

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

**ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE DE
PCM EM CAVIDADES ESFÉRICAS**

FÁBIO FAISTAUER

Dissertação de Mestrado

**São Leopoldo
2016**

**ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE DE
PCM EM CAVIDADES ESFÉRICAS**

FÁBIO FAISTAUER

Trabalho submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Profa. Dra. Rejane De Césaró Oliveski

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Conrad Yuan Yuen Lee – Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

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

Prof. Dr. Luis Alberto Oliveira Rocha – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

F173e

Faistauer, Fábio

Estudo numérico do processo de mudança de fase de PCM em cavidades esféricas / por Fábio Faistauer. – 2016.

66 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, São Leopoldo, RS, 2016.

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

1. Materiais de mudança de fase. 2. Dinâmica de fluido computacional. 3. Armazenamento térmico. 4. Esferas. I. Título.

CDU: 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus familiares e amigos pela compreensão e apoio nos períodos em que a necessidade de dedicação ao trabalho fez com que tivéssemos períodos de menor convivência.

À professora Rejane de César Oliveski pela orientação, paciência e dedicação ao longo de todo o período da pesquisa, incentivando-me, através de seu exemplo de docente e pesquisadora, a realizar sempre o melhor trabalho.

À FAPERGS, pela concessão da bolsa de estudos.

À UNISINOS, pela estrutura disponibilizada no desenvolvimento de toda a pesquisa.

Aos amigos e colegas de todo o Programa de Pós Graduação da Engenharia Mecânica (PPGEM) pela amizade desenvolvida ao longo de todo o trabalho.

E aos bolsistas e pesquisadores do laboratório do PPGEM pela amizade, companheirismo e troca de experiências que muito contribuíram para o crescimento e amadurecimento da pesquisa realizada.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico do processo de mudança de fase de PCM (Phase Change Material ou Materiais de Troca de Fase) acondicionados em cavidades esféricas. O modelo numérico é bidimensional e composto pelas equações de conservação da massa, da quantidade de movimento, de energia e da fração volumétrica, modeladas através da técnica entalpia-porosidade. A malha computacional é do tipo hexaédrica com refinamentos nas regiões que apresentam os maiores gradientes térmicos e fluidodinâmicos. O modelo numérico foi validado com resultados experimentais e numéricos da literatura. São estudados casos de fusão de PCM RT 35, RT 55 e RT 82 em cavidade esférica com temperatura constante na parede. Os diâmetros das esferas são de 40, 60, 80 e 100 mm e as temperaturas impostas à parede são de 10, 20 e 30°C acima da temperatura de fusão dos PCM. São apresentados resultados de fração líquida e de fluxo de calor resultante dos 36 casos estudados. A pesquisa mostra que PCM com propriedades semelhantes apresentam o mesmo comportamento para fração líquida e fluxo de calor, independentemente de seu ponto de fusão. O aumento da temperatura na parede da esfera é responsável por maiores fluxos de calor e pela diminuição do tempo de obtenção da fração líquida. Comparando as diferenças de temperaturas de 10, 20 e 30°C, a melhor redução percentual do tempo de fusão foi obtida para a temperatura de 20°C. A pesquisa também mostra que o aumento do diâmetro não influencia o fluxo de calor inicial, porém aumentam o tempo de fusão do PCM. Este tempo de fusão pode ser relacionado com o comprimento característico da esfera, independente das temperaturas impostas à parede. Os estudos mostram também que a maior quantidade de armazenamento térmico através do PCM líquido é obtida com a combinação dos maiores diâmetros com as maiores temperaturas. Para obter o cálculo da fração líquida em função do tempo através de uma correlação, os parâmetros envolvidos foram calculados através dos números de Fourier, Stefan, Grashof e Prandtl.

Palavras-chave: Materiais de mudança de fase, CFD, armazenamento térmico, esferas.

ABSTRACT

This paper presents a numerical study of the phenomena that occur in the use of PCM (Phase Change Materials) packed in spherical cavities. The numerical simulation was performed with commercial software ANSYS-FLUENT. The numerical model is two-dimensional and consists of the mass conservation equations of momentum, energy and volume fraction, modeled by enthalpy-porosity technique. The computational mesh is the hexahedral type with refinements in regions with the highest thermal and fluid dynamic gradients. The numerical model was validated with experimental and numerical results of literature. It was studied melting cases of PCM RT 35, RT 55 and RT 82 in spherical cavities with constant temperature on the wall. The diameters of the spheres were 40, 60, 80 and 100 mm and temperatures imposed on the wall were 10, 20 and 30°C, above the melting temperature of the PCM. It was presented results of melt fraction and heat flow of 36 cases studied. Research shows that PCM with similar properties have the same behavior for melt fraction and heat flow, regardless of its melting temperature. The temperature rise in the sphere wall is responsible for higher heat flows and by decreasing the melt fraction obtained in time. The best percentage reduction in the melting time was obtained with 20°C of temperature differences. Research also shows that the increase in diameter does not influence the heat flux, but increases the PCM melting time. This melting time can be related to the sphere characteristic length, regardless of the temperatures imposed on the wall. The studies also show that the largest quantity of thermal storage through the liquid PCM is obtained by combining the larger diameters with higher temperatures. The main parameters involved in the phase change process are correlated through numbers of Fourier, Stefan, Grashof and Prandtl for the calculation of the liquid fraction as a function of time. To calculate the liquid fraction as a function of time through a correlation, the parameters involved were calculated using the Fourier, Stefan, Grashof and Prandtl numbers.

Key-words: PCM, CFD, thermal storage, spheres.

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1 - Condução térmica em placa planas.....	22
Figura 2.2- Classificação de PCM Fonte: Adaptado de Sharma et al., (2009).....	23
Figura 2.3 – Exemplos de aplicações de PCM macro e micro encapsulado.	26
Figura 2.4 – Reservatório térmico com PCM encapsulado em formato esférico.....	26
Figura 2.5 – Aplicações de PCM para transporte e manutenção da temperatura.....	27
Figura 3.1 - Representação da condição inicial de uma esfera com PCM em estado sólido. Fonte: Adaptado de Assis et al., 2007	28
Figura 4.1- Campo de fração de massa do RT27 após 40 min: (a) Tan (2008) e (b) Archibold et al. (2014). Fonte: Adaptado de Archibold et al. (2014).....	34
Figura 4.2 - Campo de fração de massa do RT 27 após 40 min: (a) Tan (2008) e (b) Hosseinizadeh et al. (2013). Fonte: Adaptado de Hosseinizadeh et al. (2013).	35
Figura 4.3- Malha computacional e região de refino junto à parede.....	37
Figura 5.1 - Campos de fração de massa: (i) numérico Assis et al. (2007), (ii) experimental Assis et al. (2007) e (iii) Presente trabalho, para os tempos de: (a) 2min, (b) 5min, (c) 10min, (d) 15min, (e) 20 min e (g) 25min.	40
Figura 5.2– Fração líquida vs. tempo nos resultados experimentais e numéricos de Assis et al. (2007), e presente trabalho.	41
Figura 5.3 - (a) Campo de vetores de velocidade da validação numérica e (b) campo de PCM	41
Figura 5.4 - Campos de fração líquida para esferas abertas (i) e esferas fechadas (ii): (a) 5 min., (b) 10 min., (c) 15 min. e (d) 20 min.....	42
Figura 5.5 - Fração líquida vs. tempo: cavidades abertas e fechadas.....	43
Figura 5.6 – Campos de pressão: (a) esfera fechada e (b) esfera aberta.....	43
Figura 5.7 - Campos de velocidade sobrepostos a campos de fração de líquida para: (a) esfera fechada e (b) esfera aberta.....	44
Figura 5.8– Fração líquida vs. tempo para $D= 40$ mm, RT 35, 55 e 82: (a) $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; (b) $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ e (c) $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$	45
Figura 5.9– Fração líquida vs. tempo para $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, RT 35, 55 e 82: (a) $D=40$ mm; (b) $D=60$ mm, (c) $D=80$ mm e (d) $D=100$ mm.....	46
Figura 5.10 – Fluxo de calor vs. tempo para $D= 80$ mm, RT 35, 55 e 82: (a) $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; (b) $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ e (c) $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$	47

Figura 5.11 - Fração líquida vs. tempo para $D= 100$ mm, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$: (a) RT 35; (b) RT 55 e (c) RT 82.	48
Figura 5.12— Fração líquida vs. tempo para RT 35, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$: (a) $D=40$ mm; (b) $D=60$ mm, (c) $D=80$ mm e (d) $D=100$ mm.	49
Figura 5.13 — Fluxo de calor vs. tempo para RT 82, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$: (a) $D=40$ mm; (b) $D=60$ mm, (c) $D=80$ mm e (d) $D=100$ mm.	50
Figura 5.14 – Fração líquida vs tempo, para PCM RT 55, $D = 40, 60, 80$ e 100 mm: (a) $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, (b) $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ e (c) $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$	51
Figura 5.15 - Fluxo de calor vs. tempo para RT 82, $D=40, 60$ 80 e $D=100$ mm: (a) $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; (b) $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ e (c) $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$	52
Figura 6.1 –Fração líq.num vs. fração líq.cor, para Archibold et al. (2103), Assis et al. (2007) e Hosseinizadeh et al. (2014), com RT 35, 55 e 82, $\Delta T =10, 20$ e 30°C e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm.	57
Figura 6.2 – Fração líq. num vs. fração líq. cor. (proposta), para RT 35, 55 e 82, $\Delta T = 10, 20$ e 30°C e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Propriedades termofísicas de PCM. Adaptadas da empresa Rubitherm Technologies GmbH.....	29
Tabela 3.2 - Casos simulados, tipos de PCM, diâmetro das esferas e ΔT	29
Tabela 4.1 - Propriedades termofísicas do RT 27.	35
Tabela 4.2– Fração líquida de PCM: malhas M1, M2 e M3.	38
Tabela 4.3 - Fração líquida de PCM: $\Delta t = 0,0005$, $\Delta t = 0,001$ e $\Delta t = 0,002$	38
Tabela 5.1- Sumário dos tempos de fusão para $\gamma = 0,8$	48
Tabela 5.2 – Sumário do fluxo de calor para $t = 240$ s.....	50
Tabela 5.3 – Tempo, razão entre tempos e razão entre L_c para $D = 40, 60, 80$ e 100 mm e $\gamma = 0,8$	51
Tabela 5.4 – Sumário para fluxo de calor.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNISINOS –	Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
CFD –	Dinâmica de fluido computacional (Computational Fluid Dinamic).
NASA –	Agência nacional de administração aeronáutica e espacial (National Aeronautics and Space Administration).
PCM –	Material com mudança de fase (Phase Change Material)
RT -	Rubitherm Technologies GmbH
TES –	Armazenamento térmico de energia (Thermal Energy Storage)
VOF –	Volume de fluido (Volume of Fluid).

LISTA DE SÍMBOLOS

Nomenclatura

A – área [m]

C – constante Mushy Zone [-]

c_p – calor específico a pressão constante [J kg⁻¹ K⁻¹]

D – diâmetro [m]

e – espessura [m]

Fo – número de Fourier [-]

g – aceleração da gravidade [m s⁻²]

Gr – número de Grashof

h – coeficiente de transferência de calor [W m⁻² K⁻¹]

h_e – entalpia específica [J kg⁻¹]

h_{ref} – entalpia de referência [J kg⁻¹]

h_s – entalpia sensível [J kg⁻¹]

k – condutividade térmica [W m⁻¹ K⁻¹]

L – calor latente [J kg⁻¹]

L_c – comprimento característico [m]

m – massa [kg]

Nu – número de Nusselt [-]

p – pressão [Pa]

Pr – número de Prandtl [-]

q'' - fluxo de calor [W m⁻¹]

\dot{q} - taxa de calor [W]

r – raio [m]

R^2 – coeficiente de correlação [-]

\vec{S} – termo fonte da eq. da quantidade de movimento [Pa m⁻¹]

Ste – número de Stefan [-]

T – temperatura [K]

t – tempo [s]

T_∞ - temperatura do fluido longe da superfície [K]

V – volume [m³]

\vec{V} – vetor velocidade [m/s]

Símbolos Gregos

α - difusividade térmica [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

α_n - fração volumétrica na n -ésima célula computacional [-]

β - coeficiente de expansão volumétrica [K^{-1}]

Δ - variação

ε - constante (valor 0,001) [-]

ρ - massa específica [kg m^{-3}]

μ - viscosidade dinâmica [Pa s]

ν - viscosidade cinemática [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

γ - fração líquida [-]

χ - parâmetro que determina a influência do material da parede da esfera [-]

ξ - parâmetro de sub-resfriamento [-]

Sub-índices

ar - ar

cond - condução

conv - convecção

cor - correlação

f - final

i - inicial

l - líquido

num - numérico

s - sólido

sup - superfície

ref - referência

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.2 JUSTIFICATIVA.....	16
1.3 METODOLOGIA.....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA	18
2.1 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR CALOR LATENTE.....	18
2.2 PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE.....	21
2.2.1 Condução	21
2.2.2 Convecção	22
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE TROCA DE FASE.....	23
2.4 APLICAÇÕES DE PCM.....	25
3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	28
4 ABORDAGEM NUMÉRICA	30
4.1 SOFTWARE ICEM-CFD.....	30
4.2 SOFTWARE ANSYS FLUENT.....	30
4.3 SOFTWARE ANSYS CFX.....	31
4.4 MODELO MATEMÁTICO.....	31
4.5 CONSTANTE C.....	33
4.6 VALIDAÇÃO.....	35
4.6.1 Malha Computacional	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1 VALIDAÇÃO NUMÉRICA.....	39
5.2 INFLUÊNCIA DA ABERTURA DAS ESFERAS.....	42
5.3 RESULTADOS DOS CASOS ESTUDADOS.....	44
5.3.1 Influência do tipo de PCM	44
5.3.2 Influência da diferença de temperatura entre a parede da esfera e a temperatura de fusão do PCM (ΔT)	47
5.3.3 Influência do diâmetro das esferas	51
6 ANÁLISE DIMENSIONAL	54

6.1.1 Adimensionais.....	54
6.1.2 Correlação para a fração líquida.....	55
7 CONCLUSÕES.....	59
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Dentre os métodos de sistemas de armazenamento térmico (TES), o uso de calor latente tem motivado a pesquisa de um determinado grupo de materiais chamados de PCM (phase change materials), ou materiais de mudança de fase. Estes materiais são particularmente atrativos pelo fato de possuírem uma elevada entalpia de fusão para um pequeno volume de material (PIELICHOWSKA, 2014; DUTIL et al., 2011). As aplicações são bastante amplas, tais como: construção civil, reservatórios térmicos, vestuário, transporte de produtos perecíveis, refrigeração de equipamentos eletrônicos entre outros.

Kuznic et al. (2011), Pasupathy et al. (2008), Zalba et al. (2004), por exemplo, estudaram sistemas de arrefecimento em construções utilizando PCM. Farid e Kong (2010), Lin et al. (2005) e Nagano et al. (2006) estudaram sistemas de aquecimento de piso utilizando PCM para armazenamento e estabilização da temperatura. Liu et al. (2011) estudou sistemas de refrigeração utilizando PCM na forma de placas planas. Kandasamy et al. (2007) e Tan e Tso (2004) estudaram o uso de PCM nos sistemas de resfriamento eletrônico. Yagi e Akiyama (1995), Nomura et al. (2010) estudaram a recuperação e calor residual de processos com armazenamento térmico em PCM. Gin e Farid (2010) e Martin et al. (2010) estudaram a preservação de alimentos congelados através de painéis de PCM.

Processos de fusão e/ou solidificação de PCM já foram estudados com diferentes geometrias, tais como: cilíndricas, retangulares, cubos e esferas. Shmueli et al. (2010), Murray e Groulx (2014), Longeon et al. (2013), por exemplo, estudaram a fusão e solidificação de PCM em tubos cilíndricos. Shatikian et al. (2005), Fok, et al. (2010), Hosseinizadeh, et al. (2011), estudaram o uso de PCM em cavidades retangulares. MacDevette e Myers (2012) estudaram o processo de fusão de PCM em cubos.

Estudos para armazenamento térmico utilizando reservatórios preenchidos com cavidades esféricas (pebble bed ou packed bed) foram realizados por Mawire e McPherson (2009), Oro et al. (2013), Karthikeyan et al. (2014) e Kao et al. (2014), por exemplo. Estes autores realizaram suas pesquisas de forma experimental e numérica estudando o comportamento de TES com os reservatórios sendo preenchidos por esferas. Outros autores como Assis et al. (2007), Tan (2008) e Hosseinizadeh et al. (2013), por exemplo, realizaram estudos detalhados experimental e numérico da forma como ocorre a fusão do PCM no interior de esferas, concentrando-se em explicar os fenômenos que ocorrem durante o processo de fusão de PCM. Verifica-se que estes estudos foram conduzidos com PCM de uma

única temperatura de fusão de 28°C. Os resultados para o tempo total de fusão foram obtidos variando-se o diâmetro das esferas e a temperatura da parede.

Através da revisão bibliográfica realizada, verificou-se que poucos estudos foram conduzidos utilizando diferentes tipos de PCM em esferas de diferentes diâmetros. Assim, abre-se um campo para o estudo de novas aplicações dos PCM em esferas com a intenção de aproveitar as vantagens deste sistema.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar numericamente o processo de fusão de PCM em cavidades esféricas. Já os objetivos específicos consistem em: (a) analisar a influência do diâmetro das esferas no tempo de fusão do PCM; (b) analisar o comportamento fluidodinâmico da fusão do PCM com diferentes temperaturas na parede; (c) analisar o comportamento fluidodinâmico da fusão de diferentes tipos de PCM e (d) obter uma correlação adimensional para a fração de líquido.

1.2 JUSTIFICATIVA

O armazenamento de energia térmica com uso de PCM é justificado pela alta densidade de armazenamento térmico que estes materiais apresentam sob a forma de calor latente durante o processo de mudança de fase. Se comparado a outros materiais, esta alta densidade de armazenamento viabiliza o seu uso em diversas aplicações. O comportamento destes materiais nos processos de fusão e solidificação ainda não foi suficientemente estudado numericamente para formatos esféricos. O motivo pela qual serão estudados os processos de fusão de PCM no formato de esferas é consequência da sua utilização em reservatórios térmicos, pois PCM acondicionados em formato esférico possuem a maior área superficial por unidade de massa.

1.3 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido utilizando-se o software comercial ANSYS Fluent. O modelo matemático é composto pelas equações de balanço de massa, da quantidade de movimento e da conservação da energia, acrescidas das 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 através da comparação com resultados numéricos disponíveis na literatura.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 8 Capítulos. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que engloba os métodos de armazenamento térmico de energia, suas classificações, vantagens e desvantagens, bem como critérios de escolha dos PCM, aplicações e trabalhos já desenvolvidos nesta área. No Capítulo 3 apresenta-se a definição do problema com a descrição dos casos estudados. O Capítulo 4 apresenta a abordagem numérica, onde é descrito o trabalho de simulação, incluindo a validação numérica, o modelo matemático, condições de contorno e iniciais e a verificação de convergência de malha. No Capítulo 5 são apresentados os resultados da validação numérica, a análise de esferas abertas e fechadas em relação aos processos fluidodinâmicos e os resultados e discussões dos 36 casos simulados. No capítulo 6 é apresentada uma correlação para a fração líquida. No Capítulo 7 são descritas conclusões deste trabalho e no Capítulo 8 apresentam-se sugestões para os próximos trabalhos.

