

AValiação da Fusão de PCM em Cavidades Esféricas

Fábio Faistauer – fabio@fkl.com.br

Petros Rodrigues – petrodriguesf@gmail.com

Rafael da Silveira Borahel – rafaelborahel@gmail.com

Rejane de César OIveski – decesaroo@gmail.com

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Departamento de Engenharia Mecânica, www.unisinos.br

F3 - Métodos de Modelamento e Estimativa Energéticas

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo numérico do processo de fusão de PCM (Phase Change Materials 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. O estudo consiste na análise do processo de fusão de PCM RT35, RT55 e RT82 em cavidade esférica com temperatura constante na parede, as quais estão à 10°C, 20°C e 30°C acima da temperatura de fusão dos PCM. Os diâmetros das esferas são de 40, 60, 80 e 100 mm. São apresentados perfis de fração líquida e de fluxo de calor em função do diâmetro das esferas, das diferenças de temperatura e dos diferentes tipos de PCM, totalizando 36 estudos de casos.

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

1. INTRODUÇÃO

Em todo o mundo energia utilizada para diversos fins tem como fonte principal o petróleo e seus derivados, bem como outras fontes de energia não renováveis, como o carvão. É sabido que estes recursos são finitos e que são responsáveis pela produção de CO₂ e de outros gases nocivos que levam a problemas de mudanças climáticas, como o aquecimento global e com a deterioração da camada de ozônio (XU et al., 2014).

Buscam-se em todo o mundo formas de geração de energia que não sejam dependentes do carvão e petróleo, como a energia solar, por exemplo. No entanto, um dos obstáculos da energia solar está no desalinhamento entre oferta e consumo de energia. Portanto, o conceito de armazenamento de energia é proposto como um meio essencial para resolver a incompatibilidade. (XU et al., 2014).

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. 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. A investigação de métodos de armazenamento de energia térmica foi intensificada na década de 70, devido à crise de energia (KENISARIN; MAHKAMOV, 2007). Tecnologias para armazenamento térmico e seus princípios gerais foram pesquisados por diversos autores (GARG et al., 1985). 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, HASNAIN, 1998). As aplicações são bastante amplas, tais como: construção civil, reservatórios térmicos, vestuário, transporte de produtos perecíveis, refrigeração de equipamentos eletrônicos entre outros.

PCM podem ser usados em uma vasta gama de temperaturas (-100°C à 800°C), (ZHOU et al., 2012). Oro (2012), Schossig (2005) e Wang (2007), por exemplo, estudaram o uso de PCMs em armazenamento térmico em sistemas de refrigeração. Cabeza (2011), Soares (2013) e Zhou (2012), por exemplo, estudaram o uso de PCM em prédios e edificações. Delgado (2012), Fan e Khodadadi (2011), Rathod (2013) e Sharma (2009) concentraram seus estudos na revisão de PCM para armazenamento térmico. Na área de armazenamento térmico com o uso de energia solar, Noro (2014) avaliou o uso de PCM em plantas industriais. Kenisarin (2007), Mahfuz (2014) e Mettawee (2006) e contribuíram com pesquisas de armazenamento térmico com o uso de PCM para situações residenciais.

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 (CONRAD, 2008).

PCM pode ser adicionado em tecidos e roupas com o objetivo de regular o conforto térmico. Estudos de Sánchez (2010) mostram os efeitos de termo regulação da temperatura em tecidos impregnados com PCM. 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 (ORO et al., 2012). 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) estudou 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.

O estudo de PCMs em esferas foi pesquisado por diversos autores, entre eles Kao et al. (2014) e Mawire et al. (2009). 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), por exemplo, realizaram estudos experimental e numérico sobre a fusão do PCM no interior de esferas. Estes estudos foram conduzidos com PCM com 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.

Estudos para armazenamento térmico utilizando reservatórios preenchidos com cavidades esféricas (pebble bed ou packed bed) foram realizados por Eduard et al. (2013), Mawire e McPherson (2009) e Karthikeyan (2014), por exemplo. No entanto, 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.

