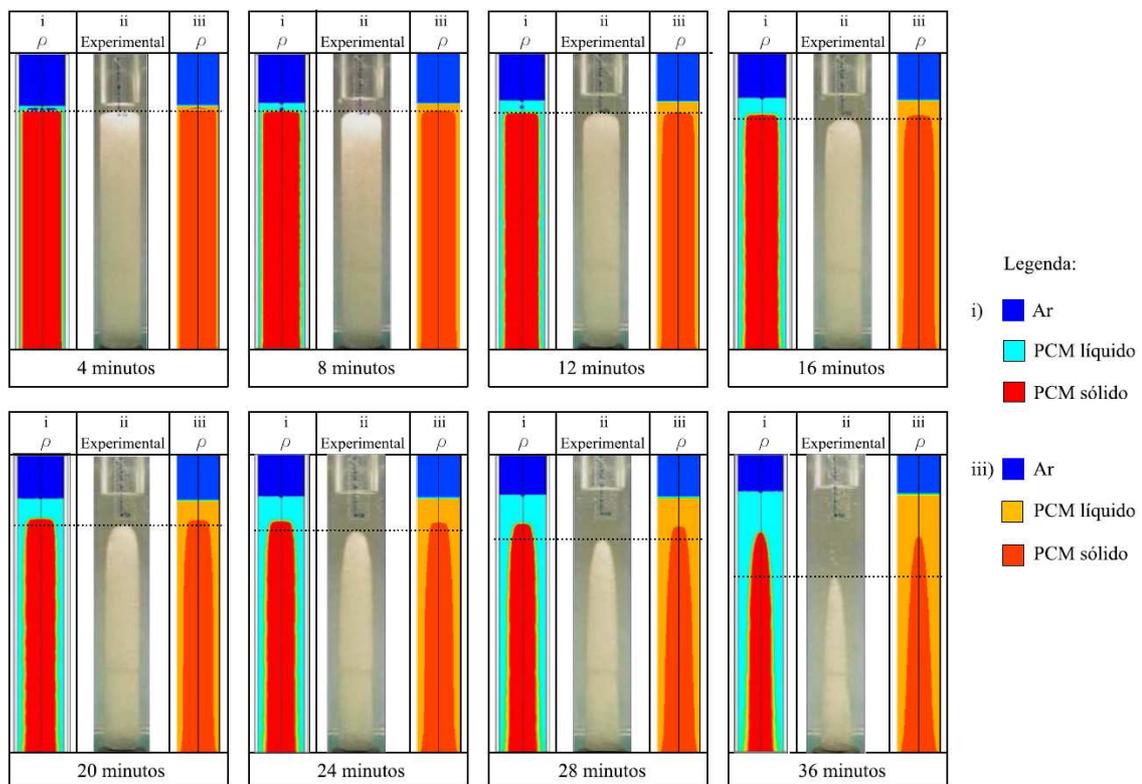


Figura 4.1 – Campos de massa específica (i, iii) vs. imagens experimentais: (i) Shmueli (2010), (ii) Experimental Katsman (2006), (iii) Este trabalho.

A Fig. (4.2) mostra vetores velocidade em diferentes instantes de tempo e permite confirmar as observações feitas por Sparrow e Broadbent (1982), ratificadas no trabalho de Shmueli et al. (2010). No início do processo, a transferência de calor ocorre por condução da parede externa da geometria cilíndrica para a fase sólida do PCM, através de uma finíssima camada de PCM líquido. Na medida em que o processo de fusão avança, a convecção natural no PCM líquido se torna dominante, o que pode ser observado através dos vetores velocidades mostrados, os quais indicam intensidade da velocidade local. A evolução destes processos vai alterando o formato do PCM sólido, inicialmente cilíndrico, para cônico, e, paulatinamente, vai reduzindo o volume da fase sólida.

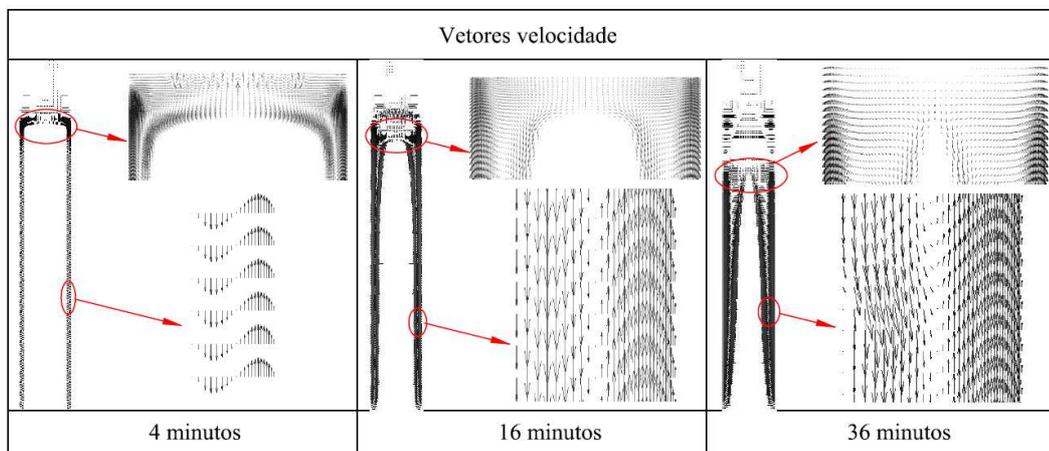


Figura 4.2 – Vetores velocidade da validação numérica.

A variação da fração líquida obtida neste trabalho, juntamente com os resultados numéricos de Shmueli et al. (2010) e experimentais de Katsman et al. (2006) é mostrada na Fig. (4.3) para $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Observa-se boa convergência entre os resultados numéricos de Shmueli et al. (2010) e os obtidos na validação numérica. Os resultados numéricos e experimentais apresentam valores muito próximos até fração líquida de 0,6. Acima deste valor, os resultados numéricos, tanto de Shmueli quanto do presente trabalho, e experimentais já não são tão próximos, sendo de, aproximadamente, 12% o desvio entre eles. Shmueli et al. (2010) testou vários valores para a constante C. O uso da constante $C=10^7$ foi o que apresentou resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente. Assim sendo, nos demais resultados deste trabalho, onde não mencionada, a constante C utilizada é de 10^7 .

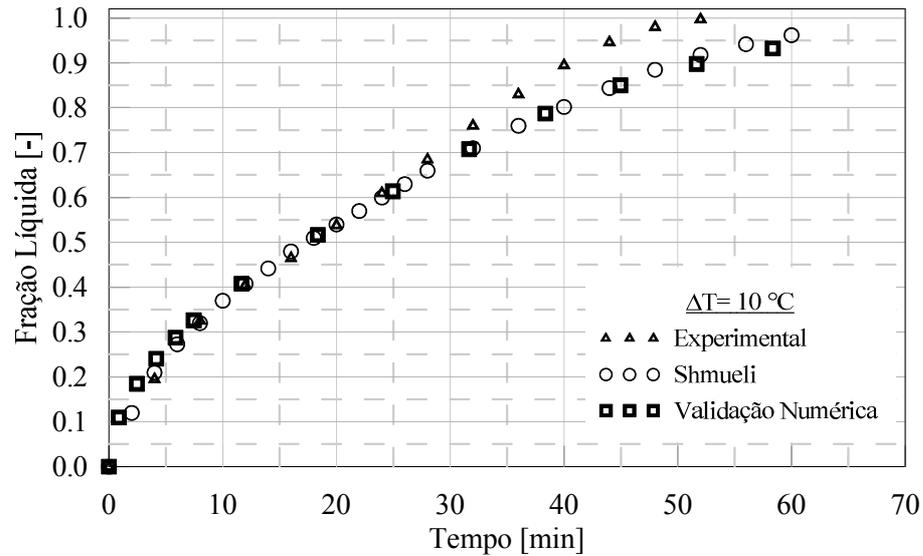


Figura 4.3 – Comparação de simulações numéricas com resultados experimentais.