2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

O armazenamento de energia térmica pode ser na forma de calor sensível, calor latente, energia termoquímica ou uma combinação destas. A energia armazenada em forma de calor sensível é verificada quando a adição de calor em um determinado corpo resulta em um aumento proporcional da temperatura deste corpo. A quantidade de calor armazenado depende do calor específico médio, da quantidade de material utilizado e da diferença de temperatura. Já a energia armazenada em forma de calor latente é verificada quando a adição de calor em um corpo resulta em uma mudança de fase sólido-líquido ou líquido-vapor. Nesta situação, não há aumento da temperatura do corpo, e toda adição de calor é utilizada para promover a mudança de fase do material.

Entre as técnicas de armazenamento de energia térmica, a utilização de armazenamento por calor latente é a que se apresenta mais atraente. Isto é devido a capacidade de fornecer alta densidade de armazenamento de energia e de suas características de fornecer calor a temperatura constante, correspondente a temperatura de transição de fase dos PCM (SHARMA et al., 2005).

2.1 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR CALOR LATENTE

Materiais utilizados em armazenamento térmico com mudança de fase são chamados de PCM, abreviatura de Phase Change Materials. À medida que o PCM recebe ou cede calor, este passa da fase sólida para a fase líquida ou da fase líquida para a fase sólida, respectivamente. Nestes processos, a temperatura permanece praticamente constante até que a fusão ou solidificação seja concluída. A principal vantagem de armazenamento de energia térmica por calor latente é sua alta densidade de armazenamento em pequenos intervalos de temperatura (CABEZA et al., 2011). A comparação entre o armazenamento térmico por calor sensível e por calor latente mostra que os últimos têm densidades de armazenamento normalmente de cinco a dez vezes mais elevadas que os primeiros, e quando comparados com a água, seu volume pode ser duas vezes menor (HASNAIN, 1998).

Apesar dos PCM possuírem muitas qualidades, algumas características destes materiais ainda necessitam ser estudadas para que seu uso seja viável. A grande maioria dos PCM não metálicos apresenta uma condutividade térmica muito baixa. Por este motivo, autores como Fan e Khodadadi (2011), Agyenim et al. (2009) e Nakaso et al. (2008) estudaram técnicas para o aumento da condutividade térmica dos PCM de forma experimental e

computacional. Dentre as técnicas pesquisadas está a inserção de estruturas de alumínio, níquel, aço inoxidável entre outros. Estas pesquisas foram motivadas para o uso de PCM no gerenciamento de equipamentos eletrônicos em aviões e naves espaciais, mas sua utilização é abrangente para o armazenamento térmico em geral, principalmente com o uso de energia solar.

Outro aspecto importante para a viabilidade do uso de PCM é sua estabilidade ao longo do tempo. A estabilidade dos PCM é a capacidade que estes tem de continuar mantendo suas propriedades de absorção de energia com mudança de fase pela maior quantidade de ciclos possível. Sabe-se, entretanto, que ciclos combinados de carga e descarga tem uma vida finita. Assim, autores como Rathod e Banerjee (2013) e Farid et al. (2004) contribuíram com suas pesquisas analisando a estabilidade destes materiais nos seus diversos ciclos de carga e descarga. A maioria dos PCM mantém suas propriedades acima de 1.000 ciclos, podendo chegar a mais de 5.000 em muitos tipos de PCM. De acordo com Murat e Khamid (2007), o número de ciclos mínimo necessário para que um PCM seja utilizado comercialmente é de 1.000 ciclos sem perda de suas propriedades.

PCM podem ser usados em uma vasta gama de temperaturas, pois os tipos existentes de PCM permitem que se trabalhe em uma faixa de temperatura de -100°C à 800°C (ZHOU et al., 2012). A escolha do PCM a ser utilizado depende de suas propriedades termofísicas, química e cinética, pois estas devem corresponder aos objetivos do armazenamento (HALE et al., 1971; BUDDHI et al., 1994).

Diversos estudos têm sido realizados explorando o uso de PCM. Agyenim et al. (2010), por exemplo, estudaram detalhadamente vários tipos de PCM utilizados nas últimas 3 décadas. Nestes estudos, os autores investigaram o emprego de PCM para cargas e descargas em sistemas térmicos, principalmente em PCM com temperatura de fusão entre 0 e 60°C para uso doméstico. Soares et al. (2013) explorou onde e como são utilizados PCM em sistemas de armazenamento térmico passivos, principalmente em construções. Nestes sistemas passivos, PCM são incorporados em paredes e forros de gesso, em tijolos, dentro do concreto, em vidros e em persianas. Como resultado, há a melhora do conforto térmico pela redução dos picos de temperatura e redução do consumo de energia.

Oro et al. (2012) realizou sua pesquisa na revisão do uso de PCM para sistemas de armazenamento térmico, principalmente em PCM que utilizam mudança de fase sólido líquido neste tipo de armazenamento. O trabalho do autor foi focado em PCM encapsulados, no aumento da transferência de calor e no armazenamento de alimentos. O autor observou que

PCM utilizados para estas aplicações de armazenamento térmico contribuem muito na lacuna existente entre o período de produção e o período de demanda da energia térmica.

Assim como Oro et al. (2012), Gschwander et al.(2005) estudou de forma experimental o uso de PCM micro encapsulados para armazenamento térmico em sistemas de refrigeração, identificando as vantagens do uso de PCM parafínicos encapsulados, por estes poderem ser bombeados junto com fluidos (por exemplo, água), e dispersos neste meio. Armazenamento térmico em plantas industriais foi estudado por Wang et al. (2007), demonstrando que 8% de energia podem ser economizadas com a diminuição da temperatura de sub-resfriamento usando PCM. O Autor demonstrou também que o uso de PCM em pré-condensadores de sistemas de refrigeração pode aumentar o COP em até 6%.

Na área de armazenamento térmico com o uso de energia solar, Noro et al. (2014) estudou como os PCM podem contribuir para a diferença entre a produção e demanda, quando se utiliza a energia solar como fonte de energia térmica. Os autores concluíram que os PCM apresentam maior vantagem de uso comparado a reservatórios de calor sensível, quando a temperatura média do fluido é próxima à temperatura de fusão do PCM.

Kenisarin e Mahkamov (2007) realizaram um estudo bem abrangente do uso de PCM para armazenamento térmico, pesquisando diversos tipos de PCM, suas características e aplicações. Mahfuz et al. (2014) e Mettawee e Assassa (2006) contribuíram com pesquisas de armazenamento térmico com o uso de PCM para situações residenciais, pesquisando as características apresentadas tanto na carga como descarga dos PCM.

Armazenamento de energia por calor latente é utilizada não só em reservatórios térmicos, mas também nas situações em que o armazenamento da energia provoca uma estabilidade térmica. Cabeza et al. (2011), por exemplo, realizou uma revisão do uso de PCM em construções, compilando informações sobre os requerimentos para o uso deste tipo de tecnologia. O autor também pesquisou a disponibilidade destes materiais, sua classificação, os problemas e as possíveis soluções do uso de PCM em construções. Khudhair e Farid, (2004), contribuiu com estudos dos tipos de PCM existentes, principalmente com PCM encapsulados dentro de paredes, tetos e pisos de construções. Estes estudos do autor mostraram as vantagens de uso de PCM encapsulados utilizados para o conforto térmico humano, no que diz respeito à diminuição da variação da temperatura ambiente ao longo do dia e a manutenção desta temperatura por longos períodos de tempo. Zhou et al. (2012) direcionou suas pesquisas com PCM para o conforto térmico principalmente pelo fato dos PCM terem uma alta densidade de armazenamento térmico com pouca variação de temperatura. O autor

mostrou como os PCM podem contribuir para diminuir as flutuações da temperatura interna em construções.

Dolado et al. (2012) também focou suas pesquisas em conforto térmico, analisando trocadores de calor ar - PCM para uso da manutenção de temperatura de salas, pesquisando suas aplicações em diferentes países.

Observa-se que ano a ano o número de estudos experimentais e numéricos com PCM tem aumentado. O fato de inúmeros autores pesquisarem utilização de PCM em diversos sistemas demonstra a importância do uso de PCM, tanto na conservação e armazenamento de energia, de forma direta ou indireta.

2.2 PROCESSO DE MUDANÇA DE FASE

Para que ocorra o processo de mudança de fase dos PCM é preciso que ocorra transferência de calor de um meio para o PCM, ou vice versa. Estes ocorrem normalmente por condução e convecção, os quais serão exemplificados na sequência. As equações para condução e convecção foram obtidos de Çengel e Ghajar (2012) e Bejan (1996).

2.2.1 Condução

A condução é a forma de transferência de energia através de um meio material onde não há movimento ou transporte da matéria. Neste caso, a energia é transferida de partículas mais energéticas para as menos energéticas. A Fig. (2.1) mostra uma placa plana de espessura e , com temperatura T_1 e T_2 , nas faces da esquerda e da direita, respectivamente. Neste caso, a transferência de calor por condução ocorre através de uma superfície A , com temperatura T_1 , onde, após percorrer uma distância e , encontra-se em uma temperatura T_2 , sendo $T_1 > T_2$.

No processo de transferência de calor por condução, a taxa de transferência de calor pode ser representada pela Lei de Fourier, Eq. (2.1). Considerando que a transferência de calor seja unidirecional, na direção de η , a taxa de calor \dot{q}_η é diretamente proporcional à condutividade térmica do material k com área A , à diferença de temperatura ΔT , e inversamente proporcional à distância e . Para um caso unidimensional, levando a expressão ao limite quando $\Delta e \rightarrow 0$, a equação da taxa de calor por condução, Lei de Fourier, é expressa como:

$$\dot{q}_\eta = -kA \frac{dT}{de} \quad (2.1)$$

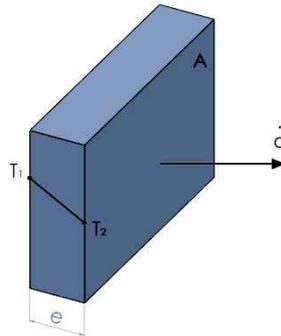


Figura 2.1 - Condução térmica em placa planas.

Fonte: o autor

O sinal negativo da Eq. (2.1) assegura que a transferência de calor no sentido positivo de um eixo seja uma quantidade positiva. Esta mesma equação pode ser escrita em função do fluxo, q'' e assim a Eq. (2.1) pode ser escrita como:

$$q'' = \frac{\dot{q}_\eta}{A} = -k \frac{dT}{de} \quad (2.2)$$

Neste trabalho, estuda-se a fusão do PCM acondicionado em cavidades esféricas. Pelo fato de manter-se uma temperatura constante na parede externa, o fluxo de calor dá-se da superfície da esfera para o seu interior. Esta transferência de calor para o PCM, inicialmente por condução, faz com que ocorra mudança de fase em uma fina camada de PCM junta à superfície interna da esfera. Posteriormente, em função do empuxo causado pelas diferenças de temperatura da fase líquida, o processo de transferência de calor por condução cede espaço para o processo de convecção natural, o qual está apresentado na seção 2.2.2.

2.2.2 Convecção

Convecção, de um modo geral, é a forma em que o calor é transferido entre uma superfície estacionária e um fluido adjacente em movimento, envolvendo efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido. Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção. A convecção pode ser do tipo forçada ou natural. Na convecção forçada, o movimento do fluido é criado através de um meio externo ao domínio. Na convecção natural, o movimento do fluido ocorre em função de uma diferença de

massa específica do fluido, decorrente da variação de temperatura. Segundo a Lei do Resfriamento de Newton, Eq. (2.3), a taxa de transferência de calor por convecção é proporcional à diferença de temperatura e a área de passagem (A).

$$\dot{q} = hA(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (2.3)$$

onde \dot{q} é a taxa de transferência de calor, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_{sup} é a temperatura da superfície e T_{∞} é a temperatura do fluido longe da superfície.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE TROCA DE FASE

Vários tipos de PCM estão disponíveis no mercado, para várias faixas de temperatura e aplicações. Pela sua composição, eles são classificados inicialmente em orgânicos, inorgânicos e eutéticos. Suas subdivisões podem ser observadas na Fig. (2.2).

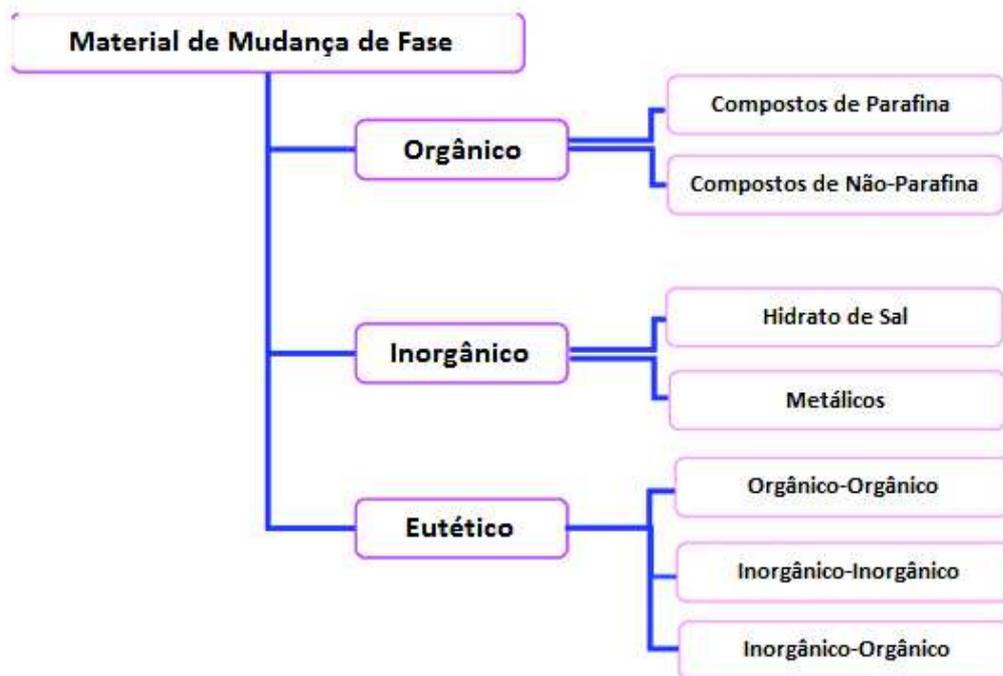


Figura 2.2- Classificação de PCM Fonte: Adaptado de Sharma et al., (2009).

Materiais orgânicos são descritos como parafinas e não-parafinas. Estes materiais apresentam propriedades de derreter e congelar repetidamente. Como materiais orgânicos, eles cristalizam com pouco ou nenhum super-resfriamento, além de serem normalmente não

corrosivos (SHARMA et al, 2009). Abhat (1983) e Shukla et al. (2008) conduziram um extenso levantamento de materiais orgânicos. Algumas das características desses materiais orgânicos encontradas por estes autores são: elevado calor de fusão, inflamabilidade, baixa condutividade térmica, nível de toxicidade variado e instabilidade em altas temperaturas

As parafinas tem baixo custo e não são corrosivas. São também quimicamente inertes abaixo de 500°C. As parafinas também mostram algumas propriedades indesejáveis, como baixa condutividade térmica, não sendo compatíveis com recipientes plásticos e sendo moderadamente inflamáveis (SHARMA et al., 2009). As não parafinas, também chamadas de ácidos graxos, são os mais numerosos dentre os PCM. Diferentemente das parafinas, que possuem propriedades muito semelhantes, cada tipo de não parafina possui suas próprias propriedades, bem diferentes entre si. As não parafinas têm alto calor de fusão com valores comparáveis aos das parafinas. Mostram também repetibilidade de fusão e comportamento de congelamento sem super-resfriamento. Sua grande desvantagem, no entanto, é o seu custo, que é 2-2,5 vezes maior comparado com as parafinas. Eles também são levemente corrosivos. (HASNAIN, 1998).

De acordo com Sharma et al. (2005), pode-se dividir os materiais inorgânicos entre hidrato de sal e metálicos. Hidratos de sal são ligas de sais inorgânicos e água que formam um sólido cristalino. Vários pesquisadores, entre eles Abhat (1983), Garg et al. (1985), estudaram as propriedades destes PCM. As propriedades mais atraentes de sal hidratos são: elevado calor latente de fusão por unidade de volume, condutividade térmica relativamente elevada (quase o dobro da parafina), e pequenas alterações de volume na fusão. Eles não são muito corrosivos, sendo compatíveis com plásticos e sendo também apenas ligeiramente tóxicos. Muitos hidratos de sal são suficientemente baratos, indicando seu uso no armazenamento de calor. O grande problema em usar hidratos de sal é a segregação, com o deslocamento do sólido de sal na parte inferior do recipiente. Isto resulta em um processo irreversível de derretimento-congelamento do hidrato de sal e que diminui a cada ciclo de carga-descarga. (SHARMA et al., 2005).

Nas categorias de PCM metálicos incluem-se os metais de baixo ponto de fusão e de metais eutéticos (composição de ponto de fusão de dois ou mais componentes). Estes PCM metálicos e eutéticos ainda não foram seriamente considerados para a tecnologia PCM por causa de restrições de peso. No entanto, quando somente o volume é considerado, são importantes candidatos por causa do alto calor de fusão por unidade de volume. Eles têm alta condutividade térmica, por isso cargas com adição de peso não são necessários. Algumas das características destes materiais são: baixo calor de fusão por unidade de peso, alta temperatura

de fusão por unidade de volume, condutibilidade térmica elevada, calor específico baixo e a pressão de vapor relativamente baixo (SHARMA et al., 2009).

2.4 APLICAÇÕES DE PCM

Diversas aplicações de PCM são utilizadas em produtos do dia a dia. Nos equipamentos eletrônicos, por exemplo, uma temperatura de operação inadequada degrada seus componentes, como baterias de Li-on e células fotovoltaicas, com a diminuição da vida útil dos mesmos (ZIYE et al., 2014). Um gerenciamento eficiente da temperatura dos componentes eletrônicos através de PCM oferece vantagens por serem compactos, simples e leves, além de não necessitarem de energia extra para funcionarem se comparados aos sistemas de arrefecimento por convecção forçada com ar ou líquido.

De acordo com Zhou et al. (2012), várias formas de incorporações de PCM são utilizadas em construções. Método de incorporação direta, método de imersão, macro encapsulamento, micro encapsulamento e PCM de formas estabilizadas (shape-stabilised PCM) são as formas mais comuns de utilização de PCM em edificações. O uso de PCM em construções atenua os efeitos de aquecimento e resfriamento sofridos pelo ambiente, e por consequência a energia requerida para aquecer ou resfriar os ambientes são reduzidas. Efeitos na redução da temperatura ambiente no verão em até 4°C são observados (VOELKER et al., 2008).