Este trabalho consiste em estudar o processo de fusão de PCM em esferas de diferentes diâmetros ($D=40, 60, 80$ e 100 mm), com três diferenças de temperaturas ($\Delta T = 10, 20$ e 30°C) e três diferentes tipos de PCM (RT 35, RT 55, RT 82).

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A geometria proposta é formada por uma cavidade esférica, mostrada na Fig. 1. Foram escolhidos 4 diâmetros (D) de esferas: 40, 60, 80 e 100 mm, as quais são preenchidas com 85% de seu volume com PCM, sendo o restante do volume preenchido com ar. Por questão de simetria, pode-se representar a esfera apenas por um de seus hemisférios.

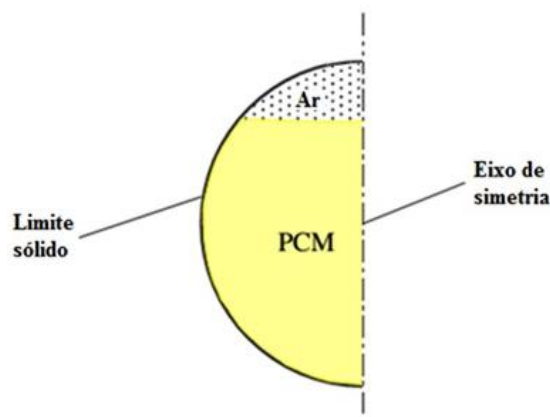


Figura 1. Representação da condição inicial de uma esfera com PCM em estado sólido. Fonte: Adaptado de Assis, 2007.

O processo de fusão do PCM inicia devido à transferência pela parede da esfera. Isto faz com que o PCM em contato com a parede se liquefaça e inicie um movimento ascendente junto à parede da esfera. 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.

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. 1

Tabela 1. Propriedades termodinâmicas dos PCM, adaptadas da empresa Rubitherm Technologies GmbH.

Propriedade	RT 35	RT 55	RT 82
Temperatura de fusão (°C)	29-36	51-57	77-85
Capacidade Armazenamento Térmico (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

São estudados casos com PCMs RT 35, RT 55 e RT 82, acondicionados em esferas de diâmetros (D) 40, 60, 80 e 100 mm, cujas paredes estão a 10, 20 e 30°C acima da temperatura de fusão dos PCMs. A temperatura inicial de cada caso é fixada em 5°C abaixo da temperatura de fusão dos PCM.

3. ABORDAGEM NUMÉRICA

As equações de conservação que compõe o modelo numérico são a equação de conservação da massa (1), da quantidade de movimento (2), da energia (3) e da fração volumétrica (4), (ANSYS, 2013).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\alpha_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_n \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

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

A entalpia específica é definida como a soma da entalpia sensível, h_s , descrita através da Eq (5), e da mudança de entalpia devida à mudança de fase (γL), onde h_{ref} é a entalpia de referência na temperatura de referência (T_{ref}), C_p é o calor específico, L é a entalpia específica de fusão (calor latente do material), e γ é a fração líquida durante a mudança de fase que ocorre em uma faixa de temperatura $T_s < T < T_l$, definida pela Eq. 6 (ANSYS, 2013):

$$h_s = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT, \quad (5)$$

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s, \\ 1 & \text{se } T > T_l, \\ \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{se } T_s < T < T_l. \end{cases} \quad (6)$$

A técnica entalpia-porosidade, analisada por Brent et al. (1988), trata a região de mudança de fase (parcialmente solidificada), como se fosse um meio poroso. A porosidade em cada célula é definida como igual à fração líquida naquela célula. Em regiões totalmente solidificadas a porosidade é igual a zero, o que extingue as velocidades nestas regiões. O termo fonte ($\vec{S}$) da Equação da quantidade de movimento (2) toma a forma da seguinte equação:

$$\vec{S} = -A(\gamma)\vec{V} \quad (7)$$

onde $A(\gamma)$ é a “função porosidade” definida por Brent et al. (1988).

$$A(\gamma) = \frac{C(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)}, \quad (8)$$

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 et al. (1988) e Shmueli et al. (2010). Estes pesquisadores demonstraram que a constante C controla, efetivamente, o grau de penetração da convecção na região de mudança de fase e, desta maneira, conduz a um processo de fusão (ou solidificação) mais rápido ou mais lento, dependendo do valor adotado para esta constante. Os valores normalmente adotados para a constante C vão de 10^4 a 10^{10} .