É importante ressaltar que as simulações numéricas realizadas por Shmueli et al. (2010), utilizando critério de convergência de 10^{-3} para as componentes de velocidade e continuidade e 10^{-6} para a energia, com Δt de 0,002 s, demandavam até 3 meses até a completa fusão do PCM. Tendo em vista os 30 Casos a serem simulados neste trabalho (definidos na Tab. (3.2)) e visando reduzir o tempo de processamento computacional, as simulações desta validação numérica foram realizadas com $\Delta t = 0,01$ s após estabilizar a convergência. Na prática, as simulações eram iniciadas com $\Delta t = 0,002$ s. Após 1 hora de simulação, o Δt era aumentado para 0,005 s e, passada mais 1 hora, aumentado novamente para 0,01 s, sendo então mantido neste patamar. Com este procedimento, as simulações deste trabalho demandaram entre 9 a 35 dias.

Visando confirmar que o Δt e os critérios de convergência (CC) adotados não implicavam em erro para o processo numérico, foram simulados diversos casos, detalhados na Tab.(4.1), variando estes parâmetros.

Tabela 4.1 – Casos simulados com variação de Δt (time-step) e CC

Caso	Constante	Intervalo de	CC	CC
	C [$\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$]	tempo Δt [s]	Contin.e Veloc.	Energia
A	10^7	0,01	10^{-3}	10^{-6}
B	10^7	0,002	10^{-3}	10^{-6}
C	10^7	0,002	10^{-6}	10^{-8}

As curvas de fração líquida dos casos apresentados na Tab. (4.1), até 4 min, são apresentadas na Fig.(4.4). Observa-se que o emprego de $\Delta t = 0,01$ s ou $0,002$ s não implica em diferença expressiva no resultado final (desvio máximo de 1%). O mesmo é observado com relação aos CCs, ou seja, o uso de CCs mais apurados (10^{-6} para a velocidade e continuidade e 10^{-8} para a energia) também não afetaram o resultado final. Tais constatações permitem afirmar que os parâmetros utilizados para Δt e CC usados nesta validação numérica são válidos e resultam em velocidades de fusão que reproduzem, com bom grau de precisão, os dados experimentais de Katsman (2006).

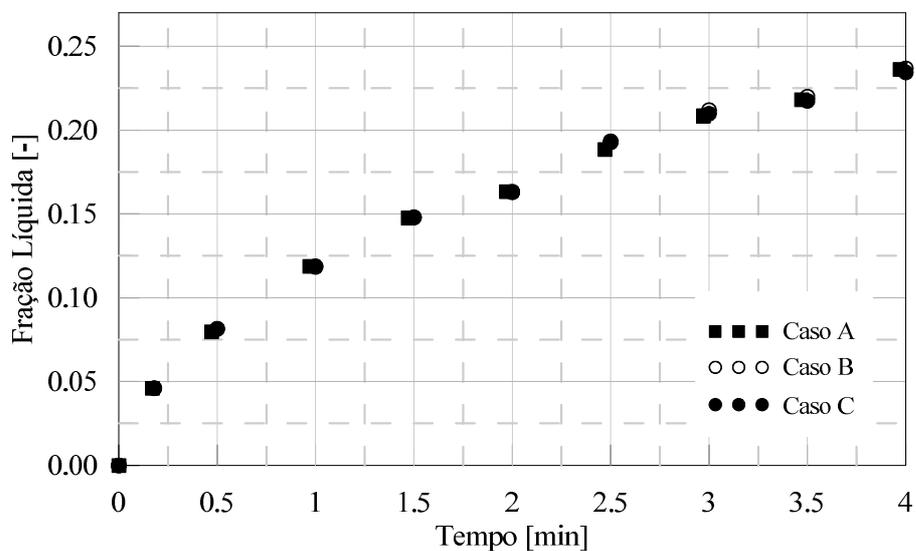


Figura 4.4 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 27, com diferentes Δt (time-step) e CC.

Na Fig. (4.5) são mostrados resultados da fração líquida para o RT 27, utilizando constante C de 10^5 até 10^{10} e com o PCM submetido a uma temperatura de 10°C acima da sua T_{pc} . Observa-se que os tempos para a completa fusão do PCM aumentam na medida em que é utilizada uma constante C mais alta. Desta forma, o uso de C com valor 10^5 resulta em menor tempo até a fusão, porém, comparando-se esta curva com os resultados experimentais de Katsman (2006), apresentados na Fig. (4.3), nota-se que o tempo de fusão obtido numericamente é inferior ao obtido experimentalmente. Outra observação importante é que o uso de constante C com valores 10^8 , 10^9 ou 10^{10} resulta em tempos de fusão praticamente idênticos.

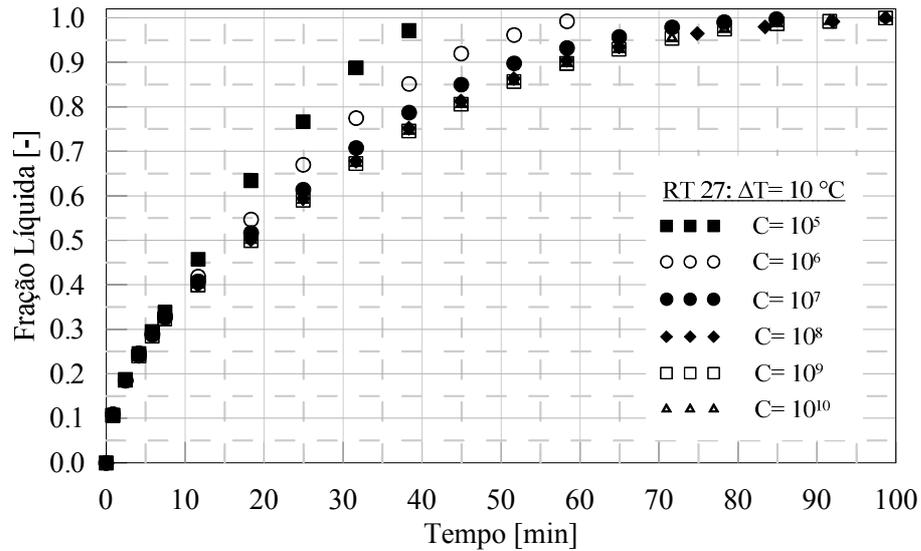


Figura 4.5 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 27, variando C, com $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na Fig. (4.6) são apresentadas as curvas de fração líquida quando o RT 27 é submetido a temperaturas de 10°C , 20°C e 30°C acima de sua T_{pc} . Tomando-se como parâmetro de comparação o tempo necessário para atingir uma fração líquida de 0,6 com $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ (24 min), constata-se que o aumento do ΔT para 20°C reduz este tempo em 53,9% (11,06 min) e ,usando-se ΔT de 30°C , este mesmo tempo é reduzido em 70,8% (7,02 min). Outra observação importante é que o tempo de fusão total, observado no processo numérico, foi reduzido em 66,7%, quando se eleva o ΔT de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este valor ficou muito próximo dos 63,6%, observados nos experimentos de Katsman (2006),

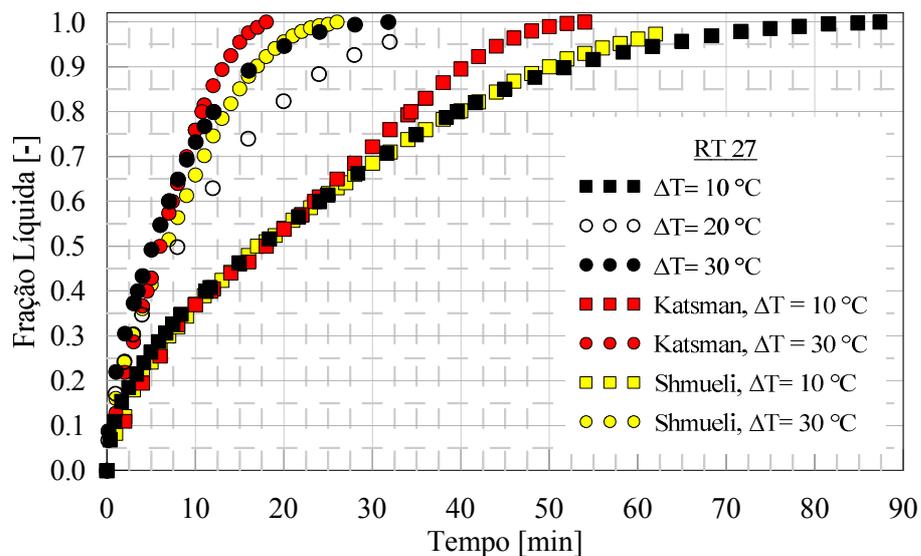


Figura 4.6 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 27, variando ΔT .