PCM pode ser adicionado em tecidos e roupas com o objetivo de regular o conforto térmico. Estudos de Sánchez et al. (2010) mostram os efeitos de termo regulação da temperatura em tecidos impregnados com PCM. Desde o ano de 1980 a agência espacial norte americana (NASA) pesquisa a utilização de controle passivo de temperatura utilizando PCM em trajes espaciais. Outras aplicações do uso de PCM em tecidos podem ser citadas, como o uso em cobertores e uso em condições ambientais extremas. O uso de PCM também tem se mostrado um importante aliado na conservação da temperatura dos alimentos congelados quando há a falta de energia para manutenção da temperatura. Estudos mostram que a utilização de certos tipos de PCM em reservatórios como freezers podem manter a temperatura do ar 15°C menores do que a mesma situação sem o uso de PCM ao fim de 24 horas. Outra aplicação de PCM em transportes é no uso de recipientes de uso medicinal. Tecidos humanos para transplante de pele exigem transporte a uma temperatura controlada, situada entre 3°C e 6°C. Ohkawara et al. (2012) mostrou que o uso de PCM em recipientes de transporte para estes tecidos humanos mantém a temperatura dentro destes limites. Sem o uso

de PCM, ocorre um aumento da temperatura interna no verão e uma diminuição com temperaturas abaixo de 0°C no inverno, situações que prejudicam os tecidos a serem transplantados.

Exemplos de aplicação de PCM em diversos formatos são mostrados nas Fig. 2.3, Fig. 2.4 e Fig. 2.5.

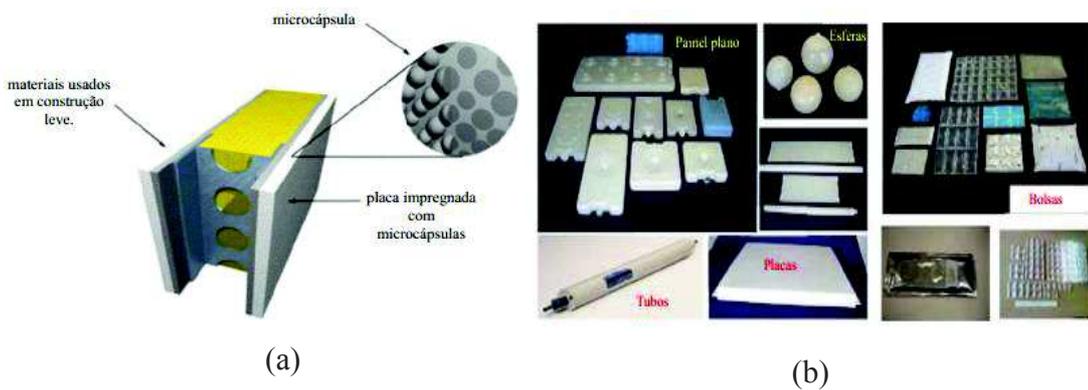


Figura 2.3 – Exemplos de aplicações de PCM macro e micro encapsulado.
Fonte: (a) Soares et al. (2003) e (b) www. Pcmproduct.net.

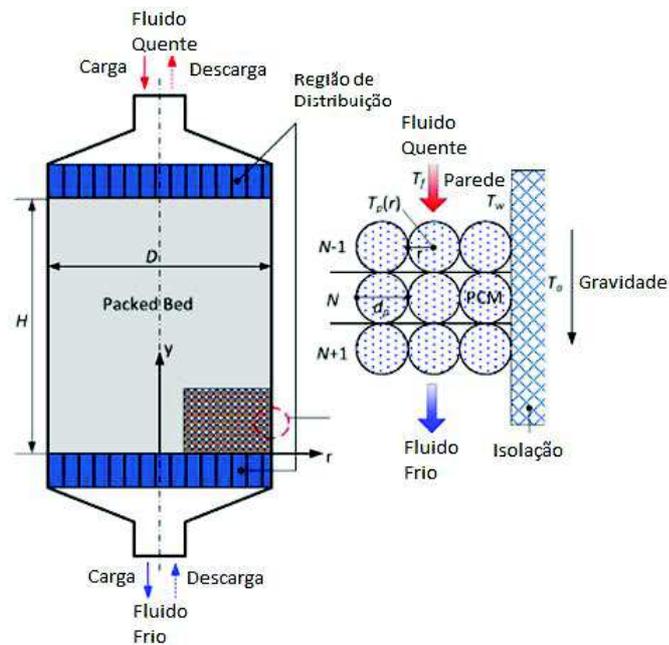


Figura 2.4 – Reservatório térmico com PCM encapsulado em formato esférico.
Fonte: Peng et al. (2014)



Figura 2.5 – Aplicações de PCM para transporte e manutenção da temperatura.

Fonte: Oró et al. (2012).

3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A geometria do problema a ser resolvido é formada por uma cavidade esférica, conforme apresentado na Fig. (3.1). Foram escolhidos 4 diâmetros de esferas, 40 mm, 60 mm e 80 mm e 100 mm, as quais são preenchidas com 85% de seu volume com PCM, sendo o restante do volume preenchido com ar. O limite sólido (casca) da esfera possui uma espessura de 2 mm. Por questão de simetria, pode-se representar a esfera apenas por um de seus hemisférios através de uma fatia cilíndrica e coordenadas cartesianas.

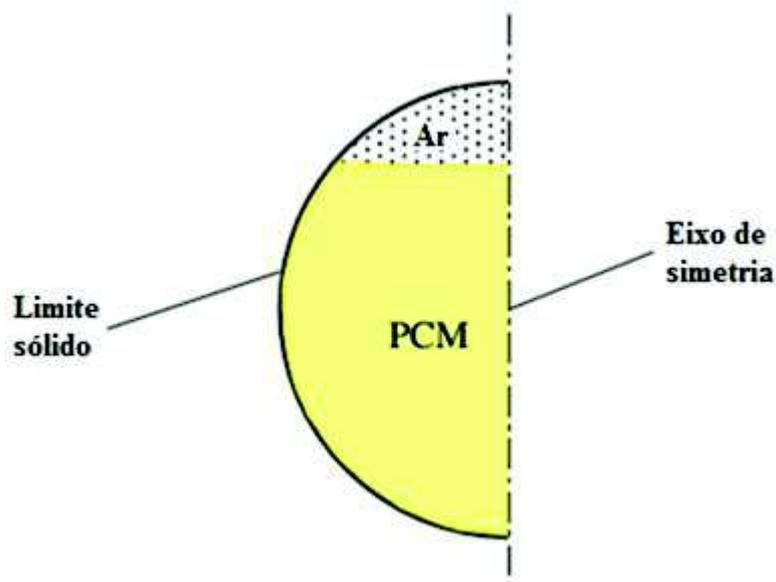


Figura 3.1 - Representação da condição inicial de uma esfera com PCM em estado sólido.
Fonte: Adaptado de Assis et al., 2007

Ao impor uma determinada temperatura na parede da esfera, inicia-se o processo de fusão do PCM devido à transferência de calor por condução através da parede da esfera para o PCM. Isto faz com que o PCM em contato com a parede se liquefaça e inicie um movimento ascendente junto à parede da esfera. Este movimento é devido à convecção natural do PCM líquido, que possui uma massa específica menor em relação ao PCM sólido. Com a fusão do PCM, ocorre então um aumento do volume da região ocupada inicialmente pelo PCM e uma diminuição proporcional do volume ocupado inicialmente pelo ar, o qual é de 15% do volume total da esfera.

Este trabalho consiste em estudar a fusão de PCM em esferas de diferentes diâmetros, com diferentes temperaturas de parede e diferentes tipos de PCM. Foram escolhidos 3 PCM, os quais possuem diferentes temperaturas de fusão, todos fabricados pela empresa alemã

Rubitherm Technologies GmbH. A escolha dos PCMs foi feita visando o uso em sistemas de aquecimento solar e industrial. Os PCM escolhidos são do tipo parafínicos (orgânicos) e sua denominação é feita pelas letras RT, seguidas da indicação da temperatura de fusão do PCM. As propriedades destes PCM estão apresentadas na Tab. (3.1)

Tabela 3.1 - Propriedades termofísicas de PCM. Adaptadas da empresa Rubitherm Technologies GmbH.

Propriedade	RT 35	RT 55	RT 82
Temperatura de fusão (°C)	29-36	51-57	77-85
Calor latente (kJ / kg)	170	172	176
Calor específico (kJ / kg K)	2	2	2
Massa Específica sólida (kg / m ³)	860	880	880
Massa específica líquida (kg / m ³)	770	770	770
Condutividade térmica (W / m K)	0,2	0,2	0,2
Coefficiente de expansão térmica (1/K)	0,5 x 10 ⁻³	0,5 x 10 ⁻³	0,5 x 10 ⁻³
Viscosidade dinâmica (mPa s)	2,31	2,66	3,15
Viscosidade cinemática (mm ² / s)	3,3	3,8	4,5

Os casos estudados estão apresentados na Tab. (3.2). Cada tipo de PCM será avaliado em esferas de diâmetros 40, 60, 80 e 100 mm, cujas paredes estão a 10, 20 e 30°C acima da temperatura de fusão dos PCM. A temperatura inicial de cada caso é fixada em 5°C abaixo da temperatura de fusão dos PCM. Este sub-resfriamento garante que o PCM esteja totalmente solidificado antes do início da fusão.

Tabela 3.2 - Casos simulados, tipos de PCM, diâmetro das esferas e ΔT .

Casos	PCM	Diâm. Esfera [m]	ΔT [°C]
1 a 12	RT 35	40, 60, 80 e 100	10, 20 e 30
13 a 24	RT 55	40, 60, 80 e 100	10, 20 e 30
25 a 36	RT 82	40, 60, 80 e 100	10, 20 e 30

4 ABORDAGEM NUMÉRICA

A fluidodinâmica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics) reúne as ferramentas numéricas e computacionais que são usadas para solucionar problemas complexos de engenharia. Utilizam-se formas discretizadas das equações diferenciais da dinâmica dos fluidos e da transferência de calor para resolver estes problemas em volumes de controle. Esta abordagem numérica apresenta vantagens quando os modelos experimentais apresentam custos elevados e quando não é possível a utilização de instrumentos de medição devido às limitações dos instrumentos de medição. Além de resolver as equações, através da fluidodinâmica computacional pode-se visualizar e interpretar os resultados obtidos. Atualmente existem diversos softwares comerciais de CFD disponíveis no mercado. Dentre os mais conhecidos destacam-se o Ansys CFX, o Ansys Fluent, o Star-CCM e o Flow-3D, entre outros.

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

4.1 SOFTWARE ICEM-CFD

A primeira etapa para realizar-se uma análise por CFD é a criação da geometria e, posteriormente, da malha computacional. O software utilizado para este fim é o ICEM, o qual permite a criação de geometrias bi dimensional (2D) ou tri dimensional (3D). Nesta etapa também são criadas as superfícies, de acordo com as condições de contorno necessárias ao estudo. A geometria é então subdividida, formando assim uma malha computacional. Na elaboração da malha é necessário criar regiões de refinamento, onde ocorrem os maiores gradientes de velocidade e temperatura, por exemplo.

4.2 SOFTWARE ANSYS FLUENT

ANSYS FLUENT é o software mais utilizado nas pesquisas envolvendo PCM, a exemplo dos trabalhos de Assis et al., (2007), Shmueli et al. (2010) e Tan et al., (2009). Assim, e uma vez que este software está disponível na UNISINOS, o mesmo é utilizado neste trabalho.

Além da importação da malha é necessário definir as equações governantes, o tipo de escoamento (se laminar ou turbulento), o tipo de regime (se permanente ou transiente); direção da aceleração da gravidade (quando necessário), se mono ou multifásico, entre outros. As condições de controle de simulação, tais como: critério de convergência, número de iterações e intervalo de tempo, entre outros, também devem ser especificadas. Além disso, as propriedades termofísicas dos materiais, as condições iniciais e de contorno também devem ser declaradas.

A simulação de fusão do PCM envolve um problema multifásico (PCM - ar). O modelo utilizado nas simulações foi o modelo multifásico tipo VOF (volume de fluido), o qual 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. O regime de escoamento foi considerado laminar e o modelo de fusão e solidificação (solidification and melting) com a especificação do valor da constante C (mushy zone).

4.3 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 no Item 4.1. 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 outros aplicativos, como planilhas eletrônicas, por exemplo.

4.4 MODELO MATEMÁTICO

As equações que compõe o modelo matemático são as equações de balanço de massa (4.1), da quantidade de movimento (4.2) e da conservação da energia (4.3), (ANSYS, 2013) e apresentadas a seguir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + \rho g + \vec{S} \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial(\rho h_e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_e) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4.3)$$

onde ρ é a massa específica, \vec{V} é o vetor velocidade, t é o tempo, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica, g é a aceleração da gravidade, \vec{S} é o termo fonte da quantidade de movimento e h_e é entalpia específica.

Para descrever o sistema PCM-ar presente internamente na esfera, é utilizado o modelo VOF, cuja aplicação é adequada à sistemas sem interpenetração dos dois elementos e com interfaces móveis. Neste modelo, a fração volumétrica de um fluido dentro da célula é descrita através da Eq. (4.4).

$$\frac{\partial(\alpha_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_n \vec{V}) = 0 \quad (4.4)$$

Assim, se α_n for denominado como a fração volumétrica de PCM, três condições são possíveis: 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 o ar.

Para a região de mudança de fase dentro do PCM, na interface entre sólido e líquido, é utilizada a técnica de modelagem entalpia porosidade proposta por Brent e Voller (1988), tratando esta região como se fosse um meio poroso. A porosidade em cada célula é definida como sendo igual a fração líquida desta célula. Em regiões totalmente solidificadas a porosidade é igual à zero, o que extingue as velocidades nestas regiões.

A fração líquida (γ), durante a mudança de fase, é obtida através do resultado da Eq. (4.5), ocorrendo em uma faixa de temperatura $T_s < T < T_l$, (ANSYS, 2013).

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s, \\ 1 & \text{se } T > T_l, \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & \text{se } T_s < T < T_l. \end{cases} \quad (4.5)$$

onde T_s é a temperatura do PCM sólido e T_l é a temperatura do PCM líquido.

A entalpia específica é definida na Eq. (4.7) como sendo a soma da entalpia sensível, h_s , descrita através da Eq (4.6), com a entalpia devida à mudança de fase (γL), onde h_{ref} é a entalpia de referência na temperatura de referência (T_{ref}) e L é o calor latente de fusão.

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT, \quad (4.6)$$

$$h_e = h_s + \gamma L \quad (4.7)$$

O termo fonte (\vec{S}) da equação da quantidade de movimento é definido por:

$$\vec{S} = -A(\gamma)\vec{V} \quad (4.8)$$

onde $A(\gamma)$ é a “função porosidade”, definida por Brent e Voller (1988), e calculada através da Eq.(4.9).

$$A(\gamma) = \frac{C(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)}, \quad (4.9)$$

onde $\varepsilon = 0,001$ é uma pequena constante para evitar a divisão por zero e C é a constante que reflete o processo cinético e morfologia da região de mudança de fase, estudada, entre outros, por pesquisadores como Brent e Voller (1988) e Shmueli et al. (2010). Estes pesquisadores demonstraram que a constante C controla, efetivamente, o grau de fusão (ou solidificação), sendo mais rápido ou mais lento, dependendo do valor adotado para esta constante. A constante C interfere, assim, na intensidade de convecção do PCM líquido durante todo o processo de fusão ou solidificação. Os valores normalmente adotados para a constante C vão de 10^4 a 10^{10} .

4.5 CONSTANTE C

O valor da constante C utilizada na solução numérica interfere na convecção que ocorre no processo de mudança de fase, modificando o tempo de fusão ou solidificação da solução. Desta forma, entende-se que o valor da constante C deve ser encontrado para que o resultado da simulação seja o mais fiel possível com o resultado experimental. Autores como Shmueli et al. (2010) utilizaram $C = 10^9$ para estudos de fusão em cilindros. Assis et al. (2007)

utilizaram $C = 10^5$ para o estudo de fusão de esferas e Archibold et al. (2014) utilizaram $C=10^4$ nos seus estudos de fusão em esferas. Schmueli et al. (2010) e Assis et al. (2007) utilizaram o PCM comercial fabricado pela empresa Rubitherm RT 27, com temperatura de fusão de 28°C e Archibold et al. (2014) utilizaram nitrato de sódio como PCM, com temperatura de fusão de 306° .

Archibold et al. (2014) validou seus resultados com os resultados experimentais de Tan (2008), conforme apresentado na Fig. (4.1). Observa-se que o autor representa os resultados numéricos apenas em duas cores: branco, representando a região líquida, e cinza, representando a região sólida. Os resultados numéricos de Archibold et al. (2014) foram obtidos com $C = 10^4$. Pode-se observar que, nesta condição, seus resultados reproduzem bem o resultado experimental de Tan (2008).

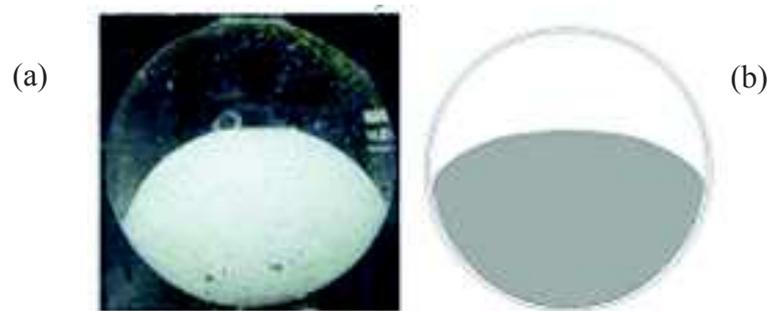


Figura 4.1- Campo de fração de massa do RT27 após 40 min: (a) Tan (2008) e (b) Archibold et al. (2014). Fonte: Adaptado de Archibold et al. (2014).

Hosseinizadeh et al (2013) também validou seu trabalho de simulação numérica com os resultados experimentais de Tan (2008). Observa-se na Fig. (4.2) que o autor manteve os resultados com a cor azul representando a fração de PCM sólido, a cor vermelha representando a fração de PCM líquido e ar, e uma região intermediária entre o PCM sólido e líquido, situada entre as cores azul e vermelha, representando a mushy zone. Observa-se nos resultados das simulações numéricas que a região do PCM sólido, em azul, é o que melhor representa o resultado experimental. O autor pesquisou valores da constante C entre 10^5 e 10^7 , encontrando melhores resultados para $C = 10^5$.

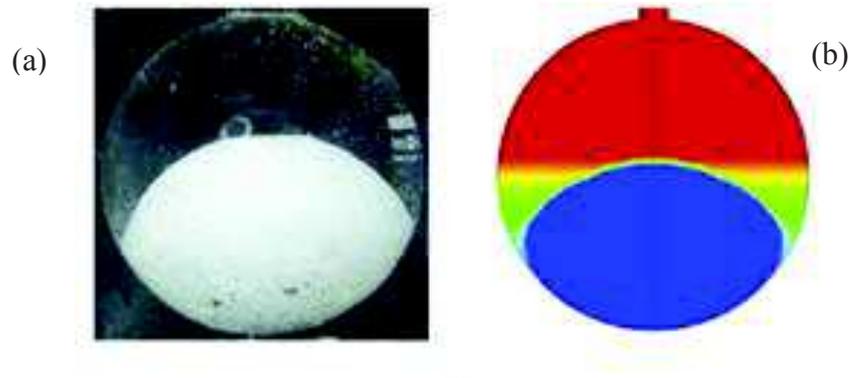


Figura 4.2 - Campo de fração de massa do RT 27 após 40 min: (a) Tan (2008) e (b) Hosseinizadeh et al. (2013). Fonte: Adaptado de Hosseinizadeh et al. (2013).