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, apresentado na Fig. 1. Adicionalmente foi considerado que a fase líquida do PCM e o ar são fluidos Newtonianos, incompressíveis e escoamento laminar foi assumido para ambos. Para a solução numérica com o uso do Fluent, foi utilizado o modelo VOF, ou “volume de fluido” para o caso onde não ocorre interpenetração dos fluidos.

3.1 Pós-processamento

A fração líquida do PCM não é obtida de forma direta pelo software Ansys Fluent ou Ansys Post. Assim, para obtê-la é necessário pós-processamento, o qual consiste, inicialmente, em obter o campo de fração de massa de PCM para um determinado tempo. A Fig. 2 mostra um exemplo de campo de fração de massa, onde a área em azul mais escuro representa a fração sólida e a região em azul claro representa a região de interface. A região de interface é marcada manualmente através de pontos, os quais também podem ser observados nesta figura. Posteriormente, através do software GetData Graph Digitizer, é feita a leitura das coordenadas x e y de cada um dos pontos da referida imagem.

Na sequência, de posse das coordenadas lidas anteriormente, cria-se a linha de contorno com o software Solid Work e esta é revolucionada 360° em relação ao eixo de simetria. Como resultado obtém-se o volume definido pela linha de contorno, cujo resultado é igual ao volume ocupado naquele instante pelo PCM sólido. A Fig. 3 mostra as etapas de obtenção dos resultados do volume de PCM sólido com o software Solid Work. O valor deste volume é informado pelo próprio software e assim, o cálculo da fração líquida do PCM é obtido através da Eq. 9.

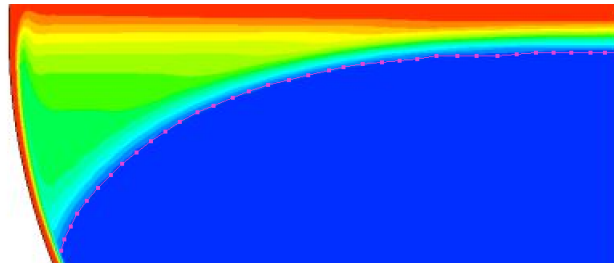


Figura 2. Campo de fração massa com indicação pontual da divisa do PCM sólido e líquido.

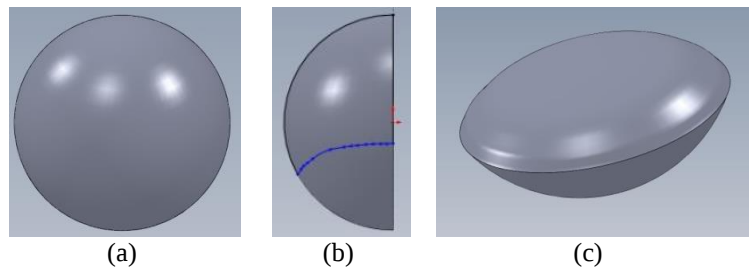


Figura 3. Etapas da obtenção do volume do PCM sólido: (a) esfera completa, (b) formação da linha de contorno para o PCM sólido e (c) volume de PCM sólido.

$$\alpha(t) = 1 - \frac{V_{total}(t)}{V_0} \quad (9)$$

onde $\alpha(t)$ é a fração líquida, V_{total} é o volume no instante t e V_0 é o volume total de PCM no instante $t = 0$.

3.2 Validação Experimental

A validação do modelo numérico foi realizada com resultados experimentais de Assis et al. (2007). Estes autores investigaram o processo de fusão do PCM RT27 encapsulado em uma esfera de 80 mm de diâmetro, conforme mostra-

do na Fig. 1, com 85% de seu volume preenchido com PCM. As temperaturas inicial e da parede são de 23°C e 38°C, respectivamente. Ou seja, 10°C acima da temperatura de fusão do PCM (28°C). As propriedades termofísicas utilizadas neste trabalho foram obtidas de Assis et al. (2007).