Na Fig. (4.7) são apresentados os perfis de fluxo de calor do RT 27 para ΔT de 10 °C, 20 °C e 30 °C, com $C=10^7$. Observa-se que o fluxo de calor é intenso nos instantes iniciais do processo de fusão, quando a troca térmica é dominada pelo processo de condução, entre a superfície cilíndrica externa e o PCM sólido, e decresce exponencialmente na medida em que há um incremento do processo de convecção no PCM já liquefeito. Além disso, no tempo de 8 min, por exemplo, também pode-se observar que, quanto maior é o ΔT maior é o fluxo de calor, correspondendo assim às expectativas para este tipo de processo.

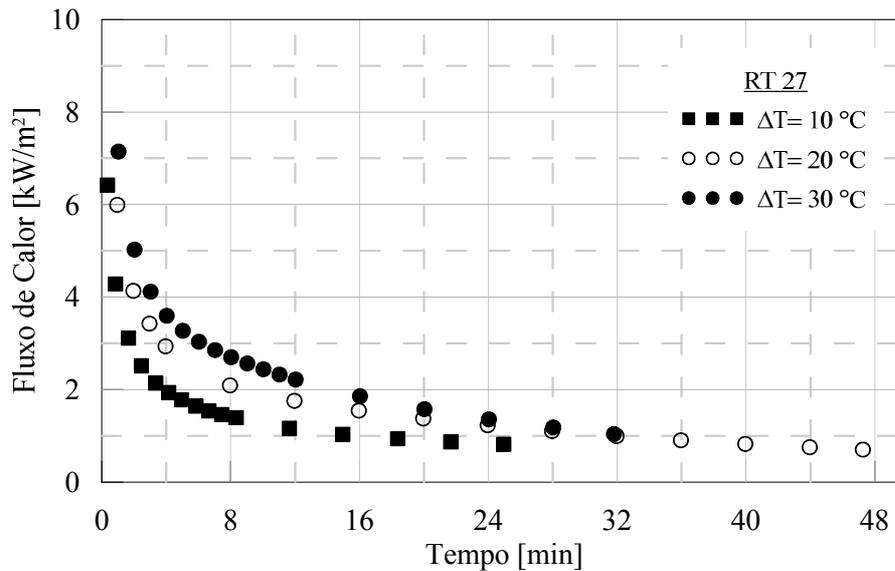


Figura 4.7 – Fluxo de calor vs. tempo, para o RT 27, variando ΔT .

4.2 RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO

Os resultados apresentados nesta Seção dizem respeito aos 30 Casos elencados na Tab (3.2). Aqui é avaliada a influência da temperatura em relação aos tempos de fusão e também sobre fluxo de calor, considerando ΔT de 10 °C, 20 °C e 30 °C acima da T_{pc} de cada PCM. Também são apresentados os resultados comparativos entre PCM “padrão” e PCM de “alta capacidade”. Além disso, a influência da constante C (mushy zone) na fusão dos diferentes PCMs é investigada.

4.2.1 Influência da Temperatura da Parede

Para a comparação dos Casos 01 à 15 (Tab. (3.2)) são utilizados os tempos necessários para atingir a fração líquida de 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0. É conveniente destacar que, até 0,6 de fração líquida, há perfeita coincidência entre os valores numéricos e experimentais, conforme mostrado na Fig. (4.3) para o RT 27. A partir de 0,6 de fração líquida os resultados numéricos passam a se afastar dos experimentais, sendo de, aproximadamente, 12% o desvio máximo entre os resultados. Vale lembrar também que os resultados experimentais de Katsman (2006) evidenciam que o processo de fusão ocorre de forma mais rápida que o observado numericamente.

A Fig. (4.8) apresenta a variação da fração líquida em função do tempo para o PCM RT 4, quando submetido a ΔT de 10 °C, 20 °C e 30 °C. Tomando-se como referência inicial o tempo necessário para que o RT 4 atinja a fração líquida de 0,6 (~18 min), com $\Delta T = 10$ °C, observa-se que o aumento do ΔT para 20 °C e 30 °C faz com que este tempo seja reduzido em 57% e 72,7%, totalizando, aproximadamente, 7,74 min e 4,93 min, respectivamente.

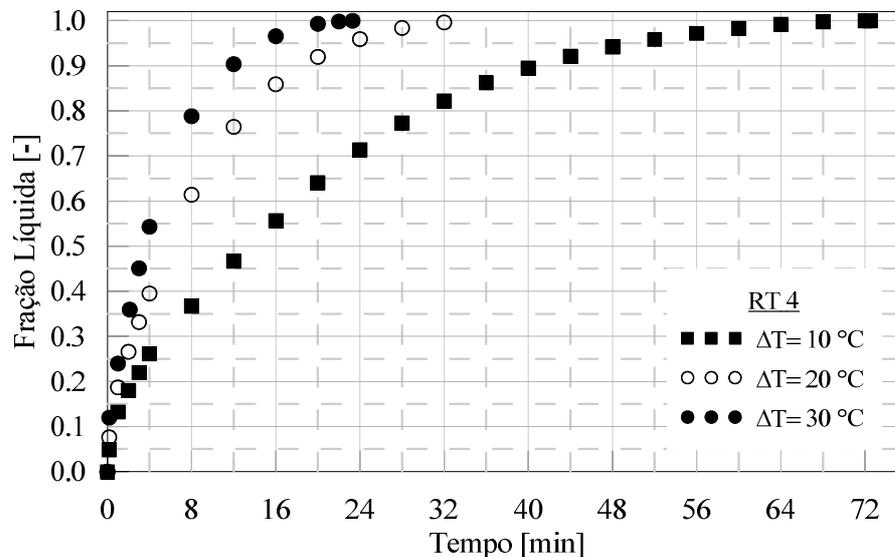


Figura 4.8 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 4, variando ΔT .

A variação da fração líquida com o tempo, para o PCM RT 35, é mostrada na Fig. (4.9) quando este é submetido a ΔT de 10 °C, 20 °C e 30 °C. Os tempos necessários para atingir a fração líquida de 0,6 são de 19,4 min (ΔT de 10 °C), 7,8 min (ΔT de 20 °C) e 4,9 min (ΔT de 30 °C). O uso de ΔT de 20 °C e 30 °C, resultam, portanto, em redução de 59,8% e de 74,6%, respectivamente, em relação ao tempo obtido com ΔT de 10 °C.