4.6 VALIDAÇÃO

A validação do modelo numérico foi realizada utilizando-se o trabalho de Assis et al. (2007). Neste trabalho os autores investigaram o processo de fusão do PCM RT 27 encapsulado em uma esfera. Neste estudo, o PCM inicialmente sólido é fundido a partir do aquecimento da parede da esfera à temperatura constante. A esfera utilizada pelo autor possui diâmetro interno de 80 mm. A casca da esfera é feita de vidro e possui uma espessura de 2 mm e um coeficiente de condução de calor de 0,81 W/m K. Neste experimento, a temperatura da parede da esfera permanece constante em 38°C, ou seja, 10°C acima da temperatura de fusão do PCM.

A esfera é preenchida com PCM em 85% de seu volume. Na parte superior da esfera tem-se uma região com ar, ocupando os restantes 15% do volume da esfera. Nesta região tem-se também uma abertura que permite a entrada ou saída de ar livremente, a fim de que a pressão interna não seja alterada com as variações de volume. O PCM RT 27 é um material de uso comercial e fabricado pela empresa Rubitherm GmbH e suas propriedades termofísicas são mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades termofísicas do RT 27.

Fonte: Adaptado de Assis et al. (2007).

Calor Latente (kJ/kg)	179
Calor sensível sólido / líquido (kJ / kg K)	2,4 / 1,8
Condutividade térmica sólido / líquido (W / m K)	0,24/0,15
Viscosidade dinâmica (kg / m s)	$3,42 \times 10^{-3}$
Massa específica - sólido (kg / m ³)	870
Massa específica - líquido (kg / m ³)	760
Coefficiente de expansão térmica (1 / K)	$0,5 \times 10^{-3}$

A variação da massa específica entre as temperaturas do estado sólido e líquido é considerada linear. Conforme Assis et al. (2007), a variação de massa específica no estado líquido, definida para o intervalo de temperatura entre 30°C e 100°, é dada pela Eq. (4.9).

$$\rho = \rho_1[\beta(T - T_1) + 1] \quad (4.9)$$

onde $\rho_1 = 760 \text{ kg/m}^3$, T é a temperatura do PCM líquido, $T_1 = 30^\circ\text{C}$ e $\beta = 0,5 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$. A temperatura de fusão do RT 27 é de 28°C . A condição inicial do PCM é de estado sólido na temperatura de 23°C , 5°C abaixo da temperatura de fusão do RT 27. Este sub-resfriamento serve para garantir que todo o PCM esteja sólido no início da simulação.

Foram assumidas 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. Adicionalmente, é considerado que a fase líquida do PCM e o ar são fluidos Newtonianos, incompressíveis e escoamento laminar foi assumido para ambos. Conforme Assis et al. (2007), a correlação entre temperatura e a massa específica do ar utilizada foi definida através da Eq.(4.10).

$$\rho_{ar} = 1,2 \times 10^{-5} T^2 - 0,01134 T + 3,49. \quad (4.10)$$

Dos modelos existentes no Fluent para a solução de dois fluidos onde não ocorre a interpenetração entre eles, o escolhido foi o “volume de fluido” ou VOF.

4.6.1 Malha Computacional

De acordo com Maliska (2004), a aproximação numérica deve reproduzir a equação diferencial quando as dimensões da malha temporal e espacial tendem a zero. Além disto, os erros devem também tender a zero na medida em que os elementos da malha tendam a um número infinito de volumes. No entanto, um número maior de elementos da malha gera um tempo computacional maior, motivo pelo qual é necessária a escolha dos tamanhos e quantidades de elementos para que se obtenha um resultado numérico confiável com o menor tempo computacional possível.

O modelo criado é bi dimensional (2D) e a malha é do tipo hexaédrica, conforme pode ser visto na Fig. (4.3). Conforme pode ser observado, esta foi refinada junto à parede da esfera, pois é onde inicia o processo de transferência de calor e que, por isso, apresenta os maiores gradientes térmicos e fluidodinâmicos. A geometria baseia-se no artigo de Assis et al.

(2007), a qual possui uma abertura no topo da esfera para que, devido à expansão volumétrica do PCM durante a fusão, o ar possa sair livremente

Foram criadas três malhas espaciais (M1, M2 e M3), com diferentes quantidades de elementos: 4450, 5500 e 7450, respectivamente. O parâmetro escolhido para comparação das diferentes malhas foi a fração de massa líquida de PCM, obtida em diferentes tempos de fusão.

Observa-se que os efeitos da convecção do PCM líquido são mais intensos quanto maior a diferença de temperatura entre a parede da esfera e a temperatura de fusão do PCM. Escolheu-se, portanto, um $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ para realizar as simulações, por esta ser a maior diferença de temperatura utilizada. Assim, a validação da malha para o $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ terá validade para ΔT menores. A Tab. 4.2 mostra os resultados obtidos para as 3 malhas. Nela pode-se observar que, para qualquer tempo, as diferenças são pequenas entre as diferentes malhas, principalmente entre M2 e M3. Assim, optou-se por utilizar a malha M2.

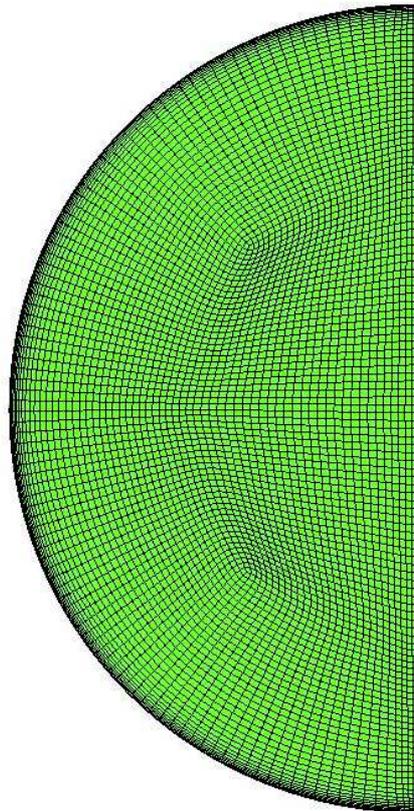


Figura 4.3- Malha computacional e região de refino junto à parede.

Tabela 4.2– Fração líquida de PCM: malhas M1, M2 e M3.

Tempo [min]	Massa líquida [%]		
	M1	M2	M3
2	19,15	19,44	19,65
8	67,26	67,66	68,09
14	92,48	92,86	92,91

Após realizar a escolha da malha computacional, pesquisou-se a influência do intervalo de tempo (Δt), tomando como parâmetro de comparação a fração líquida de PCM. Para tal, realizaram-se simulações com $\Delta t = 0,0005, 0,001$ e $0,002$ s. Pode-se observar na Tab. (4.3) que os resultados apresentam pouca variação. Assim, para realizar as simulações dos casos estudados utilizou-se $\Delta t = 0,002$ s. Mesmo assim, o tempo de processamento entre os casos estudados variou entre 6 a 32 dias ininterruptos, dependendo do diâmetro e o ΔT escolhido.

Tabela 4.3 - Fração líquida de PCM: $\Delta t = 0,0005, \Delta t = 0,001$ e $\Delta t = 0,002$

Tempo [min]	Massa líquida [%]		
	$\Delta t = 0,0005$	$\Delta t = 0,001$	$\Delta t = 0,002$
2	19,41	19,44	19,47
5	42,56	42,69	42,64
9	68,24	68,37	68,33

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este Capítulo está dividido em três partes: a primeira apresenta os resultados da validação numérica, a segunda apresenta os resultados da validação para esferas fechadas, e a terceira apresenta os resultados dos 36 casos pesquisados, analisando-se separadamente a influência do tipo de PCM escolhido, a influência da variação de temperatura imposta à parede da esfera e a influência da variação dos diâmetros das esferas.

5.1 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

A Fig. 5.1(a-f) mostram campos de fração de massa líquida e sólida durante o processo de fusão, para os tempos de 2, 5, 10, 15 20 e 25min, respectivamente. Os resultados referentes à “i” e “ii” são de Assis et al. (2007), numéricos e experimentais, respectivamente. Os resultados “iii” são referentes ao presente trabalho. Os resultados numéricos mostram a fração sólida do PCM representada pela cor azul. A região definida pela cor vermelha representa região onde há PCM líquido e ar. Já a região definida pelas cores entre o azul e o vermelho representa a *Mushy Zone*, região intermediária entre sólido e líquido. As simulações numéricas foram realizadas com o mesmo número de elementos (4530) da malha escolhida por Assis et al. (2007) e com o mesmo intervalo de tempo ($\Delta t = 0,001$ s).

Conforme visto na Seção 4.5, autores que estudaram o processo de fusão de PCM em esferas, tais como Archibold et al. (2014), Tan et al. (2009) e Hosseinizadeh et al. (2013) utilizaram diferentes valores para a constante C para que seus resultados numéricos se aproximassem mais dos resultados experimentais. Assis et al. (2007), por exemplo, consideraram $C=10^5$.

Comparando-se os resultados deste trabalho (Fig. 5.1(iii)) com os resultados numéricos de Assis et al. (2007) (Fig. 5.1(i)), percebe-se que os primeiros se assemelham mais em termos de formato aos resultados experimentais do autor citado. Para realizar os testes de validação numérica, todas as informações (geométricas, termofísicas e de controle de operação, incluindo o valor da constante C apresentadas por Assis et al. (2007) foram mantidas. No entanto, melhores resultados foram obtidos neste presente trabalho com $C = 10^4$. Isto ocorre devido à alteração da constante C , que controla a intensidade de convecção do PCM líquido durante todo o processo de fusão.

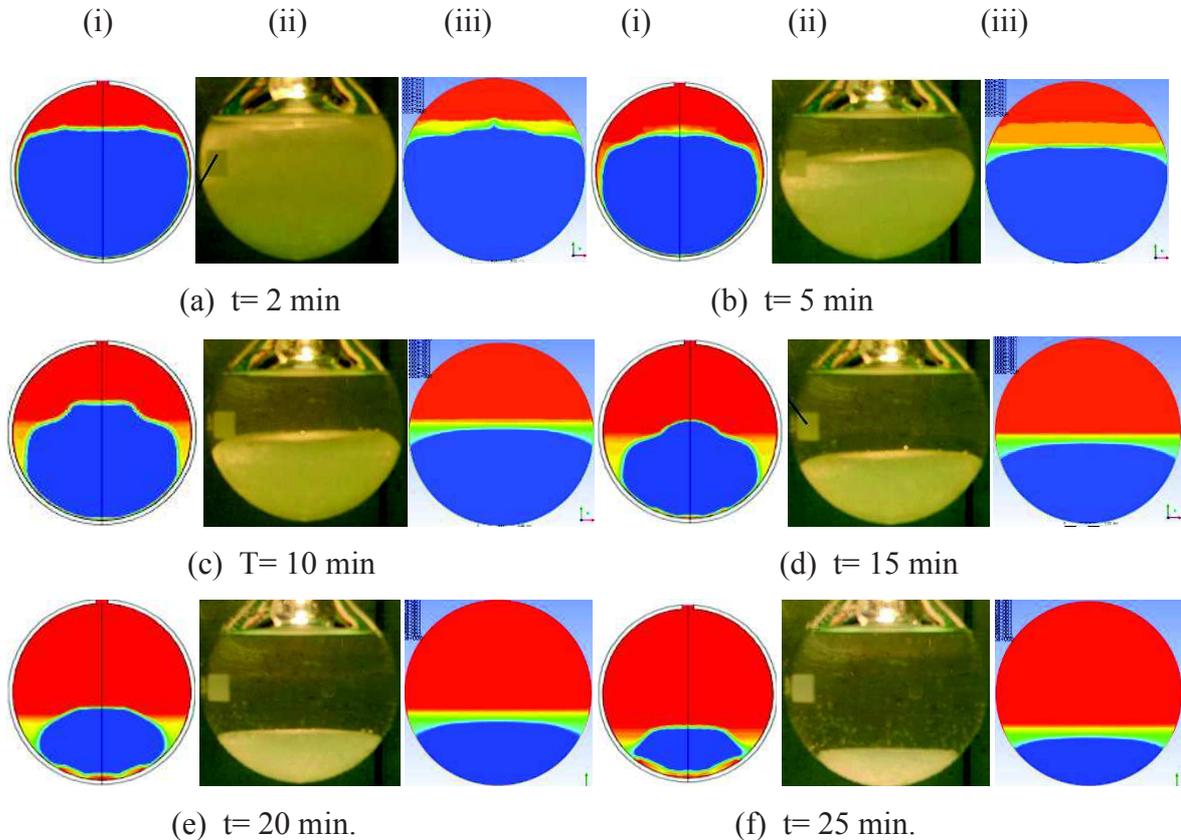


Figura 5.1 - Campos de fração de massa: (i) numérico Assis et al. (2007), (ii) experimental Assis et al. (2007) e (iii) Presente trabalho, para os tempos de: (a) 2min, (b) 5min, (c) 10min, (d) 15min, (e) 20 min e (g) 25min.

Comparando-se os resultados numéricos do presente trabalho com os resultados experimentais de Assis et al. (2007), observa-se que a região formada pelo PCM sólido (cor azul) representa de forma satisfatória o formato e a altura do PCM sólido do resultado experimental. A alteração da constante C mostrou-se ser determinante para a obtenção de resultados numéricos que reproduzam os resultados experimentais. Além disso, comparando-se os resultados numéricos (Fig. 5.1(i)) e experimentais (Fig. 5.1(ii)) de Assis et al. (2007) em diferentes tempos, percebe-se que há diferenças razoáveis entre eles, principalmente a partir de 10min, apesar do autor considerar esta comparação satisfatória.

A Fig. (5.2) apresenta resultados quantitativos da fração de líquido em função do tempo, comparando resultados deste trabalho com os resultados numéricos e experimentais de Assis et al. (2007). Também com estes resultados percebe-se a concordância entre os mesmos, principalmente em relação aos dois resultados numéricos. Desta forma, considera-se validado o modelo numérico implementado.

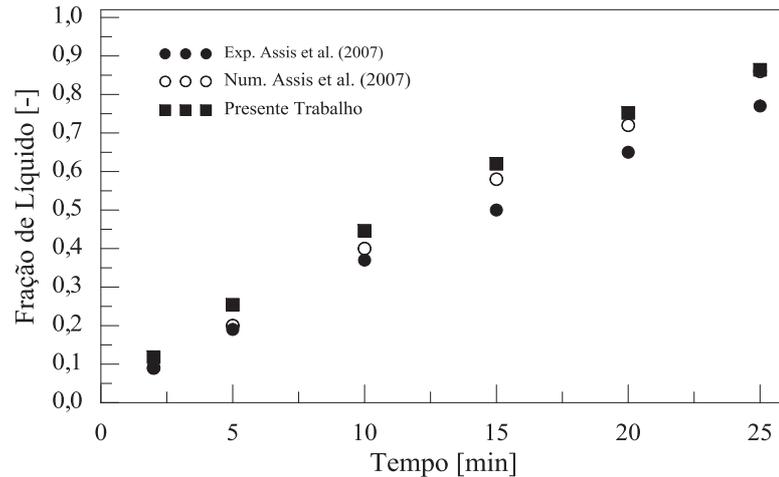


Figura 5.2– Fração líquida vs. tempo nos resultados experimentais e numéricos de Assis et al. (2007), e presente trabalho.

Em decorrência da massa específica do sólido ser maior do que a da fase líquida, durante o processo de fusão do PCM, a fase sólida desloca-se para o fundo, mantendo-se em contato com a superfície inferior da esfera. Por condução ocorre nesta região a fusão de uma fina camada de PCM. O PCM, agora na fase líquida, desloca-se, por convecção natural, junto à parede para a região superior da esfera. O movimento da parcela líquida cria recirculações de PCM líquido e do ar. Estas recirculações fazem com que ocorra um arredondamento da parte sólida do PCM junto à parede. Na Fig. (5.3) se percebe os vetores de velocidade na região de arredondamento do PCM sólido e da camada de PCM liquefeita junto ao fundo da esfera.

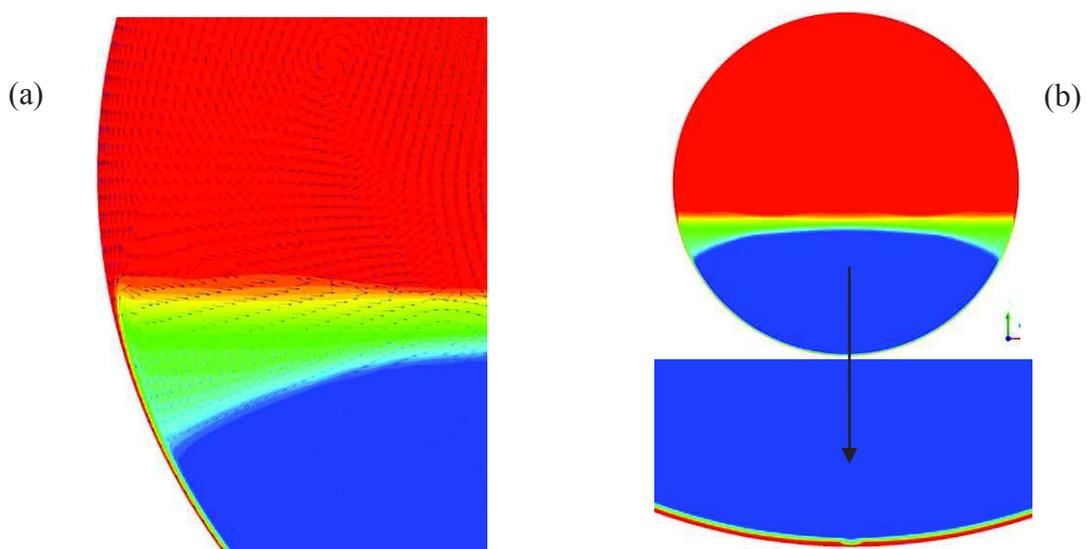


Figura 5.3 - (a) Campo de vetores de velocidade da validação numérica e (b) campo de PCM líquido junto ao fundo da esfera.

5.2 INFLUÊNCIA DA ABERTURA DAS ESFERAS

Os resultados apresentados na Seção 5.1 foram obtidos com uma esfera aberta para o ambiente, na condição de validação numérica. No uso prático destas esferas, em reservatórios térmicos, por exemplo, não há esta abertura. Com as esferas fechadas, sem abertura para o ambiente, ocorre um aumento da pressão interna devido à expansão volumétrica do PCM líquido. Para verificar a influência da variação de pressão com a condição de esfera fechada, realizou-se a simulação do mesmo caso apresentado por Assis et al. (2007), porém, com a esfera completamente fechada. Resultados de fração líquida são comparados com aqueles obtidos nas mesmas condições com esfera aberta, os quais são mostrados na Fig. (5.4). Observa-se que, independentemente do tempo decorrido, praticamente não existem diferenças nos resultados dos campos de fração líquida.