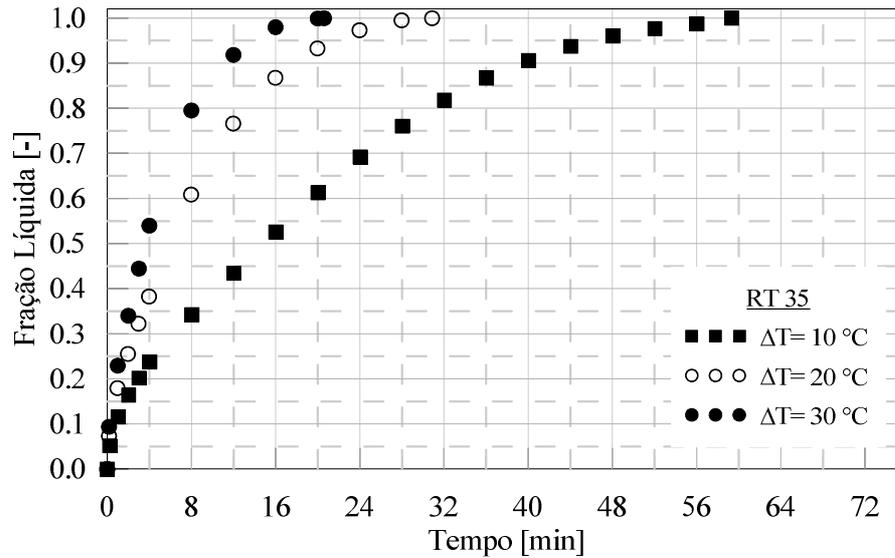


Figura 4.9 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 35, variando ΔT .

O PCM RT 35 HC possui um calor latente de fusão de 240 kJ kg^{-1} , valor este bem acima do calor latente de fusão dos demais PCMs estudados neste trabalho, cujos valores ficam entre 170 kJ kg^{-1} e 182 kJ kg^{-1} . A Fig. (4.10) mostra a variação da fração líquida com o tempo do RT 35HC para ΔT de 10, 20 e 30 °C. Observa-se que os tempos necessários para atingir $\alpha=0,6$ são maiores que aqueles observados nos demais PCMs avaliados. Para $\Delta T=10 \text{ °C}$ este tempo foi de 30,7 min. Com $\Delta T=20 \text{ °C}$ houve redução de 51,7% (14,8 min) e com ΔT de 30 °C a redução observada foi de 67,5% (9,96 min).

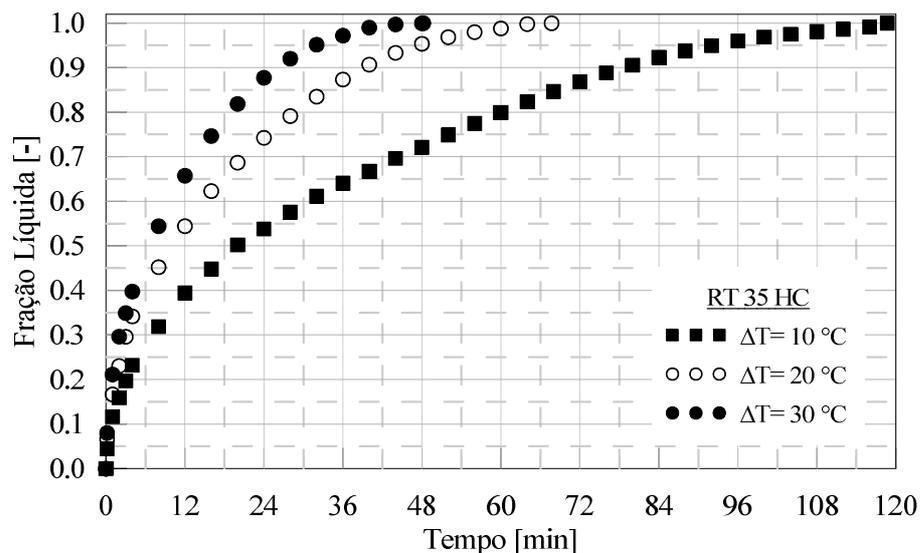


Figura 4.10 – Fração líquida vs. tempo, para o RT 35HC, variando ΔT .

Comparando-se os resultados das Figs. 4.9 e 4.10 conclui-se que a substituição de um PCM "padrão" por um de "alta capacidade" e mesma T_{pc} , possibilita um aumento no calor

latente de fusão da ordem de 41,1% e aumenta o tempo de fusão total em 100%, 119% e 134%, para $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Na Tab. (4.2) é apresentado um sumário dos tempos de fusão para a fração líquida de 0,6, assim como outras características dos PCM estudados. Para os PCMs considerados “padrões” (na faixa de 172 kJ kg^{-1} à 182 kJ kg^{-1}), observa-se que o incremento do ΔT de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ reduz o tempo de fusão, em média, em 56,6%. Já o incremento no ΔT de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, reduz, em média, em 72,1% o tempo de fusão. Para o PCM RT 35 HC, com calor latente de fusão considerado de “alta capacidade” (240 kJ kg^{-1}), valor este 36,5% superior à média dos demais PCMs), as reduções de tempo observadas foram de 51,8% e 67,6%, quando o ΔT foi incrementado para $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. A comparação dos tempos de fusão do RT 35 HC, com os mesmos tempos observados para o do RT 35, resultou nos seguintes incrementos de tempo: para ΔT de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 100%; : para ΔT de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 119% e para ΔT de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 134%.

Tabela 4.2 – Sumário dos tempos de fusão até a fração líquida de 0,6

PCM	Tipo de PCM	L [kJ kg ⁻¹]	Tempo para atingir $\alpha = 0,6$ [min]			Redução de Tempo [%]	
			$\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$	de $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ para $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$	de $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ para $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$
RT 4	Padrão	182	18,05	7,74	4,93	57,1%	72,7%
RT 27	Padrão	179	24,00	11,06	7,02	53,9%	70,8%
RT 35	Padrão	170	19,40	7,80	4,90	59,8%	74,7%
RT 35 HC	Alta Capac.	240	30,70	14,80	9,96	51,8%	67,6%
RT 55	Padrão	172	23,70	10,75	6,60	54,6%	72,2%
RT 82	Padrão	176	17,50	7,40	5,20	57,7%	70,3%

Na Fig. (4.11) são apresentadas as reduções médias obtidas nos tempos de fusão dos diversos PCMs com calor latente de fusão “padrão”, para as frações líquidas de 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 (fusão completa). Estes resultados mostram que, para frações líquidas de 0,4 até 0,8, as reduções percentuais obtidas nos tempos de fusão, situam-se em patamares muito próximos, sendo que as reduções médias são de 55,8% e 71,8%, quando incrementado o $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Para $\alpha = 1,0$ e $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a redução média de 63,6% aproximou-se bastante do observado experimentalmente para o RT 27 (66,7%), conforme Fig. (4.6).

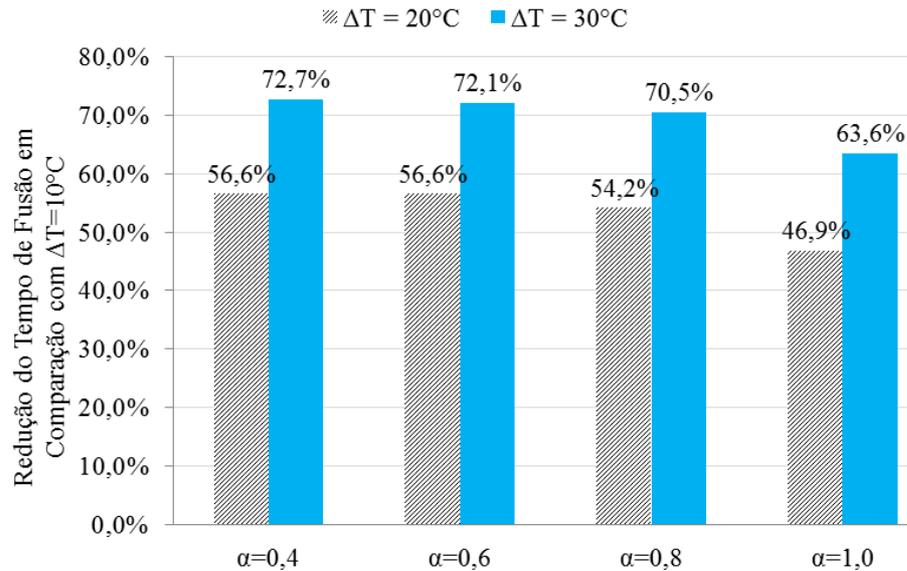


Figura 4.11 – Reduções médias dos tempos de fusão de PCMs “padrões”, variando α e ΔT .

Na Fig. (4.12) são mostradas as reduções dos tempos de fusão obtidas para um PCM de “alta capacidade” (RT 35 HC). Novamente aqui, as reduções percentuais obtidas para as frações líquidas entre 0,4, e 0,8 resultaram em valores muito próximos. As reduções médias obtidas para os tempos de fusão foram de 51,6%, quando incrementado o ΔT de 10 °C para 20 °C e de 67,8% quando incrementado o ΔT de 10 °C para 30 °C.

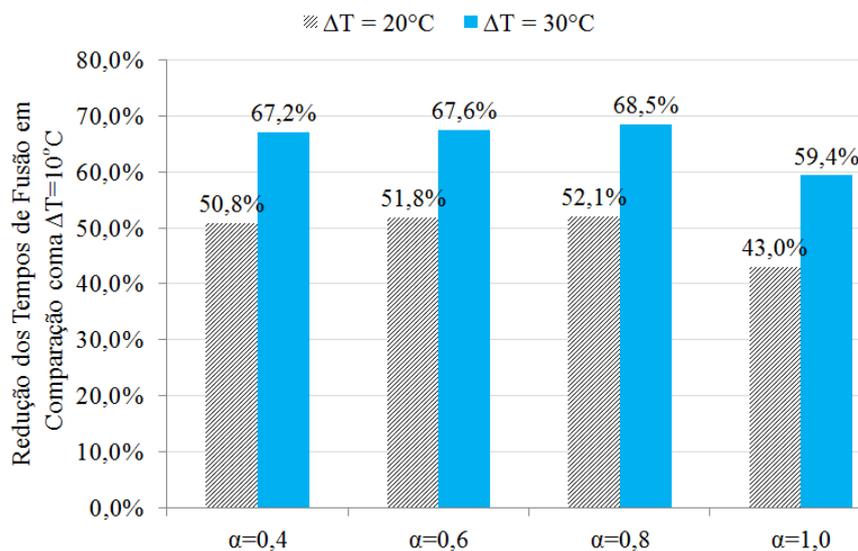


Figura 4.12 – Reduções médias dos tempos de fusão de PCM de “alta capacidade”, variando α e ΔT .

No que diz respeito ao fluxo de calor (q''), o comportamento verificado para os PCMs estudados foi similar ao mostrado na Fig.(4.13), ou seja, o fluxo de calor é intenso nos instantes iniciais, quando a troca térmica é dominada pelo processo de condução e decai exponencialmente na medida em que o efeito convectivo avança.

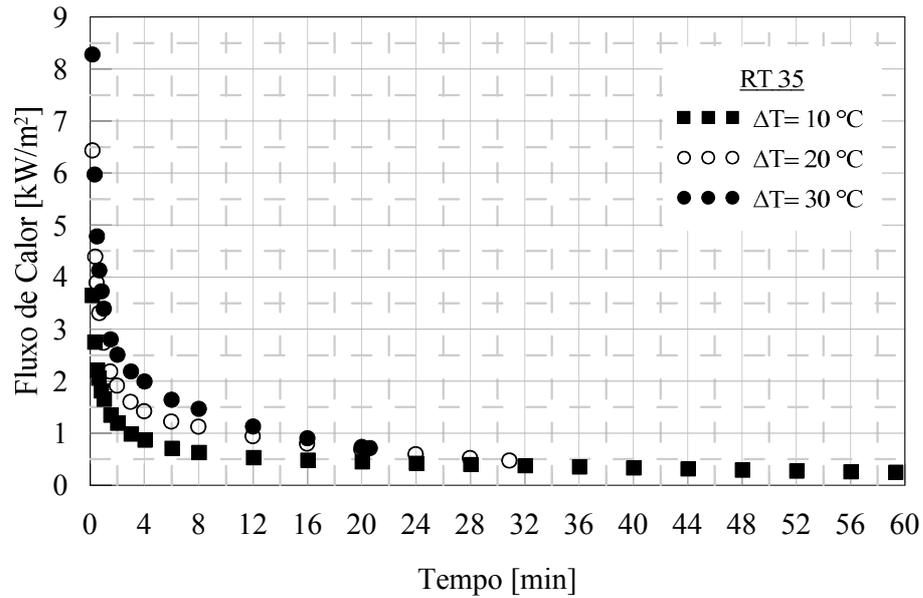


Figura 4.13 – Fluxo de calor vs. tempo, para o RT 35, variando ΔT .

Nas Figs 4.14 e 4.15 são apresentados resultados do comportamento do fluxo de calor em função da fração líquida, variando ΔT , para o RT 35 e o RT 35 HC, respectivamente. Consta-se que há similaridade do comportamento do fluxo de calor para os dois PCMs. No entanto, o RT 35 HC apresenta valores máximos mais elevados. Isso ocorre devido ao seu calor latente de fusão superior em relação ao RT 35. Observa-se que o fluxo de calor máximo do RT 35 HC é superior ao do RT 35 em 37,8% (com $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), em 16% (com $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) e em 8% (com $\Delta T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

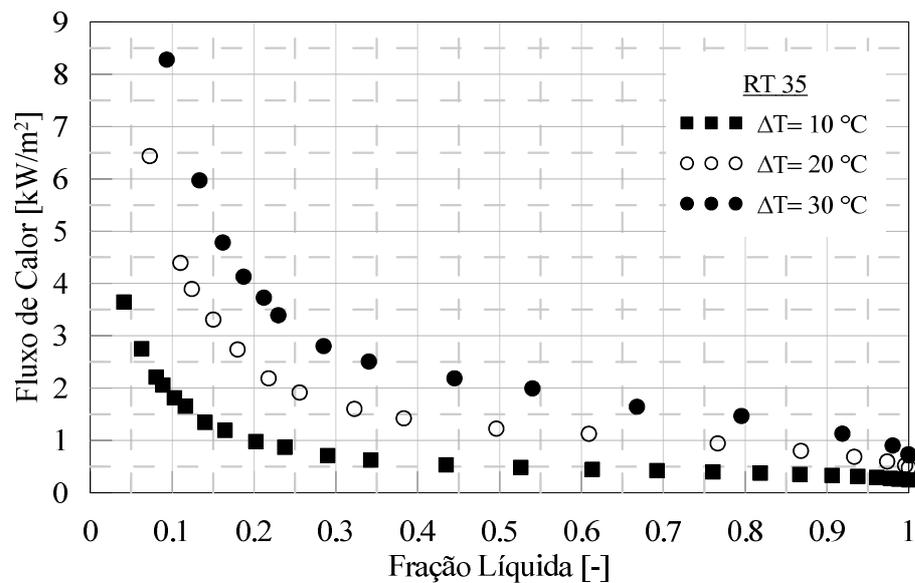


Figura 4.14 – Fluxo de calor vs. fração líquida, para o RT 35, variando ΔT .