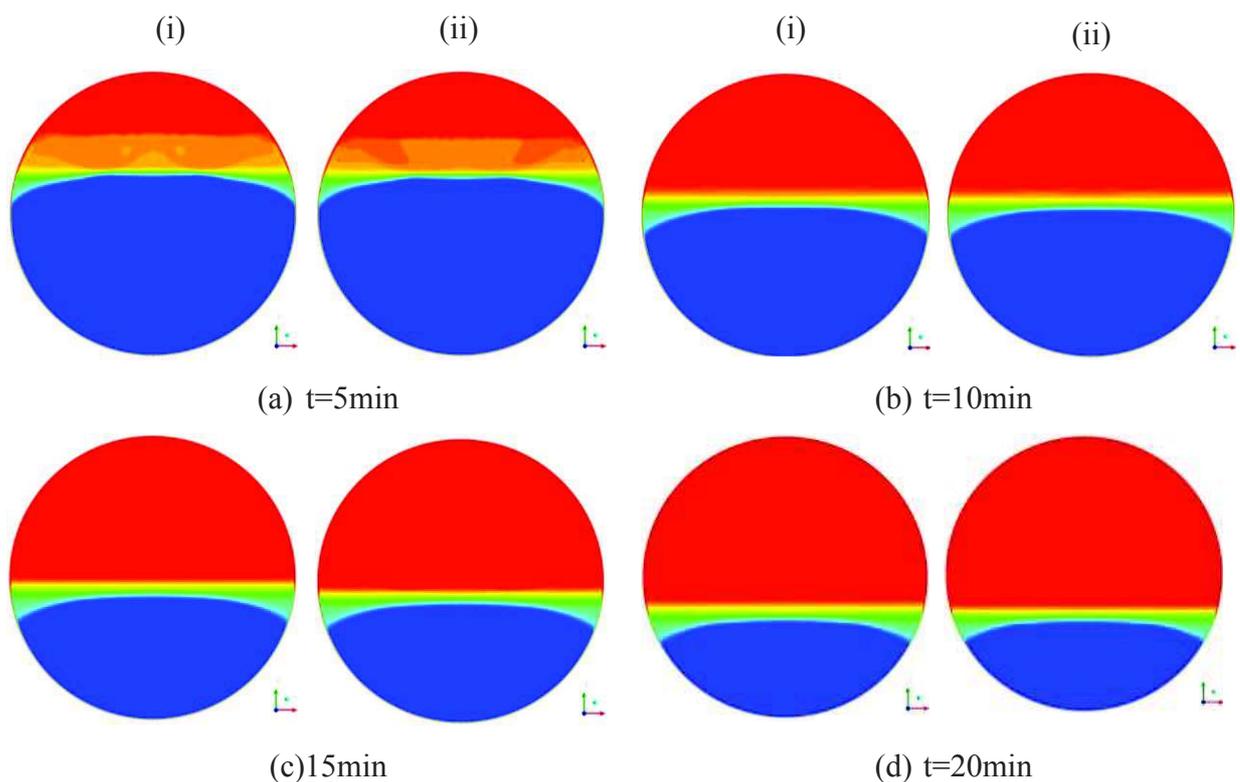


Figura 5.4 - Campos de fração líquida para esferas abertas (i) e esferas fechadas (ii): (a) 5 min., (b) 10 min., (c) 15 min. e (d) 20 min.

A Fig. (5.5) apresenta os resultados de fração líquida para esferas abertas e fechadas de forma quantitativa. Como pode ser observado, não há diferenças significativas nos resultados, mas observa-se que há um leve aumento da fração líquida ao longo do tempo para esferas fechadas.

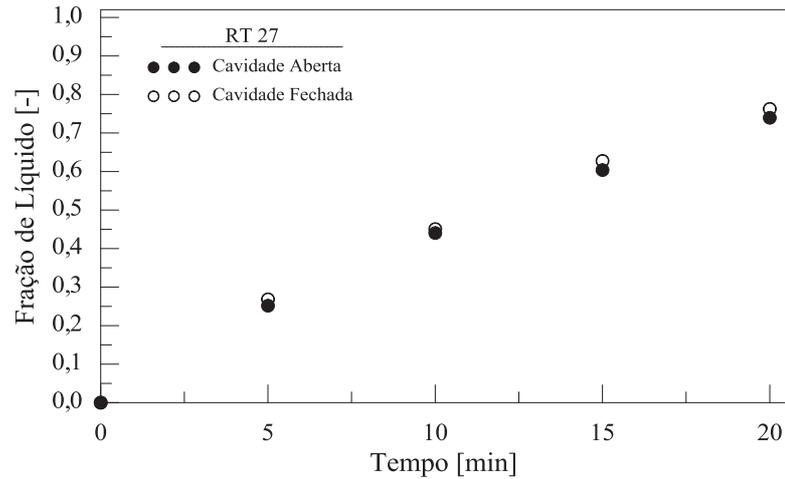


Figura 5.5 - Fração líquida vs. tempo: cavernas abertas e fechadas.

Pesquisou-se o comportamento da pressão interna em esferas abertas e fechadas. Para isto, tomou-se como base o tempo de 900 s. O campo de pressão é semelhante em ambos os casos. Porém, os valores indicam na esfera fechada um aumento da pressão, conforme o esperado, devido ao aumento do volume do PCM na fase líquida e conseqüente compressão da camada de ar. Entretanto, estes valores não sofrem alterações significativas a ponto de interferir nos resultados do tempo de fusão do PCM. Os resultados da pressão interna estão apresentados na Fig. (5.6).

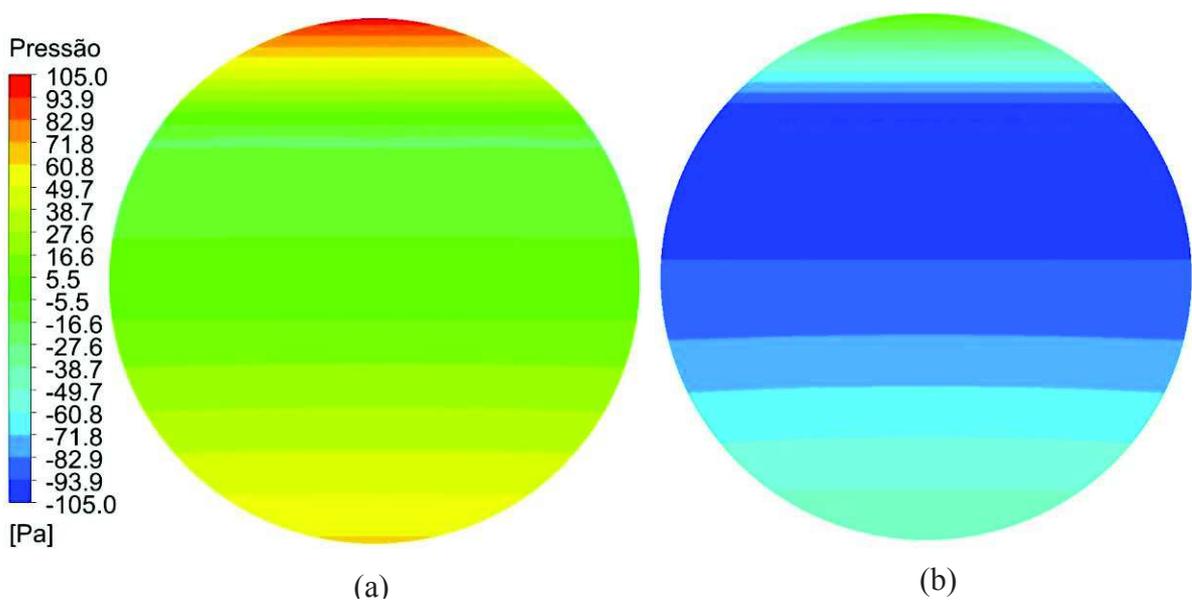


Figura 5.6 – Campos de pressão: (a) esfera fechada e (b) esfera aberta.

A Fig. (5.7) apresenta os vetores de velocidade sobrepostos aos campos de fração de massa para os dois tipos de esfera, abertas e fechadas, no tempo de 900 s. Percebe-se que os vetores de velocidade possuem comportamentos semelhantes, evidenciando regiões de recirculação tanto para o PCM líquido como para o ar. Não se evidencia alterações importantes tanto em termos de módulo como em termos de sentido dos vetores de velocidade, justificando-se mais uma vez que o comportamento da fusão de PCM em esferas abertas e fechadas não apresenta alterações importantes, mesmo que os valores de pressão e velocidade sejam maiores nas esferas fechadas. Em destaque, pode-se observar os vetores de velocidade mostrando as regiões de recirculação de ar e PCM.

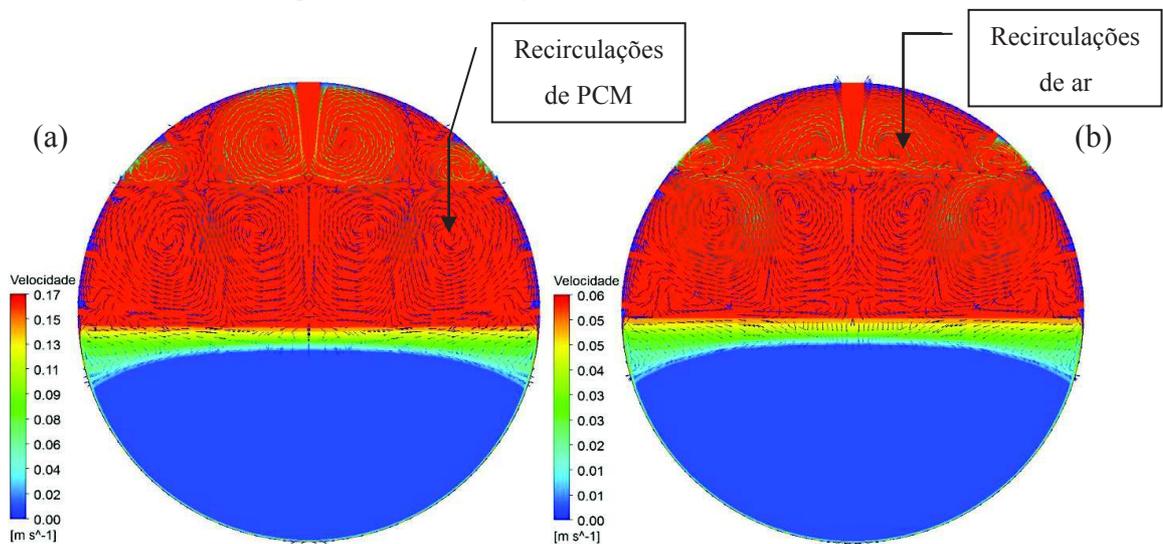


Figura 5.7 - Campos de velocidade sobrepostos a campos de fração de líquida para: (a) esfera fechada e (b) esfera aberta.

5.3 RESULTADOS DOS CASOS ESTUDADOS

Nesta Seção é apresentado e analisado o comportamento da fração líquida de PCM e do fluxo de calor para 3 situações: a alteração do tipo de PCM, a alteração da diferença de temperatura entre a parede a o ponto de fusão do PCM (ΔT) e a alteração do diâmetro das esferas.

5.3.1 Influência do tipo de PCM

A Fig. 5.8(a-c) mostra a variação da fração líquida (γ) ao longo do tempo para $D=40$ mm, RT 35, RT 55, RT 82 e $\Delta T=10, 20$ e 30 °C, respectivamente. Com relação à γ ,

observa-se que os resultados para todos os tipos de PCM, são praticamente iguais. No entanto, observa-se que o tempo necessário para obter-se a fusão completa varia significativamente em função do ΔT . Para $D = 60, 80$ e 100 mm, os mesmos comportamentos foram verificados em termos de tipos e PCM e tempo de fusão.

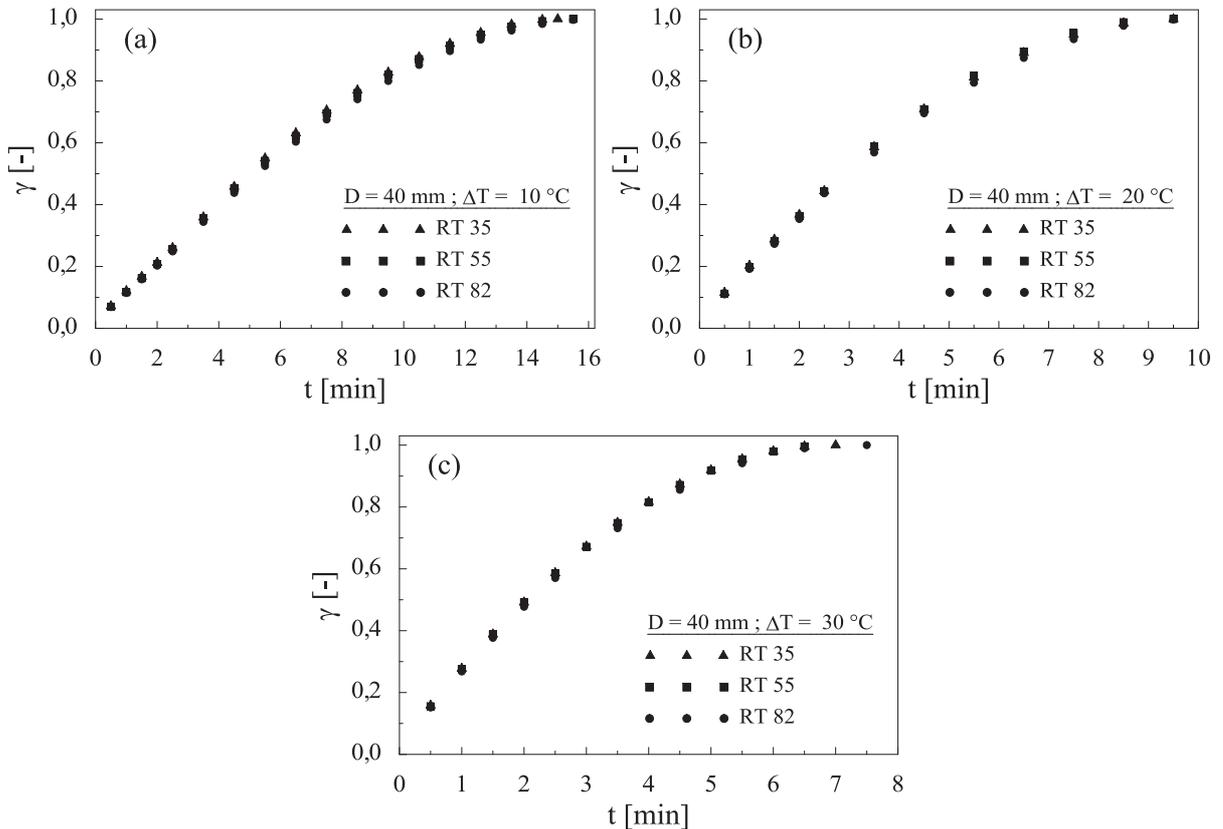


Figura 5.8– Fração líquida vs. tempo para $D= 40$ mm, RT 35, 55 e 82: (a) $\Delta T=10^\circ\text{C}$; (b) $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e (c) $\Delta T=30^\circ\text{C}$.

A Fig. 5.9(a-d) apresenta a variação de γ ao longo do tempo para $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, RT 35, RT 55 e RT 82, e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, respectivamente. Observa-se que, quanto maior D , maior é o tempo necessário para atingir a fusão completa, confirmando o que se espera inicialmente. No entanto, para os mesmos D e ΔT , a variação de γ em função do tempo é independente do tipo de PCM, apresentando diferença máxima de 3,71 % entre si ao longo do tempo. Esta concordância é justificada pelo fato de que as diferenças de propriedades térmicas dos PCM são pequenas, conforme demonstrado na Tab. (3.1). A diferença máxima entre os PCM estudados foi de 3,41% para a capacidade de armazenamento térmico e de 2,27% para a massa específica da fase sólida.

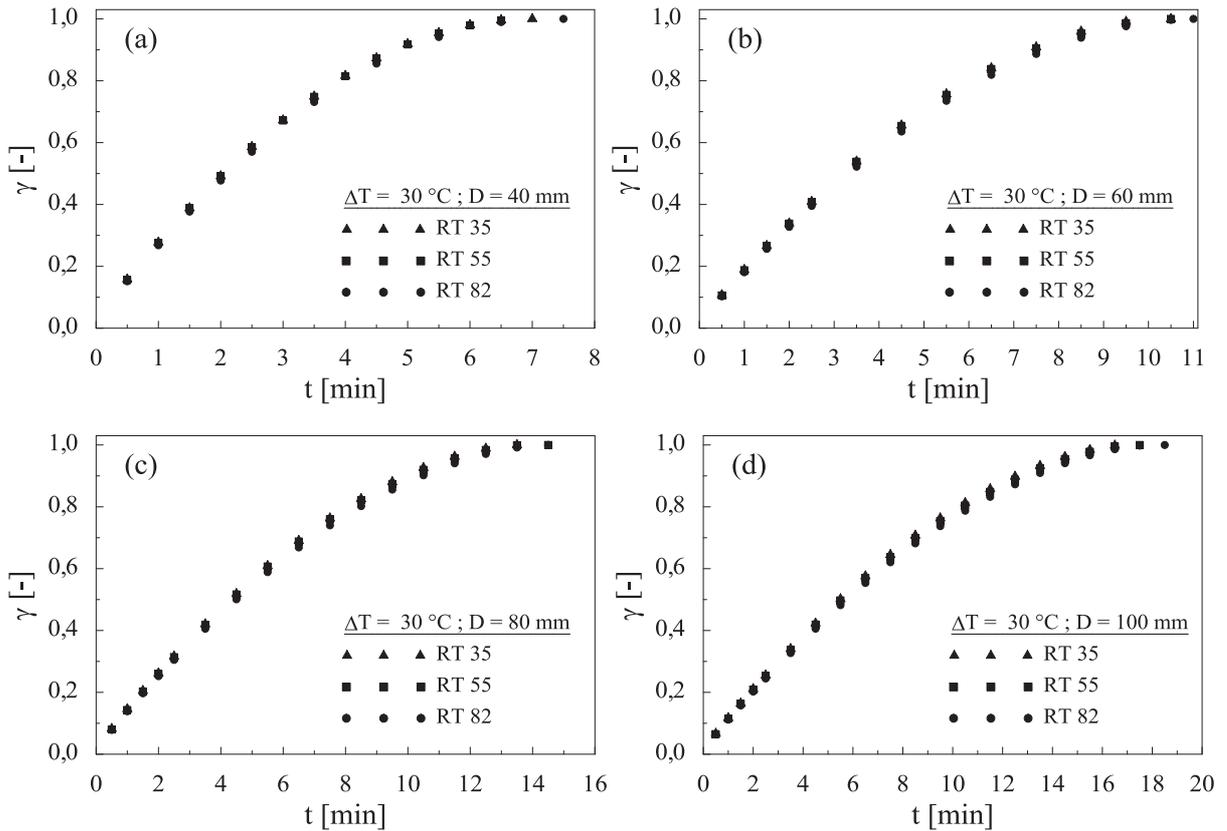


Figura 5.9– Fração líquida vs. tempo para $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, RT 35, 55 e 82: (a) $D=40$ mm; (b) $D=60$ mm, (c) $D=80$ mm e (d) $D=100$ mm.