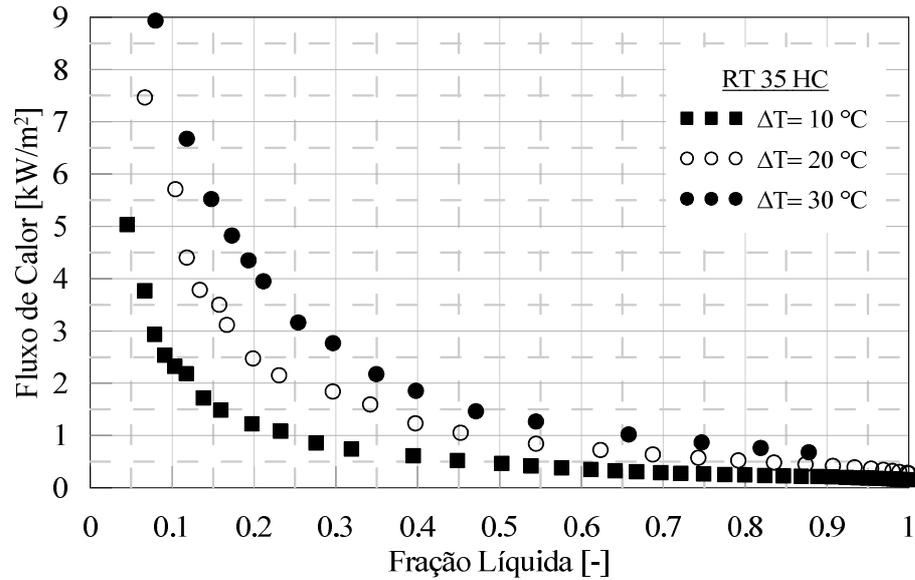


Figura 4.15 – Fluxo de calor vs. fração líquida, para o RT 35 HC, variando ΔT .

Na Tab.(4.3) são apresentados os valores do fluxo de calor dos PCMs estudados (em $t = 0$ s) e os incrementos obtidos quando o ΔT é aumentado de 10 °C para 20 °C e também para 30 °C. Para os PCMs “padrões” os incrementos no fluxo de calor variaram entre 51,67% e 74,05% (aumentando o ΔT de 10 °C para 20 °C) e entre 98,06% a 124,32% (aumentando o ΔT de 10 °C para 30 °C). Para o PCM de “alta capacidade” avaliado, os incrementos no fluxo de calor foram, respectivamente, de 48,51% e 77,73%.

Tabela 4.3 – Sumário dos incrementos obtidos em q'' (10 s), variando ΔT .

PCM	Tipo de PCM	L [kJ kg ⁻¹]	q'' máx. [kW m ⁻²]			Incremento de q'' [%]	
			$\Delta T = 10$ °C	$\Delta T = 20$ °C	$\Delta T = 30$ °C	De $\Delta T = 10$ °C para $\Delta T = 20$ °C	De $\Delta T = 10$ °C para $\Delta T = 30$ °C
RT 4	Padrão	182	4,65	7,21	9,21	55,05%	98,06%
RT35	Padrão	170	3,70	6,44	8,30	74,05%	124,32%
RT 35 HC	Alta Capacidade	240	5,03	7,47	8,94	48,51%	77,73%
RT 55	Padrão	172	4,18	6,34	8,43	51,67%	101,67%
RT 82	Padrão	176	3,83	6,66	8,47	73,89%	121,15%

4.2.2 Influência da Constante C na Simulação Numérica do Processo de Fusão dos PCMs

Nas Figs.(4.16) e (4.17) é mostrada a variação da fração líquida em função do tempo para diferentes valores da constante C, para os PCMs RT 35 e RT 82, respectivamente.

A exemplo do que foi observado na validação numérica, para o RT 27 (Fig. (4.5)), utilizando-se $C=10^5$ resulta no menor tempo de fusão. O aumento da constante C para 10^6 , 10^7 e 10^8 ocasiona o aumento do tempo de fusão total. Já a utilização de constante C com valores de 10^9 e 10^{10} resulta em tempos de fusão total idênticos aos obtidos com 10^8 , independentemente da capacidade térmica do PCM.

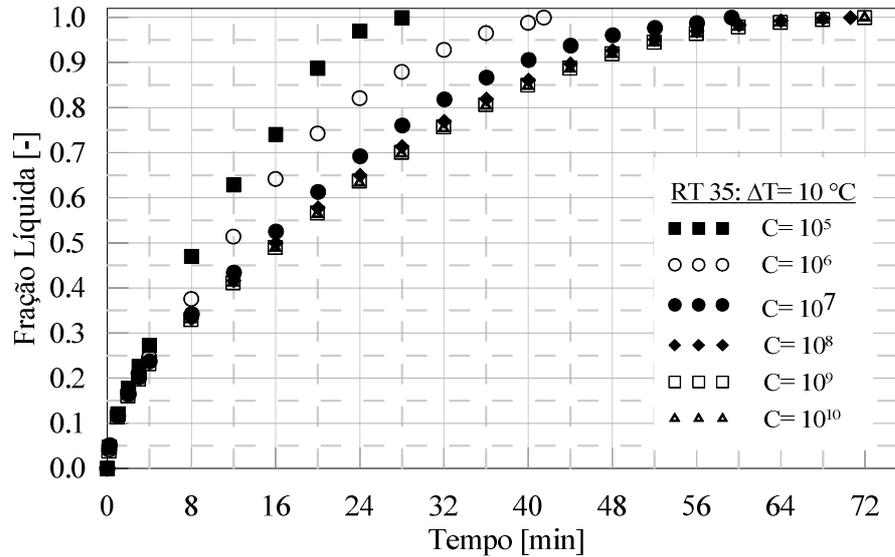


Figura 4.16 – Influência da constante C no processo numérico de fusão do RT 35

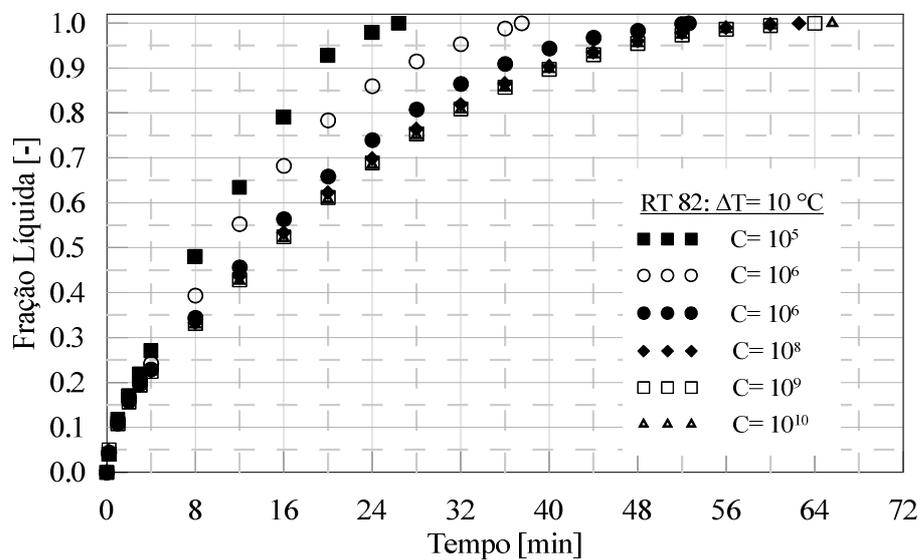


Figura 4.17 – Influência da constante C no processo numérico de fusão do RT 82

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo investigar numericamente a mudança de fase de diferentes tipos de PCMs em cavidades cilíndricas. Os objetivos específicos eram:

- (a) fazer uma ampla revisão bibliográfica sobre PCMS e suas aplicações;
- (b) implementar numericamente o modelo matemático de mudança de fase;
- (c) validar a metodologia e o modelo matemático com resultados da literatura;
- (d) avaliar e comparar o processo de fusão de diferentes PCMs quando submetidos a diferentes temperaturas acima da sua temperatura de mudança de fase (T_{pc});
- (e) verificar a influência da constante C (mushy zone), a qual controla o grau de derretimento;
- (f) comparar o processo de fusão de PCMs da família RT de capacidade térmica "normal" com aqueles de "alta capacidade" térmica, para a mesma temperatura de fusão.

A revisão bibliográfica foi apresentada em termos de fusão de PCMs em cavidades cilíndricas e também sobre aspectos gerais, tais como características técnicas básicas, requisitos na escolha de PCMs, aplicações e dificuldades atualmente existentes em LHTES. Da revisão bibliográfica efetuada foram também obtidas a metodologia e o modelo matemático a serem implementados no software CFD.