A Fig. 5.10(a-c) apresenta a média do fluxo de calor na parede da esfera, ao longo do tempo, para $D = 80$ mm, PCM RT 35, RT 55 e RT 82 e $\Delta T = 10, 20$ e 30°C , respectivamente. Nestas figuras pode-se observar que, inicialmente, a transferência de calor é intensa e apresenta um decaimento muito rápido, independentemente do ΔT . Isto ocorre porque, nos instantes iniciais, o calor flui através da parede da esfera por condução pura. Percebe-se que, no momento em que o fluxo de calor ultrapassa a parede e encontra-se com o PCM em estado sólido, o calor transferido inicia o processo de fusão do PCM, e a transferência de calor passa a ser uma combinação de condução e convecção natural. Após estes instantes iniciais, o fluxo de calor passa a ocorrer de forma menos intensa. Além disso, observa-se que, para um mesmo ΔT , o fluxo de calor é independente do tipo de PCM. Entretanto, o tempo necessário para o fluxo de calor atingir o valor mínimo é inversamente proporcional ao ΔT utilizado.

Autores como Assis et al. (2007), Hosseinizadeh et al. (2013) e Archibold et al. (2014) observaram em suas pesquisas os mesmos fenômenos que os observados no presente trabalho em relação ao decaimento rápido do fluxo de calor por condução pura nos instantes iniciais e o decaimento mais lento quando ocorrem processos combinados de condução e convecção natural.

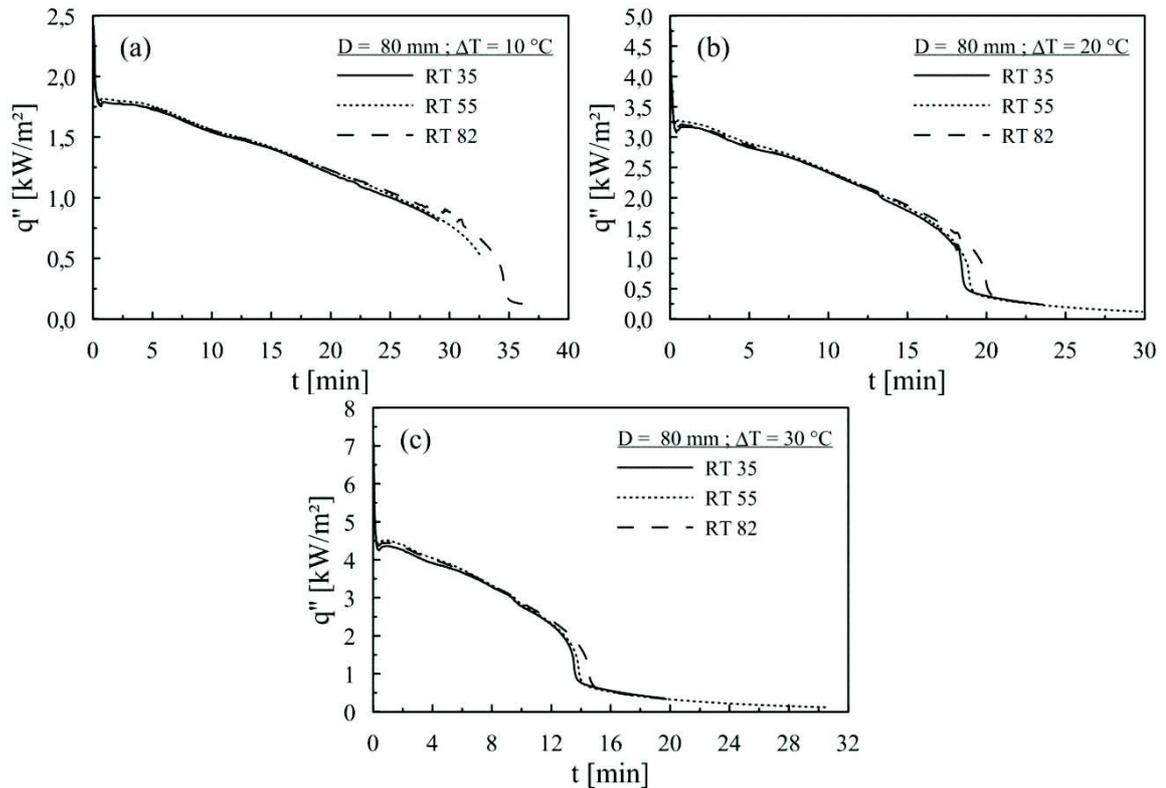


Figura 5.10 – Fluxo de calor vs. tempo para $D = 80$ mm, RT 35, 55 e 82: (a) $\Delta T = 10^\circ\text{C}$; (b) $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ e (c) $\Delta T = 30^\circ\text{C}$.

5.3.2 Influência da diferença de temperatura entre a parede da esfera e a temperatura de fusão do PCM (ΔT)

A Fig. 5.11(a-c) mostram os resultados de γ ao longo do tempo para $D = 100$ mm, com $\Delta T = 10, 20$ e 30°C , para os PCM RT 35, RT 55 e RT 82, respectivamente. Percebe-se que a variação de γ é independente do tipo de PCM. No entanto, observa-se que, para o mesmo diâmetro ($D = 100$ mm), o tempo necessário para obter-se determinada γ é maior para $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ e menor para $\Delta T = 30^\circ\text{C}$.

Na Fig. 5.12(a-d) apresentam-se os resultados de γ ao longo do tempo do PCM RT 35, para $D = 40, 60, 80$ e 100 mm e $\Delta T = 10, 20$ e 30°C , respectivamente. Observa-se que o maior tempo de fusão ocorre para $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, e este tempo diminui à medida que o ΔT é aumentado para 20 e 30°C . Este comportamento é mesmo para os PCM RT 55 e RT 82. O aumento do ΔT faz com que o fluxo de calor da parede para o interior da esfera seja maior e, assim, haja uma fusão mais rápida do PCM sólido.

Para o PCM RT 35, $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, $\Delta T = 10, 20$ e 30°C , o tempo necessário para atingir γ de 80% está apresentado na Tab. (5.1). O aumento do ΔT de 10°C para 20°C

reduz o tempo de fusão em média 40,2%, ao passo que o aumento do ΔT de 20°C para 30°C reduz o tempo de fusão em média 27,6%. Nota-se que o aumento do ΔT não reduz da mesma proporção o tempo de fusão, e a tendência é de que aumentos maiores de ΔT , apesar de diminuírem o tempo de fusão apresentem resultados proporcionais de redução cada vez menores. Estas mesmas observações podem ser feitas na Fig. (5.12) em relação à diminuição do tempo de fusão, onde a alteração do ΔT para todos os casos analisados mostram uma diminuição maior para ΔT maiores.

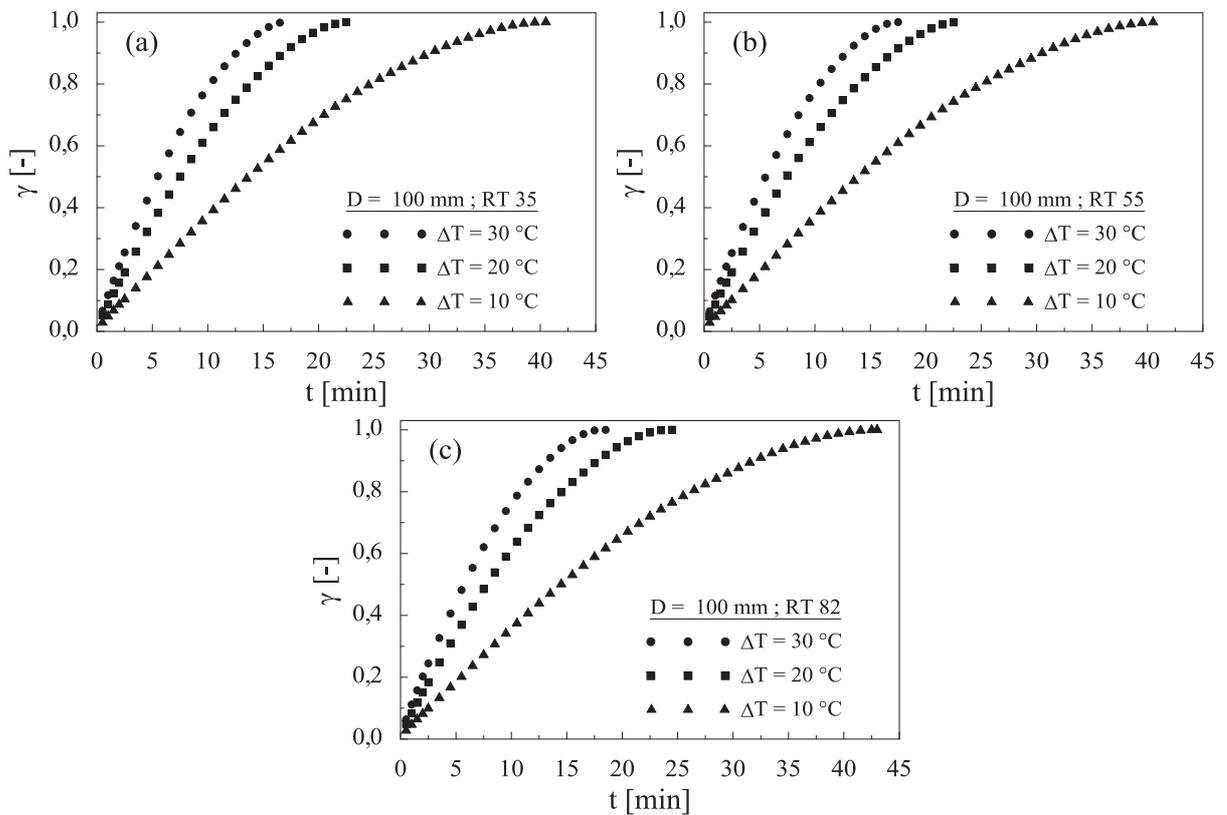


Figura 5.11 - Fração líquida vs. tempo para $D= 100$ mm, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$: (a) RT 35; (b) RT 55 e (c) RT 82.

Tabela 5.1- Sumário dos tempos de fusão para $\gamma = 0,8$.

D (mm)	Tempo (min)			Redução percentual do tempo		
	ΔT 10°C	ΔT 20°C	ΔT 30°C	ΔT 10→ ΔT 20(°C)	ΔT 20→ ΔT 30 (°C)	ΔT 10→ ΔT 30 (°C)
40	8,0	5,2	3,7	35,0	28,8	53,7
60	13,2	8,1	5,7	38,6	29,6	56,8
80	18,8	10,8	7,9	42,5	26,8	58,0
100	23,8	13,2	9,9	44,5	25,0	58,4

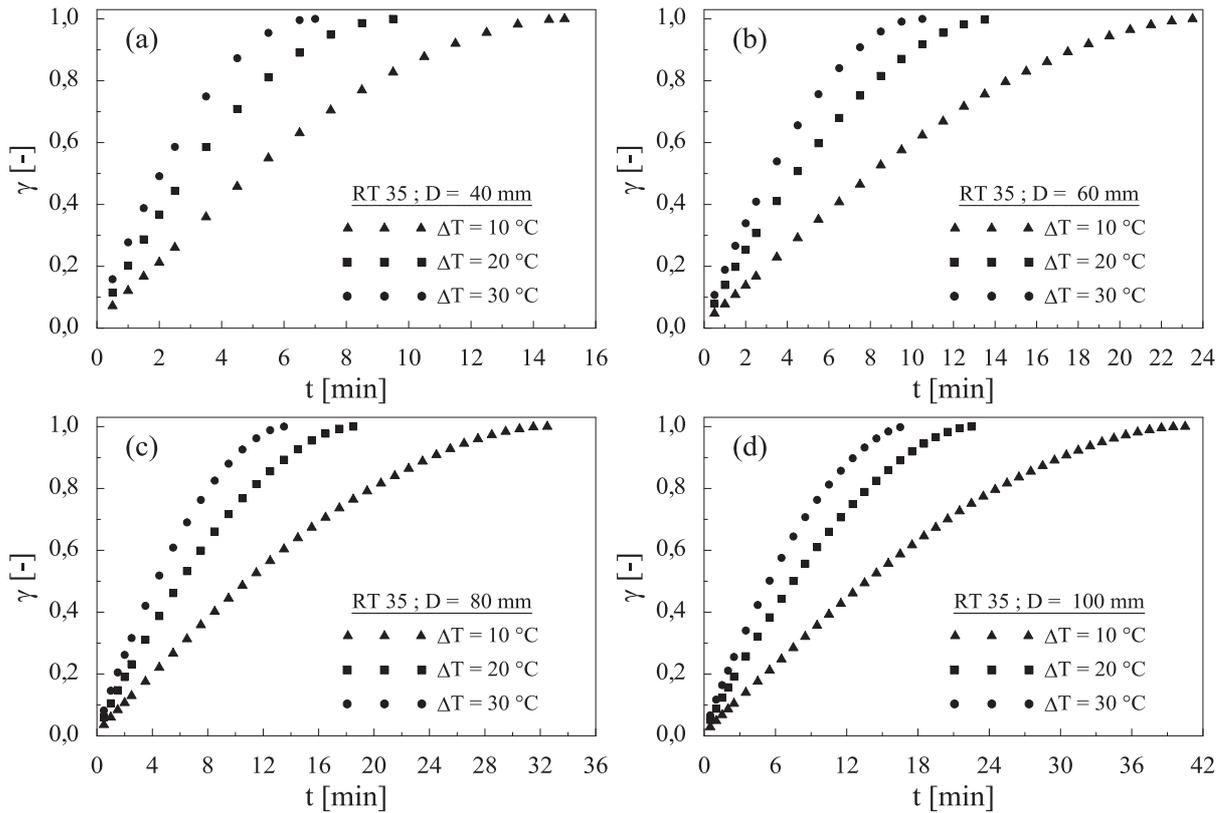


Figura 5.12— Fração líquida vs. tempo para RT 35, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$: (a) $D=40$ mm; (b) $D=60$ mm, (c) $D=80$ mm e (d) $D=100$ mm.

Para os casos de ΔT estudados no presente trabalho, o ΔT de 20°C apresentou a maior redução percentual nos tempos de fusão do PCM. Este ΔT de 20°C tem validade para todos os diâmetros e para todos os PCM que foram pesquisados. Entretanto, se o tempo de fusão (ou carga) é um fator importante para o sistema de armazenamento térmico considerado, um maior ΔT apresentará o menor tempo de carga do sistema.

Na Fig. 5.13(a-d) são apresentados resultados do fluxo de calor médio na parede da esfera ao longo do tempo, para o PCM RT 82, $\Delta T = 10, 20$ e 30°C e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, respectivamente. Observa-se que, em todos os casos apresentados nestas figuras, o aumento do ΔT provoca um aumento do fluxo de calor. Para mesmos ΔT , se percebe, nos instantes iniciais, praticamente os mesmos valores do fluxo de calor, independente de D . Com o aumento do ΔT , observa-se a diminuição do tempo necessário para que o fluxo de calor atinja seu valor mínimo para a fusão total do PCM.

A Tab. (5.2) apresenta o fluxo de calor em função de ΔT , para o RT 82, $t = 240$ s, $D = 40, 60, 80$ e 100 mm. Conforme já comentado, o aumento do ΔT provoca um aumento do fluxo de calor para todos D . Entretanto, após os instantes iniciais, nota-se para $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, uma leve tendência de diminuição do fluxo de calor com o aumento de D , ao mesmo tempo em que, para um $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ nota-se uma leve tendência de aumento do fluxo para um aumento de

D. Importante observar que o maior aumento percentual do fluxo de calor é obtido quando temos o maior D e o maior ΔT . Os demais PCM estudados seguem o mesmo comportamento. Assim, a combinação do maior ΔT com o maior D analisado é a condição de obter os maiores fluxos de calor. Com isso obtém-se maior quantidade de PCM fundido em um menor espaço de tempo. Assim, para sistemas térmicos que necessitem absorver uma maior quantidade de energia em menor tempo, indica-se o uso do maior ΔT combinado com o maior diâmetro de esfera.

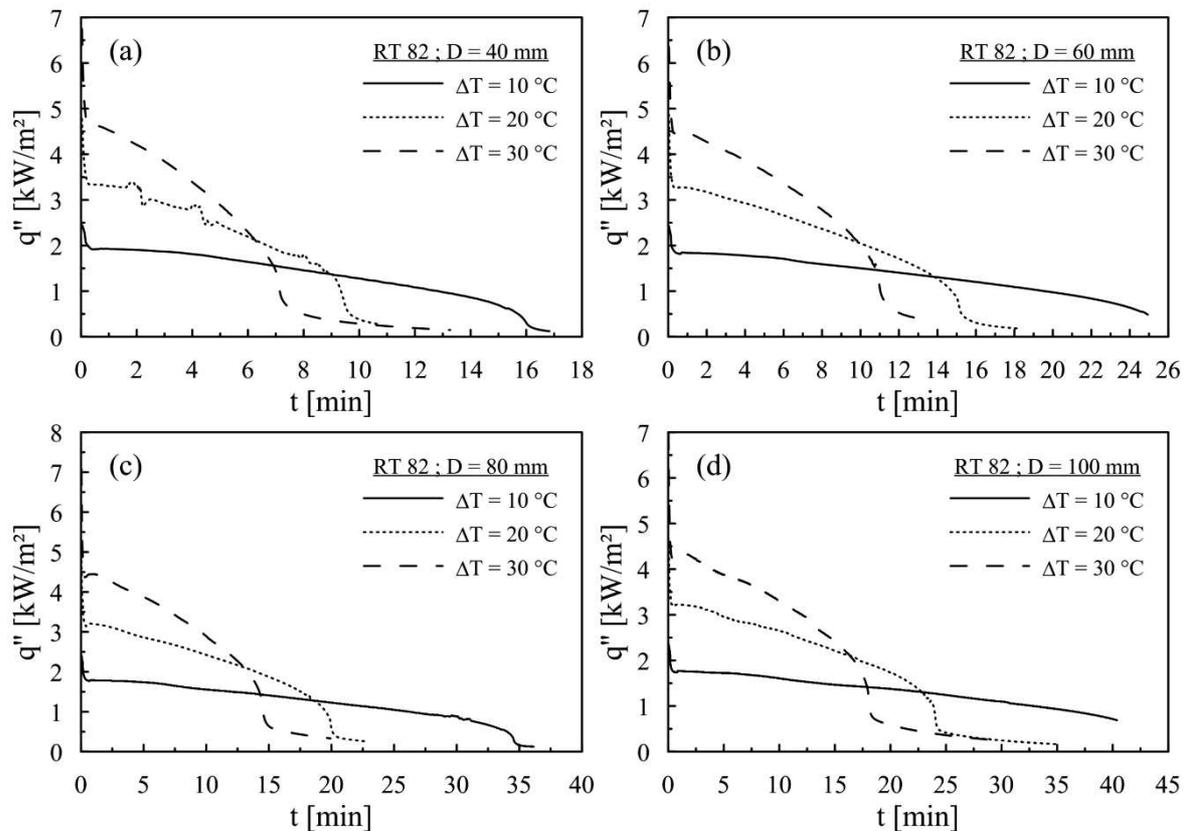


Figura 5.13 — Fluxo de calor vs. tempo para RT 82, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$: (a) $D=40$ mm; (b) $D=60$ mm, (c) $D=80$ mm e (d) $D=100$ mm.

Tabela 5.2 – Sumário do fluxo de calor para $t = 240$ s.

D (mm)	Fluxo de calor (W/m^2)			Incremento do fluxo (%)		
	$\Delta T=10^{\circ}\text{C}$	$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$	$\Delta T=30^{\circ}\text{C}$	$\Delta T=10 \rightarrow \Delta T=20 (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T=20 \rightarrow \Delta T=30 (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T=10 \rightarrow \Delta T=30 (^{\circ}\text{C})$
40	1.811	2.880	3.390	59,0	17,7	87,2
60	1.780	2.925	3.871	64,3	32,3	117,5
80	1.757	2.954	4.010	68,1	35,7	128,2
100	1.731	3.069	4.001	77,3	30,3	131,1

5.3.3 Influência do diâmetro das esferas

A Fig. 5.14(a-c) apresentam os resultados de γ ao longo do tempo para o PCM RT 55, $D = 40, 60, 80$ e 100 mm e $\Delta T = 10, 20$ e 30°C , respectivamente. Nota-se que, independentemente do ΔT , quanto menor o D , menor é o tempo necessário para atingir o mesmo γ . Da mesma forma, quanto maior o ΔT , menor é o tempo necessário para atingir o mesmo γ . Os tempos necessários para atingir fração líquida de 0,8 são apresentados na Tab. (5.3).

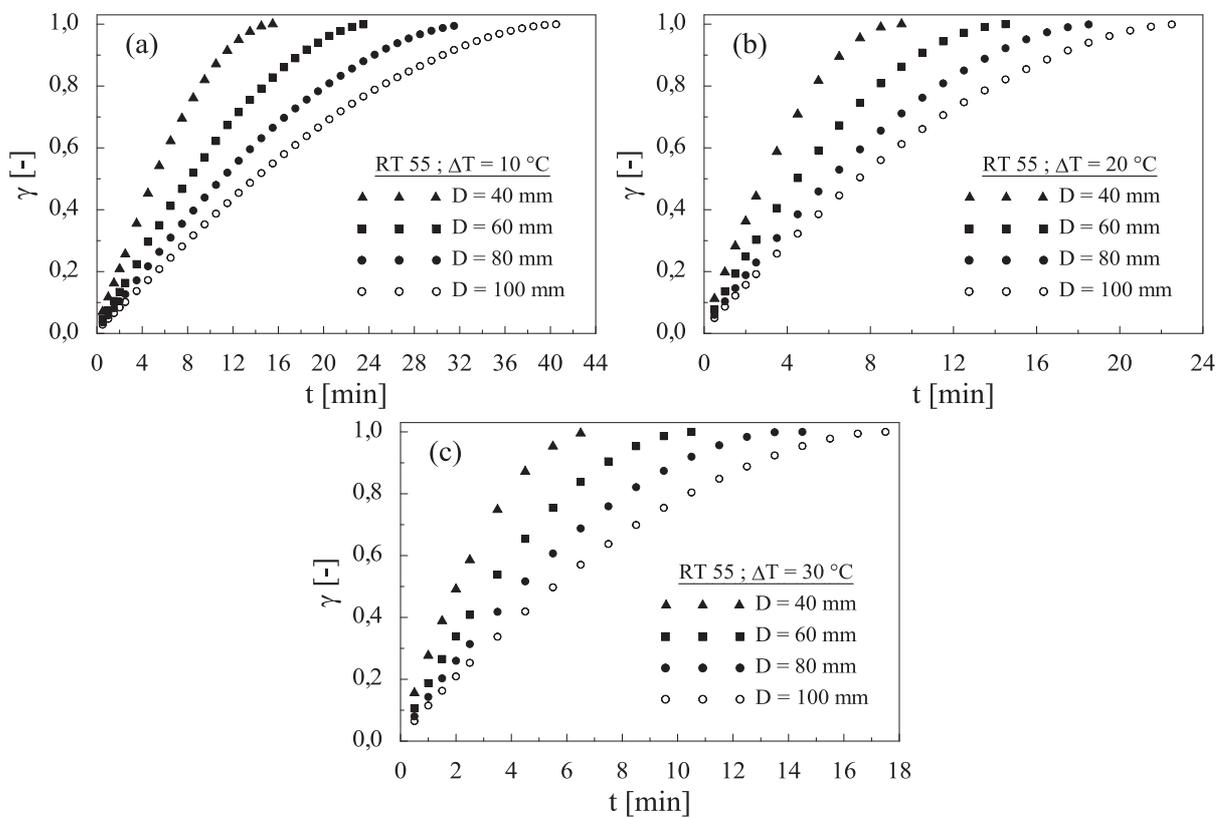


Figura 5.14 – Fração líquida vs tempo, para PCM RT 55, $D = 40, 60, 80$ e 100 mm: (a) $\Delta T=10^\circ\text{C}$, (b) $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e (c) $\Delta T=30^\circ\text{C}$.

Tabela 5.3 – Tempo, razão entre tempos e razão entre L_c para $D = 40, 60, 80$ e 100 mm e $\gamma = 0,8$.

ΔT ($^\circ\text{C}$)	t [min]				Razão entre tempos			Razão entre L_c		
	$D=40$ mm	$D=60$ mm	$D=80$ mm	$D=100$ mm	$t_{(D=60)}/$ $t_{(D=40)}$	$t_{(D=80)}/$ $t_{(D=60)}$	$t_{(D=100)}/$ $t_{(D=80)}$	$L_{c(D=60)}/$ $L_{c(D=40)}$	$L_{c(D=80)}/$ $L_{c(D=60)}$	$L_{c(D=100)}/$ $L_{c(D=80)}$
10	8,0	13,2	18,8	23,8	1,65	1,42	1,26	1,5	1,33	1,25
20	5,2	8,1	10,8	13,2	1,55	1,33	1,22	1,5	1,33	1,25
30	3,7	5,7	7,9	9,9	1,54	1,38	1,25	1,5	1,33	1,25

Tomando como referência o tempo necessário para a esfera com $D = 40$ mm atingir $\gamma = 0,8$, pode-se calcular a razão entre os tempos para cada diâmetro de esfera e para cada ΔT considerado. Os resultados destas razões estão também apresentados na Tab. (5.3), onde se pode observar que a razão de aumento entre os tempos possuem valores próximos para todos os ΔT . Outro detalhe observado é que à medida que são considerados na análise esferas de maior diâmetro, a razão entre os tempos diminui.

A razão entre tempos necessários para atingir uma determinada fração de líquido está relacionada com o comprimento característico (L_c) da esfera, o qual relaciona o volume ($V = 4\pi r^3/3$) com a área superficial da esfera ($A_{sup} = 4\pi r^2$), sendo r o raio da esfera. Assim, L_c da esfera é $r/3$. Calculando-se a razão entre L_c para $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, verifica-se que esta razão é muito próxima as razões entre os tempos, considerando os mesmos D . Assim, conhecendo-se o tempo necessário para uma esfera D atingir uma determinada fração líquida, independente do ΔT , é possível prever com razoável certeza o tempo necessário para outras esferas atingirem a mesma fração, desde que conhecida a razão entre os L_c destas esferas.

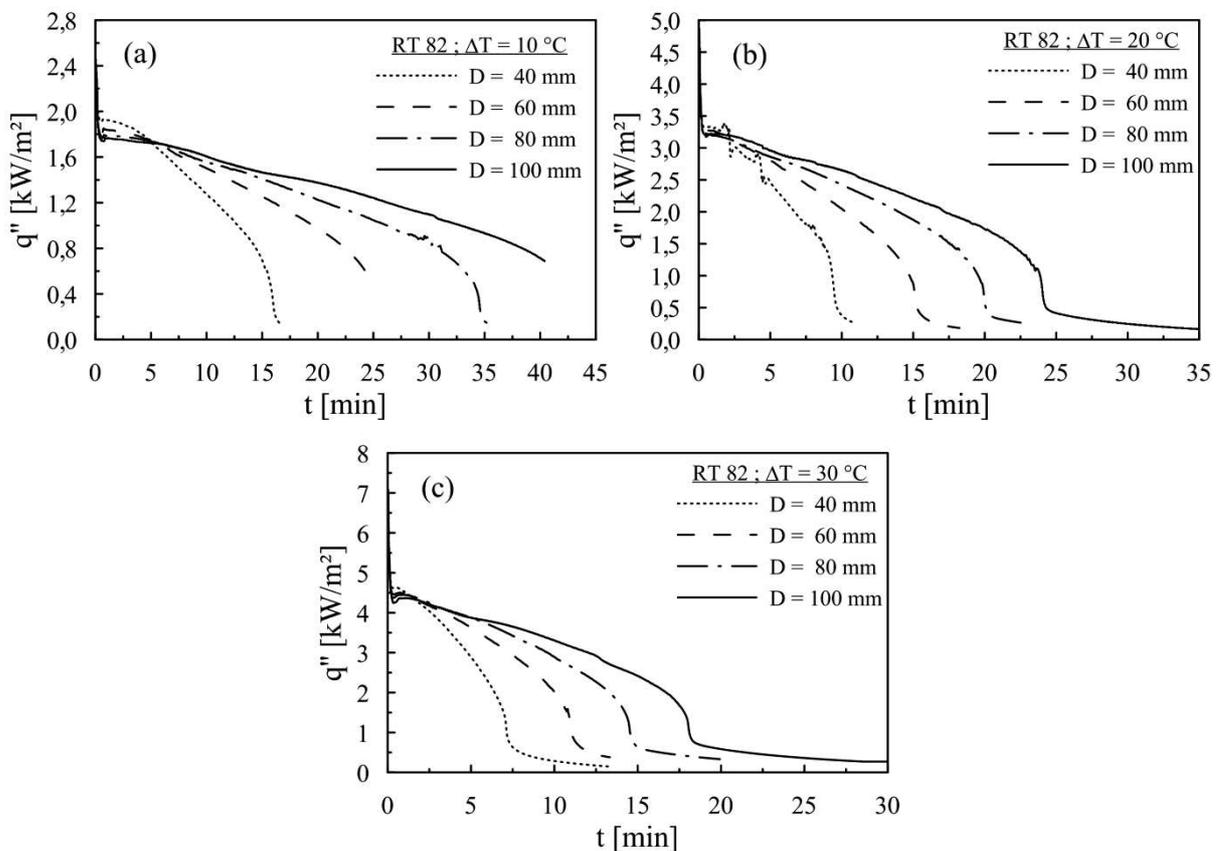


Figura 5.15 - Fluxo de calor vs. tempo para RT 82, $D=40, 60, 80$ e $D=100$ mm: (a) $\Delta T=10^\circ\text{C}$; (b) $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e (c) $\Delta T=30^\circ\text{C}$.

A Fig. 5.15(a-c) apresenta o resultado do fluxo de calor ao longo do tempo para o PCM RT 82, $D = 40, 60, 80$ e 100 mm e $\Delta T = 10, 20$ e 30°C , respectivamente. Observa-se que, à medida que se aumenta o ΔT , diminui-se o tempo necessário para ocorrer à fusão total do PCM em todos os D considerados. Da mesma forma, para um mesmo ΔT , o aumento do D faz com que os tempos de fusão também aumentem. Este mesmo comportamento para o fluxo de calor foi observado nos PCM RT 35 e RT 55.

A Tab. (5.4) apresenta os valores de fluxo de calor para o RT 82, $\Delta T=10, 20$ e 30°C e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, para $t = 300$ e 600 s. Ao analisar estes resultados verifica-se que, para $t = 300$ s e $\Delta T=10^\circ\text{C}$, o maior fluxo de calor é para $D=60$ mm (1.748 W/m^2) e o menor para $D=100$ mm (1.723 W/m^2). Para o $\Delta T=20^\circ\text{C}$, o maior fluxo é para $D=100$ mm (2.959 W/m^2) e o menor para $D=40$ mm (2.463 W/m^2), e para um $\Delta T=30^\circ\text{C}$, o maior fluxo é para $D=100$ mm (3.877 W/m^2) e o menor para $D=40$ mm (2.886 W/m^2). Tomando como base o menor fluxo, a maior variação percentual entre os valores máximos e mínimos para cada ΔT é de 1,5%, 20,11% e 34,34%, respectivamente. Pode-se dizer que, para $t = 300$ s, um $\Delta T=10^\circ\text{C}$ não apresenta variações significativas para o fluxo de calor variando-se D , ao passo que, aumentando-se ΔT para 20°C e 30°C apresenta maiores variações para maiores D . Para $t = 600$ s, $\Delta T=10^\circ\text{C}$, $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e $\Delta T=30^\circ\text{C}$ as variações são de 25,5%, 598,27%, e 1.055,51%.

O fluxo de calor para $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ é o que apresenta os menores valores iniciais e o que apresentam as menores taxas de decaimento em função de D . O aumento de ΔT para 20 e 30°C aumenta o fluxo de calor inicial e provoca maiores taxas de decaimento também em todos D . Para um mesmo ΔT , o aumento de D faz com que o fluxo de calor diminua mais lentamente ao longo do tempo e, assim, consiga-se manter fluxos de calor mais elevados quanto maior o D da esfera. A combinação de maiores D com maiores ΔT é onde se consegue manter os maiores fluxos de calor ao longo do tempo.

Tabela 5.4 – Sumário para fluxo de calor.

ΔT ($^\circ\text{C}$)	Fluxo de calor (W/m^2) em $t = 300$ s.				Fluxo de calor (W/m^2) em $t = 600$ s.			
	$D=40$ mm	$D=60$ mm	$D=80$ mm	$D=100$ mm	$D=40$ mm	$D=60$ mm	$D=80$ mm	$D=100$ mm
10	1.731	1.749	1.737	1.723	1.278	1.501	1.556	1.604
20	2.463	2.805	2.858	2.959	379	2.047	2.424	2.650
30	2.886	3.631	3.876	3.877	286	2.019	2.895	3.309

6 ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional é um método de reduzir o número de variáveis de um problema para um conjunto menor de variáveis, as quais não possuem dimensão física. Os números puros obtidos desta redução são chamados assim de números adimensionais. Números adimensionais, portanto, são números desprovidos de unidades, normalmente obtidos pelo produto ou quociente de determinadas quantidades que se cancelam. Estes números adimensionais normalmente são utilizados para relacionar propriedades de um sistema. Nesta seção são apresentados números adimensionais de Nusselt, Grashof, Prandtl, Stefan e Fourier, correlações da fração líquida proposta por Assis et al. (2007), Hosseinizadeh et al. (2013) e Archibold et al. (2014) e a correlação da fração líquida proposta por este trabalho. As equações para os números adimensionais foram obtidos de Çengel e Ghajar (2012) e Bejan (1996).

6.1.1 Adimensionais

A adimensionalização do coeficiente de transferência de calor utiliza o número de Nusselt, que é definido como:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (6.1)$$

onde L_c é o comprimento característico. O número de Nusselt é visto como o coeficiente adimensional de transferência de calor por convecção. Ele é a razão entre o fluxo de calor por convecção pelo fluxo de calor por condução, conforme mostrado na Eq. (6.2).

$$\frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h\Delta T}{\frac{k\Delta T}{L_c}} = \frac{hL_c}{k} = Nu \quad (6.2)$$

O regime de escoamento em convecção natural é definido pelo número de Grashof, Eq. (6.3), o qual representa a razão entre as forças de empuxo e as forças viscosas que agem sobre o fluido.

$$Gr = \frac{g\beta(T - T_{\infty})L_c^3}{\nu^2} \quad (6.3)$$

onde β é o coeficiente de expansão volumétrica e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

O número de Prandtl é a relação entre a difusividade de movimento e a difusividade térmica, sendo representado conforme mostra a Eq. (6.4).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (6.4)$$

onde α é a difusividade térmica e c_p é o calor específico.

O número de Stefan (Ste) é definido como a razão entre o calor sensível e o calor latente de determinado material. Este é definido conforme indica a Eq. (6.5).

$$Ste = \frac{c_p}{L} \Delta T \quad (6.5)$$

O número de Fourier, também chamado de tempo adimensional, é definido como a razão entre a taxa de condução de calor e a taxa de armazenamento de energia térmica em regimes transientes. O número de Fourier é definido conforme mostra a Eq. (6.6).

$$Fo = \frac{\alpha t}{r^2} = \frac{kt}{\rho c_p r^2} \quad (6.6)$$

onde r é o raio da esfera.

6.1.2 Correlação para a fração líquida

Correlações são comumente usadas em engenharia a fim de facilitar o encontro de soluções, cujos resultados somente seriam possíveis por outros meios bem mais demorados e, conseqüentemente, mais onerosos. Busca-se assim condensar resultados de trabalhos experimentais e numéricos através de uma ou mais equações, no qual apresentem resultados próximos dos obtidos na pesquisa realizada. Autores que estudaram a fusão de PCM em cavidades esféricas, como Assis et al. (2007), Hosseinizadeh et al. (2013) e Archibold et al. (2014), propuseram correlações para a fração líquida (γ).

Assis et al. (2007), concentrou seus estudos para o PCM RT 27, com ponto de fusão de 28 °C, em esferas com D = 40, 60 e 80 mm e Ste = 0,02, 0,06, 0,1 e 0,2. Com os resultados obtidos, o autor propôs uma correlação que demonstrasse o comportamento de γ , conforme a Eq. (6.7).

$$\gamma = 1 - \left(1 - \frac{FoSte^{\frac{1}{3}} Gr^{\frac{1}{4}}}{1,9} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6.7)$$

Hosseinizadeh et al. (2013) propôs outra correlação para a obtenção de γ de PCM em cavidades esféricas. O autor realizou estudos utilizando um PCM chamado n-octadecane, ponto de fusão de 28 °C, com Ste = 0,077, 0,132 e 0,187 e D = 101,6 mm. O desvio máximo obtido pelo autor comparando os seus resultados numéricos e a correlação foi de 12%, o qual foi considerado satisfatório para suas pesquisas. A equação que demonstra a correlação do autor é apresentada na Eq. (6.8).

$$\gamma = 6,64(FoSte)^{1,07} e^{(-22FoSte)} \ln(Gr) \quad (6.8)$$

Archibold et al. (2014) propôs outra correlação para a fusão de PCM em cavidades esféricas, Eq. (6.9). O PCM utilizado em seu estudo é nitrato de sódio, cujo ponto de fusão é de 306,8°C. O autor estudou a fusão deste PCM para D = 20, 30, 40, 50 e 78 mm, e Ste = 0,048, 0,072, 0,097, 0,122 e 0,145.

$$\gamma = 1 - \left(1 - \frac{FoSte^{0,33} Gr^{0,27} Pr^{0,37} \chi^{0,72} \xi^{-0,02}}{9,5} \right)^{1,8} \quad (6.9)$$

onde χ é o parâmetro que determina a influência do material da parede da esfera, definido como $\chi = 1 - \frac{k_{pcm}}{k_{parede}}$, e ξ é o parâmetro de sub resfriamento, definido como $\xi = 1 - \frac{T_i}{T_l}$.

Archibold et al. (2014) acrescentou os parâmetros χ e ξ , pois seus estudos verificaram a influência da variação do sub-resfriamento e da mudança do material da parede da esfera.