Em relação à validação da metodologia e do modelo matemático, foi executada a validação da malha computacional e dos resultados das simulações numéricas para o PCM RT 27. Estes resultados foram confrontados com resultados numéricos e experimentais da literatura, apresentando boa aproximação. Adicionalmente foi verificada a influência de parâmetros como "time-step" e critérios de convergência no processo de fusão deste PCM. Assim sendo, a metodologia, modelo matemático, malha computacional e demais parâmetros utilizados foram considerados aptos para os Estudos de Caso.

Como Estudo de Caso foram simulados os processos de fusão de cinco diferentes PCMs, para três ΔT (10, 20 e 30 °C). Também foi investigada a influência do coeficiente C (10^{5-10}), sobre o processo de fusão destes PCMs, totalizando 30 diferentes Casos.

Em relação ao objetivo de avaliação e comparação dos processos de fusão, as conclusões obtidas foram que, para os PCMs com calor latente considerado "padrão", o incremento do ΔT , de 10 °C para 20 °C, ocasiona uma redução média geral nos tempos de fusão de 55,8% para atingir frações líquidas entre 0,4 e 0,8. Já o aumento do ΔT , de 10 °C para 30 °C, resulta em uma redução média geral do tempo de fusão de 71,8%, para a mesma faixa de frações líquidas. As reduções de tempo médias obtidas para atingir a fusão completa

dos PCMS padrões (fração líquida 1,0) foram de 46,9% (de ΔT de 10 °C para 20 °C) e de 63,6% (de ΔT de 10 °C para 30 °C). Este último resultado mostrou-se similar ao obtido experimentalmente por Katsman (2006), no qual a redução de tempo para fusão completa do RT 27 foi de 66,6% (de ΔT de 10 °C para 30 °C). Para o PCM de "alta capacidade", a redução média do tempo de fusão, para frações líquidas entre 0,4 e 0,8, foi de 51,6% (de ΔT de 10 °C para 20 °C) e de 67,8% (de ΔT de 10 °C para 30 °C).

A comparação entre o PCM RT 35 e o RT 35 HC, ambos com a mesma temperatura de mudança de fase, mostrou que o RT 35 HC possibilita um incremento de 41,1% no calor latente de fusão, porém, demanda tempos de fusão entre 100% a 134% superiores, dependendo do ΔT utilizado. Assim sendo, a conclusão é de que a substituição de um PCM "padrão" por um de "alta capacidade" pode ser interessante em aplicações onde haja restrição de volume para o tanque de PCM, onde haja necessidade de incremento de calor latente e o aumento dos tempos de carga e descarga tragam benefícios ao LHTES.

Quanto ao objetivo de investigação da influência da constante C (mushy zone) no processo numérico de fusão, observou-se que utilizando-se $C=10^5$ resulta no menor tempo de fusão. O aumento da constante C para $10^6, 10^7$ e 10^8 ocasiona o aumento do tempo de fusão total. Já a utilização de constante C com valores de 10^9 e 10^{10} resulta em tempos de fusão total idênticos aos obtidos com 10^8 . Assim sendo, quanto maior o valor de C (entre 10^5 e 10^8), maior será o tempo necessário para atingir a fusão completa. Para valores de C maiores que 10^8 os tempos de fusão não são alterados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de confirmar as conclusões advindas deste trabalho e visando diminuir ainda mais as lacunas técnicas existentes no estudo de PCMs, para trabalhos futuros, sugere-se:

- levantamento de dados experimentais para os PCMs e condições aqui estudadas, podendo-se, inclusive, investigar o processo de solidificação.
- desenvolver uma correlação com os principais adimensionais relacionados ao problema.
- investigação do processo de fusão destes PCMs com diferentes razões de aspecto, bem como para diferentes geometrias, volumes e áreas de troca térmica.

REFERÊNCIAS

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

AIR CONTAINER. Disponível em: <http://www.aircontainer.com/products/>. Acesso em: 26 de maio de 2014.

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

AL-ABIDI, A.A.; MAT, S.; SOPIAN, K.; SULAIMAN, M.Y.; MOHAMMAD, A. T. Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 61, p. 684-695, 2013.

AL-HALLAJ, S.; KIZILEL, R.; LATEEF A. et al. Passive Thermal Management Using Phase Change Material (PCM) for EV and HEV Li-ion Batteries. **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, p. 376-380, 2005.

ANISUR, M. R.; MAHFUZ, M. H., KIBRIA, M. A.; SAIDUR, R.; METSELAAR, I.H.S.C., MAHLIA, T.M.J. Curbing global warming with phase change materials for energy storage. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 23-30, 2013.

ANSYS Fluent Theory Guide. Disponível em: [http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS Fluent Theory Guide.pdf](http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS_Fluent_Theory_Guide.pdf). Acesso em 10 de dezembro de 2014.

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

BILLIARD F. Refrigerating equipment, energy efficiency and refrigerants. In: Proceedings of European conference on technological innovations in air conditioning and refrigeration industry. **Politecnico di Milano**, p.1-7, 2003.

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

CABEZA, L.F.; CASTELL, A.; BARRENECHE, C.; GRACIA A.; FERNÁNDEZ, A.I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1675-1695, 2011.

CABEZA, L.F.; CASTELLÓN, C.; NOGUÉS, M.; MEDRANO, M.; LEPPERS, R.; ZUBILLAGA, O. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. **Energy and Buildings**, v. 39, p. 113-119, 2007.

ÇAKMAK, G.; YILDIZ, C. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, p. 103-108, 2011.

CRIOPAK. Disponível em: <http://www.cryopak.com/en/cold-chain-packaging/phase-change-material/>. Acesso em: 26 de maio de 2014.

DANG, A. An analytical study of a solar cooker augmented with a booster mirror, using PCM as storage. **Energy Conversion and Management**, v. 25, p. 255-261, 1985.

DUPONT ENERGAIN. Disponível em http://energain.co.uk/Energain/en_GB/index.html. Acesso em: 07 de maio de 2014.

EL-SEBAILI, A.A.; AL-HENITI, S.; AL-AGEL, F.; AL-GHAMDI, A.A.; AL-MAZOURKI, F. One Thousand thermal cycles of magnesium chloride hexahydrate as a promising PCM for indoor solar cooking. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p. 1771-1777, 2011.

EUROPEAN COMMISSION. Statistical Pocketbook 2014. Disponível em: http://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/statistics/pocketbook-2014_en.htm. Acesso em 22 de março de 2015.

ETTOUNEY, H.; ALATIQUI, I.; AL-SAHALI, M.; AL-HAJIRIE, K. Heat transfer enhancement in energy storage in spherical capsules filled with paraffin wax and metal beads. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 211-228, 2006.

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

FOK, S.C.; SHEN, W.; TAN, F.L. Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 49, p. 109-117, 2010.

FRIGOBLOCK. Disponível em <http://www.hellotrade.com/frigoblock-germany/refrigeration-machines.html>. Acesso em: 26 maio de 2014.

HAMMOU, Z.A.; LACROIX, M. A new PCM storage system for managing simultaneously solar and electric energy. **Energy and Buildings**, v. 38, p. 258-265, 2006.

HOSHI, A.; MILLS, D.R.; BITTAR, A.; SAITOH, T.S. Screening of high melting point phase change materials (PCM) in solar thermal concentrating technology based on CLFR. **Solar Energy**, v. 79, p. 332-339, 2005.

HOSSEINIZADEH, S.F.; TAN, F.L.; MOOSANIA, S.M. Experimental and numerical studies on performance of PCM-based heat sink with different configurations of internal fins. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, p. 3827-3838, 2011.

HUSSEIN, H.M.S.; EL-GHETANY, H.H.; NADA, S.A. Experimental investigation of novel indirect solar cooker with indoor PCM thermal storage and cooking unit. **Energy Conservation and Management**, v. 49, p. 2237-2246, 2008.

KALAISELVAM, S.; VEERAPPAN, M.; AARON, A.A.; INIYAN, S. Experimental and analytical investigation of solidification and melting of PCMs inside cylindrical encapsulation. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 47, p. 858-874, 2008.