Na Fig. (6.1) são apresentados resultados de fração líquida obtida com as correlações de Assis et al. (2007), Hosseinizadeh et al. (2013) e Archibold et al. (2014), representa pelos símbolos na cor vermelho, azul e verde, respectivamente. Além dos resultados de fração

líquida, também é mostrada na figura uma linha contígua, em preto, a qual representaria a linha de tendência caso os resultados numéricos de correlação fossem totalmente coincidentes. Assim, pode-se observar que há um afastamento bastante significativo entre a linha de tendência e a grande maioria dos resultados das correlações destes autores, quando comparado com os resultados numéricos obtidos neste trabalho.

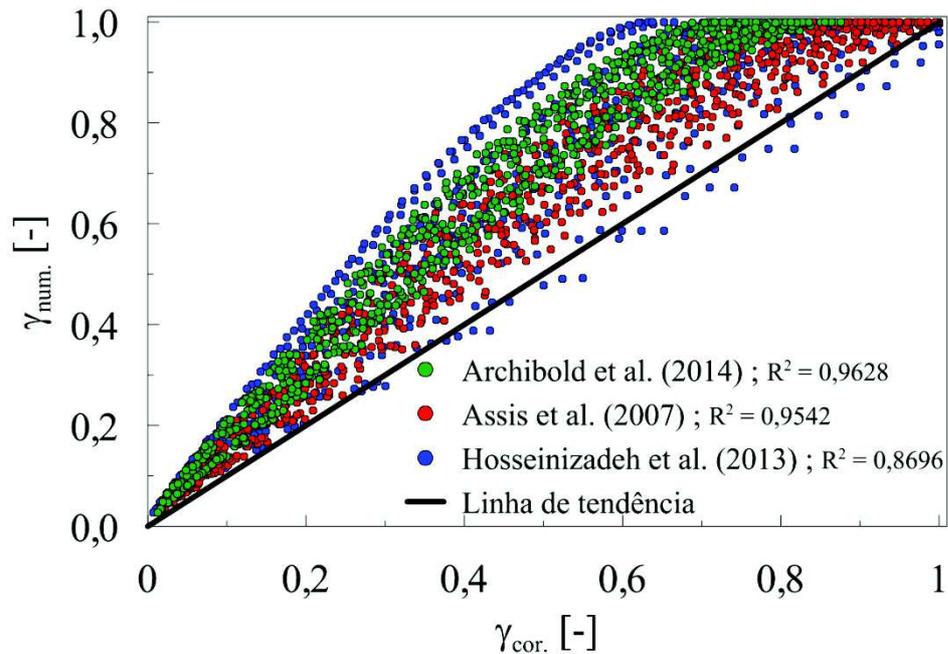


Figura 6.1 – Fração líq._{num.} vs. fração líq._{cor.}, para Archibold et al. (2103), Assis et al. (2007) e Hosseinizadeh et al. (2014), com RT 35, 55 e 82, $\Delta T = 10, 20$ e 30°C e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm.

De fato, estes autores verificaram limites do uso em suas correlações. Assis et al. (2007) concluíram que a aplicação de sua correlação é válida para número de Stefan menor ou igual à 0,1, o que corresponde aproximadamente à $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ neste trabalho. Como os casos deste trabalho utilizaram números de Ste até 0,34, a correlação proposta por Assis et al. (2007) não apresenta resultados satisfatórios. Da mesma forma, a correlação proposta por Hosseinizadeh, com os resultados do presente trabalho, não apresenta resultados satisfatórios. Observa-se que o autor utilizou Ste máximo = 0,187. A aplicação da correlação de Archibold, para os casos deste trabalho também não apresenta boa concordância, e os resultados da correlação se mostram bem aquém de reproduzir a fração líquida numérica. De fato, o autor limita o uso da correlação para Ste entre 0,048 e 0,145, que são inferiores para Ste utilizado neste estudo.

Procurou-se obter uma nova correlação que representasse de forma mais satisfatória todos os casos simulados. Estes resultados foram obtidos para RT 35, 55 e 82, $\Delta T = 10, 20$ e

30°C e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, que englobam os 36 casos pesquisados. Com os números adimensionais de Fo , Ste , Gr e Pr , utilizou-se o software Datafit a fim de encontrar expoentes para estes adimensionais. O resultado da correlação proposta (Eq. (6.10)), está apresentado na Fig. (6.2).

$$\gamma = 0,152Fo^{0,7}Ste^{0,33}Gr^{0,222}Pr^{0,364} \quad (6.10)$$

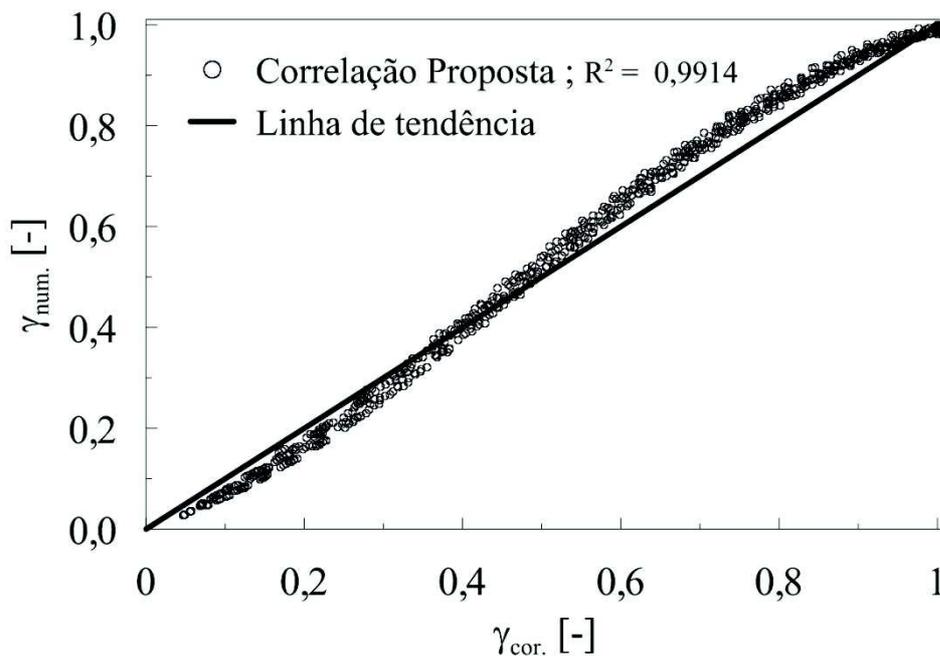


Figura 6.1 – Fração líq. num vs. fração líq. cor. (proposta), para RT 35, 55 e 82, $\Delta T = 10, 20$ e 30°C e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm.

Pode-se observar que os resultados da correlação proposta neste trabalho, apresentam uma boa concordância com os resultados da fração líquida obtidos numericamente. Para qualificar uma correlação, pode utilizar o coeficiente de correlação (R^2), o qual varia entre 0 e 1, sendo que, quanto mais próximo de 1, mais ajustados são os resultados. Para correlação proposta, $R^2 = 0,9914$, o que indica que 99,14% de todos os resultados calculados através da equação, correspondem aos resultados obtidos numericamente. Os resultados obtidos pela correlação são válidos para Fo [0-0,26], Ste [0,116-0,349], Gr [3×10^4 - $1,4 \times 10^5$] e Pr [23,1-31,5].

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral realizar um estudo numérico da fusão de PCM em cavidades esféricas. Foram estudados casos de fusão dos PCM RT 35, RT 55 e RT 82. Os diâmetros das esferas são de 40, 60, 80 e 100 mm e as temperaturas impostas à parede são de 10°C, 20°C e 30°C acima da temperatura de fusão dos PCM.

O modelo numérico foi validado com resultados experimentais e numéricos de Assis et al. (2007). Os resultados quantitativos e qualitativos mostraram excelente aproximação, e assim, a metodologia, o modelo matemático, a malha computacional e demais parâmetros utilizados foram considerados aptos para os estudos dos casos.

Os objetivos específicos eram: (a) analisar a influência do diâmetro das esferas no tempo de fusão do PCM; (b) analisar o comportamento fluidodinâmico da fusão do PCM com diferentes temperaturas na parede; (c) analisar o comportamento fluidodinâmico da fusão de diferentes tipos de PCM e (d) obter uma correlação adimensional para a fração de líquido. Em relação aos objetivos iniciais chegaram-se as seguintes conclusões:

- (a) influência do diâmetro das esferas no tempo de fusão: quanto maior o diâmetro e o comprimento característicos das esferas maior é o tempo de fusão. No entanto, a relação entre volume e área superficial, para diferentes D, faz com que a razão entre tempos de fusão sejam, praticamente, iguais a razão entre os comprimentos característicos, mas não ao diâmetro. Assim, conhecendo-se o tempo que uma esfera D leva para atingir uma determinada fração líquida, é possível prever com razoável certeza o tempo necessário para outras esferas, de diferentes D, atingirem a mesma fração, independente do ΔT ; o fluxo de calor mostrou-se inicialmente igual para todos os D, variando somente em relação ao ΔT . No entanto, para um mesmo ΔT , o aumento do D faz com que o fluxo de calor diminua mais lentamente ao longo do tempo, e assim consiga-se manter fluxos de calor mais elevados quanto maior o D da esfera. A combinação de maiores D com maiores ΔT é onde se consegue manter os maiores fluxos de calor ao longo do tempo.
- (b) influência da temperaturas na parede: o aumento de ΔT diminui o tempo de fusão e aumenta os valores de q'' . A maior redução percentual do tempo de fusão foi obtida com $\Delta T = 10^\circ\text{C}-20^\circ\text{C}$ para todos os D considerados. Entretanto, se o tempo de fusão (ou

carga) é um fator importante para o sistema de armazenamento térmico, um maior ΔT apresentará o menor tempo de carga do sistema.

- (c) comportamento fluidodinâmico da fusão de diferentes tipos de PCM: para os mesmos ΔT e D , os PCM RT 35, 55 e 82, os quais possuem diferentes pontos de fusão, apresentaram γ , q'' e tempos de fusão muito semelhantes entre si, muito provavelmente porque as propriedades destes são também muito parecidas. Percebe-se assim a dependência dos resultados de γ , q'' , em relação às propriedades dos PCM e independência de sua temperatura de fusão.
- (d) uma correlação adimensional para γ foi proposta, obtendo-se uma concordância de 99,14% de todos os 36 casos estudados. Sendo assim, é possível calcular γ para as seguintes condições: Fo [0-0,26], Ste [0,116-0,349], Gr [3×10^4 - $1,4 \times 10^5$] e Pr [23,1-31,5].

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuros, sugere-se:

- a) Estudo experimental das condições simuladas no trabalho.
- b) Estudo experimental e numérico na solidificação de PCM em cavidades esféricas.
- c) Estudo da fusão de novos tipos de PCM em cavidades esféricas.
- d) Estudo envolvendo fluxo de calor variável na parede da esfera, a fim de reproduzir com mais realidade as condições de armazenamento térmico em esferas com PCM.

REFERÊNCIAS

- ABHAT, A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. **Solar Energy**, v. 10, p. 313-332, 1983.
- 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.
- AGYENIM, F; EAMES, P; SMYTH, M. A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. **Solar Energy**, v.83, p. 1509–1520, 2009.
- 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 8 de janeiro de 2016.
- ARCHIBOLD, A.R.; RAHMAN, M.M.; GOSWAMI, D.Y.; STEFANAKOS, E.K. Analysis of heat transfer and fluid flow during melting inside a spherical container for thermal energy storage. **Applied Thermal Engineering**. v. 64, p. 396-407, 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.
- BEJAN, A. **Transferência de Calor**. 1 ed. São Paulo: E. Blucher, 1996.
- 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.
- BUDDHI, D.; SAWHNEY, R.L. Proceeding of thermal energy storage and energy conversion. School of energy and environmental studies. Devi Ahilya University. Indore, India. February 24–25, 1994.
- 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.
- ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2012.
- DOLADO, P.; LAZARO, A.; DELGADO, M.; PEÑALOSA, C.; MAZO, J.; MARIN, J.M.; ZALBA, B. Thermal energy storage by PCM-air heat exchangers: temperature maintenance in a room. **Energy Procedia**. v. 30, p. 225–234, 2012.
- DUTIL, Y.; ROUSSE, D.R.; SALAH, N.B.; ZALEWSKI, L.L. A review on phase-change materials: mathematical modeling and simulations **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 112–130, 2011.

- FAN, L.; KHODADADI, J.M. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 24–46, 2011.
- FARID, M.; KONG, W. Underfloor heating with latent heat storage. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: **Journal of Power and Energy**, v. 215, p. 601–609, 2010.
- FARID, M.M.; KHUDHAIR, A.M.; SIDDIQUE, A.K.; SARI, A. A review on phase change energy storage: 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.
- GIN, B.; FARID, M.M. The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. **Journal of Food Engineering**, v. 100, p. 372–376, 2010.
- GSCHWANDER, S.; SCHOSSIG, P.; HENNING, H. M. Micro-encapsulated paraffin in phase-change slurries. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 89 p. 307–315, 2005.
- HALE, D.V., HOOVER, M.J., O'NEILL, M.J. (1971). Phase Change Materials Hand Book, Report no. HREC- 5183-2LMSC-HREC D225138. NASA. Marshal Space Flight Center. Alabama.
- HASNAIN, S. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques. **Energy Conservation and Management**, v.39, p. 1127–1138, 1998.
- HOSSEINIZADEH, S.F.; DARZI, A.A.R.; TAN, F.L.; KHODADADI, J.M. Unconstrained melting inside a sphere. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 63, p. 55-64, 2013.
- 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.
- KANDASAMY, R.; WANG, X.Q.; MUJUMDAR, A.S. Application of phase change materials in thermal management of electronics. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, p. 2822–2832, 2007.
- KAO, M.T.; TUNG, Y.H.; Y.M. FERNG, Y.M.; CHIENG, C.C. Investigating effects of sphere blockage ratio on the characteristics of flow and heat transfer in a sphere array energy. **Conversion and Management**, v. 81, p. 455-464, 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 Conversion and Management**, v.78, p. 74–80, 2014.

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 Conversion and Management**, v. 45, p. 263–275, 2004.

KUZNIK, F.; DAVID, D.; JOHANNES, K.; ROUX J. A review on phase change materials integrated in building walls. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15(1), p. 379–391, 2011.

LIN, K.; ZHANG, Y.; XU, X.; DI, H.; YANG, R.; QIN, P. Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates. **Energy and Buildings**, v. 37, p. 215–220, 2005.

LIU, M.; SAMAN, W.; BRUNO, F. Validation of a mathematical model for encapsulated phase change material flat slabs for cooling applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, p. 2340–2347, 2011.

LONGEON, M.; SOUPART, A.; FOURMIGUÉ, J.; 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.

MALISKA, C.R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MARTIN, V.; HE, B.; SETTERWALL, F. Direct contact PCM–water cold storage. **Applied Energy**, v.87, p. 2652, 2010.

MAWIRE, A.; MCPHERSON, M. Experimental and simulated temperature distribution of an oil-pebble bed thermal energy storage system with a variable heat source. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 1086–1095, 2009.

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

MURAT, K.; KHAMID, M. Solar energy storage using phase change materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, p. 1913–1965, 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.

NAGANO, K.; TAKEDA, S.; MOCHIDA, T.; SHIMAKURA, K.; NAKAMURA, T. Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment

building mass thermal storage—heat response in small scale experiments. **Energy and Buildings**, v. 38, p. 436–446, 2006.

NAKASO K.; TESHIMA, H; YOSHIMURA, A; NOGAMI, S; HAMADA, Y; FUKAI, J. Extension of heat transfer area using carbon fiber cloths in latent heat thermal energy storage tanks. **Chemical Engineering and Processing**, v. 47, p. 879–885, 2008.

NOMURA, T.; OKINAKA, N.; AKIYAMA, T. Waste heat transportation system, using phase change material (PCM) from steelworks to chemical plant. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, p. 1000–1006, 2010.

NORO, M.; LAZZARIN, R.M.; BUSATO, F. Solar cooling and heating plants: An energy and economic analysis of liquid sensible vs phase change material (PCM) heat storage. **International journal of refrigeration**, v. 39 p. 104-116, 2014.

OHKAWARA, H.; KITAGAWA, T.; FUKUSHIMA, N.; ITO, T.; SAWA, Y.; YOSHIMINE, T. A newly developed container for safe, easy, and cost-effective overnight transportation of tissues and organs by electrically keeping tissue or organ temperature at 3 to 6°C. **Transplantation Proceedings**, v. 44, p. 855–858, 2012.

ORÓ, E.; CHIU, J.; MARTIN, V.; CABEZA, L.F. Comparative study of different numerical models of packed bed thermal energy storage systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 50, p. 384-392, 2013.

ORÓ, E.; GRACIA, A.; CASTELL, A. FARID, M.M.; CABEZA, L.F. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. **Applied Energy**, v. 99, p. 513-533, 2012.

PASUPATHY, A.; VELRAJA, R.; SEENIRAJ, R.V. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, p. 39–64, 2008.

PENG, H.; DONG, H.; LING, X. Thermal investigation of PCM-based high temperature thermal energy storage in packed bed. **Energy Conversion and Management**, v. 81, p. 420–427, 2014.

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

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

SÁNCHEZ, P.; SÁNCHEZ-FERNANDEZ, M.V.; ROMERO, A.; RODRÍGUEZ, J.F.; SÁNCHEZ-SILVA, L. Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules. **Thermochimica Acta**, v. 498 p. 16–21, 2010.

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**, v. 13, p. 318–345, 2009.

SHARMA, S.D.; KAZUNOBU; SAGARA. Latent heat storage materials and systems: a review. **International Journal of Green Energy**, v. 2, p. 2-3, 2005.

SHATIKIAN, V; ZISKIND, LETAN, R.G. 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.

SHUKLA, A.; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R.L. Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials. **Renewable Energy**, v. 33, p. 2606– 2614, 2008.

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.

TAN, F.L. Constrained and unconstrained melting inside a sphere. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 35, p. 466-475, 2008.

TAN, F.L.; HOSSEINIZADEH, S.F.; KHODADADI, J.M.; FAN, L. Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, p. 3464–3472, 2009.

TAN, F.L.; TSO, C.P. Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. **Applied Thermal Engineering**, v. 24, p. 159–169, 2004.

VOELKER, C; KORNADT, O; OSTRY, M. Temperature reduction due to the application of phase change materials. **Energy and Buildings**, v.40, p. 937–944, 2008.

WANG, F.; MAIDMENT, G.; MISSENDEN, J.; TOZER, R. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: Experimental investigation. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, p. 2893–2901, 2007.

YAGI, J.; AKIYAMA, T. Storage of thermal energy for effective use of waste heat from industries. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 48, p. 793–804, 1995.

ZALBA B, MARIN JM, CABEZA LF, MEHLING H. Free-cooling of buildings with phase change materials. **International Journal of Refrigeration**, v. 27, p. 839–49, 2004.

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.

ZIYE, L.; ZHANG, Z.; SHI, G.; FANG, X.; WANG, L.; GAO, X.; FANG, Y.; XU, WANG, S.; LIU, X. Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 427-438, 2014.