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

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

KATSMAN, L. Investigation of phase change in cylindrical geometry with internal fins. M.Sc. Thesis, **Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev**, Beer-Sheva, Israel, 2006.

KHATEEB, S.; AMIRUDDIN, S.; FARID M. et al. Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation. **Journal of Power Sources**, v. 142, p. 345-253, 2005.

KHOT, S.A.; SANE, N.K.; GAWALI, B.S. Experimental investigation of phase change phenomena of paraffin wax inside a capsule. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 2, c. 2, 2011.

KHUDHAIR, A.M.; FARID, M.M. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. **Energy Conservation and Management**, v. 45, p. 263-275, 2004.

LI, W.Q.; QU Z.G.; HE, Y.L.; TAO, W.Q. Experimental and numerical studies on melting phase change heat transfer in open-cell metallic foams filled with paraffin. **Applied Thermal Engineering**, v. 37, p. 1-9, 2012.

LIU, M.; SAMAN, W.; BRUNO, F. Development of a novel refrigeration system for refrigerated trucks incorporating phase change material. **Applied Energy**, v. 92, p. 336-342, 2012.

LONGEON, M.; SOUPART A.; FOURMIGUÉ, J.F.; BRUCH, A.; MARTY, P. Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection. **Applied Energy**, v. 112, p. 175-184, 2013.

MACDEVETTE, M. M.; MYERS, T. G. Contact melting of a three-dimensional phase change material on a flat substrate. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, p. 6798-6807, 2012.

MAHFUZ, M.H.; ANISUR, M.R.; KIBRIA, M.A.; SAIDUR, R.; METSELAAR, I.H.S.C. Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 57, p. 132-139, 2014.

MEHLING, H.; CABEZA, L. F. **Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications**. 1. ed. Berlin: Springer, 2008.

METTAWEE, E.S.; ASSASSA, G.M.R. Experimental study of a compact PCM solar collector. **Energy**, v. 31, p. 2958-2968, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional – Ano Base 2013. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2013.aspx>. Acesso em 22 de março de 2015.

MONDAL, S. Phase change materials for smart textiles – An overview. **Applied Thermal Engineering**, 2007.

MURRAY, R. E.; GROULX, D. Experimental study of the phase change and energy characteristics inside a cylindrical latent heat energy storage system: Part 1 consecutive charging and discharging. **Renewable Energy**, v. 62, p. 571-581, 2014.

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

QARNIA, H. E. Numerical analysis of a coupled solar collector latent heat storage unit using various phase change materials for heating the water. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 247-254, 2009.

RAMADASS, P.; HARAN B.; WHITE R. et al. Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures Part I: Cycling performance. **Journal of Power Sources**, v. 112, p. 606-613, 2002.

RUBITHERM. Disponível em <http://www.rubitherm.de/english/index.htm>. Acesso em: 07 de maio de 2014.

SARIER, N.; ONDER, E. Organic phase change materials and their textile applications: An overview. **Thermochimica Acta**, v. 540, p. 7-60, 2012.

SERALE, G.; BARONETTO, S.; GOIA, F.; PERINO, M. Characterization and energy performance of a slurry PCM-based solar thermal collector: a numerical analysis. **Energy Procedia**, v. 48, p. 223-232, 2014.

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

SHALABY, S.M.; BEK, M.A. Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. **Energy Conversion and Management**, v. 83, p. 1-8, 2014.

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

SHARMA, S. D.; SAGARA, Kazunobu. Latent heat storage materials and systems: a review. *International Journal of Green Energy*, v. 2, p. 1-56, 2005.

SHATIKIAN, V.; ZISKIND G.; LETAN R. Numerical investigation of a PCM-based heat sink with internal fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 48, p. 3689-3706, 2005.

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

SKYCELL. Disponível em: <http://www.skycell.ch/infoglueDeliverWorkinglive3/?contentId=2387>. Acesso em: 26 de maio de 2014.

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

SPARROW, E.M.; BROADBENT, J.A. Inward melting in a vertical tube which allows free expansion of the phase-change medium, *ASME Journal of Heat Transfer*, v. 104, p. 309-315, 1982.

TAY, N.H.; BRUNO F.; BELUSKO, M. Experimental investigation of dynamic melting in a tube-in-tank PCM system. *Applied Energy*, v. 104, p. 137-148, 2013.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Building Energy Data Book. Disponível em <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/TableView.aspx?table=1.1.3>. Acesso em 22 de março de 2015.

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

WANG, Y.; YANG, Y. Three-dimensional transient cooling simulations of a portable electronic device using PCM (phase change materials) in multi-fin heat sink. *Energy*, v. 36, p. 5214-5224, 2011.

WENG, Y.; CHO, H.; CHANG C. et al. Heat pipe with PCM for electronic cooling. *Applied Energy*, v. 88, p. 1825-1833, 2011.

YE, W.B.; ZHU, D.S.; WANG N. Numerical simulation on phase-change thermal storage/release in a plate-fin unit. *Applied Thermal Engineering*, v. 31, p. 3871-3884, 2011.

ZALBA, B.; MARÍN, J.M.; CABEZA, L.F.; MEHLING, H. Review on thermal storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 23, p. 251-283, 2003.

ZENG, Y.; FAN, L.W.; XIAO, Y.Q.; YU, Z.T.; CEN, K.F. An experimental investigation of melting of nanoparticle-enhanced phase change materials (NePCMs) in a bottom-heated

vertical cylindrical cavity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 66, p. 111-117, 2013.

ZHANG, H.L.; BAEYENS, J.; CÁCERES, G.; SEGAL, R.; PITIÉ, F. Latent heat storage with tubular-encapsulated phase change materials (PCMs). **Energy**, v. 1, p. 1-7, 2014.

ZHANG, Y.; RAO, Z.; WANG, S.; ZHANG, Z.; LI X. Experimental evaluation on natural convection heat transfer of microencapsulated phase change materials slurry in a rectangular heat storage tank. **Energy Conversion and Management**, v. 59, p. 33-39, 2012.

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

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS PCMs ESTUDADOS

Para a execução deste trabalho foram consideradas as características técnicas disponíveis no website da empresa Rubitherm Technologies GmbH (www.rubitherm.com), abaixo transcritas.

Tabela A1–Propriedades termodinâmicas dos PCMs estudados

Propriedade	RT 4	RT 27	RT 35	RT 35 HC	RT 55	RT 82
Temperatura de Fusão [°C]	2-4	25-28	29-36	34-36	51-57	77-85
L Capac. Armaz. Térmico [kJ/kg]	182 (-5 A 10°C)	179 (20 a 35°C)	170 (26 a 41°C)	240 (27 a 42°C)	172 (48 a 63°C)	176 (70 a 85°C)
Cp Calor Específico [kJ/kg K]	2	2	2	2	2	2
Massa específica sólido [kg/l]	0,88 (-15C)	0,88 (15C)	0,86 (15C)	0,77 (25C)	0,88 (15C)	0,88 (15C)
Massa específica líquido [kg/l]	0,77 (15C)	0,76 (40C)	0,77 (45C)	0,67 (60C)	0,77 (80C)	0,77 (90C)
k (ambas as fases) [W/m K]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Expansão volumétrica [%]	12,5	12,5	12,5	12	14	12,5
Flash point [°C]	110	146	167	177	>200	>200

Através de contatos feitos via e-mail, com a direção da empresa Rubitherm, foram coletados, adicionalmente, os seguintes dados:

Tabela A2–Viscosidade dos PCMs estudados

PCM	Temp. de Referência [°C]	Viscosidade Cinética [mm ² /s]	Viscosidade Dinâmica [mPa s]
RT 4	40	2,6	1,82
RT 27	37	4,7	3,29
RT 35	70	3,3	2,31
RT 35 HC	30	3,6	2,52
RT 55	100	3,8	2,66
RT 82	100	4,5	3,15