A Figura 4 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). 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.

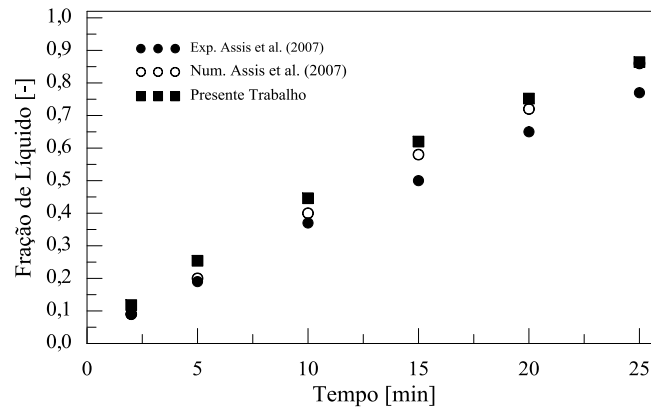


Figura 4. Fração líquida vs. tempo nos resultados experimentais e numéricos de Assis et al. (2007), e presente trabalho.

Uma vez que a massa específica da fase sólida é maior do que a da fase líquida, durante o processo de fusão do PCM a fase sólida desloca-se para baixo, mantendo-se em contato com a superfície inferior da esfera. Isso faz com que, além do processo de empuxo natural, nestes casos de aquecimento de fluido, ocorra movimentação ascendente da massa líquida junto à parede. Esta movimentação cria recirculações de PCM líquido, provocando um arredondamento da parte sólida junto à parede, conforme pode ser observado nas Figs. 5(a-b). Na Figura 5(a) pode-se observar os vetores de velocidade na região de arredondamento do PCM sólido e Fig. 5(b) a camada de PCM liquefeita junto ao fundo da esfera

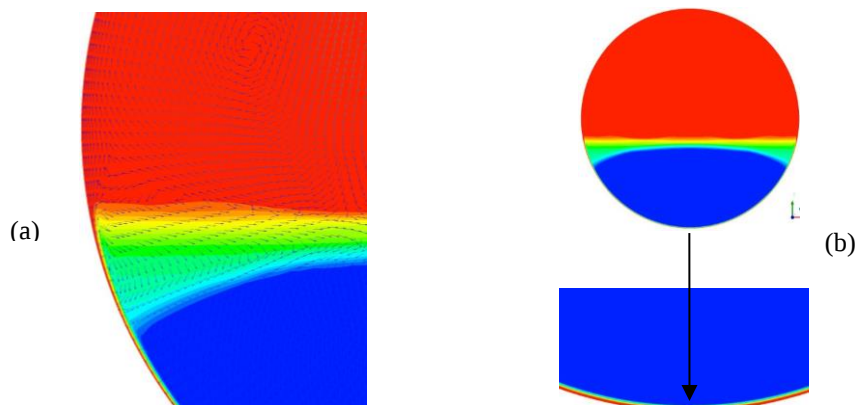


Figura 5. Campos de fração líquida: (a) região arredondada e (b) camada de PCM líquido no fundo da esfera.

3.3 Malha Computacional

O modelo criado é 2D e a malha é do tipo hexaédrica (Fig. 6). Conforme pode ser observado, esta foi refinada junto à parede, pois é onde apresenta os maiores gradientes térmicos e fluidodinâmicos. Foram criadas três malhas espaciais, com: 4450, 5500 e 7450 elementos.

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. Portanto, escolheu-se a diferença de temperatura mais elevada, das consideradas neste trabalho, ou seja, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ para realizar as simulações. Para um tempo real de 14 min, os resultados de massa líquida para as malhas menos refinada (M1), padrão (M2) e mais refinada (M3), apresentaram valores de 92,48; 92,86 e 92,91, respectivamente. A diferença entre as malhas são pequenas, principalmente entre M2 e M3. Assim, optou-se por utilizar a malha M2.

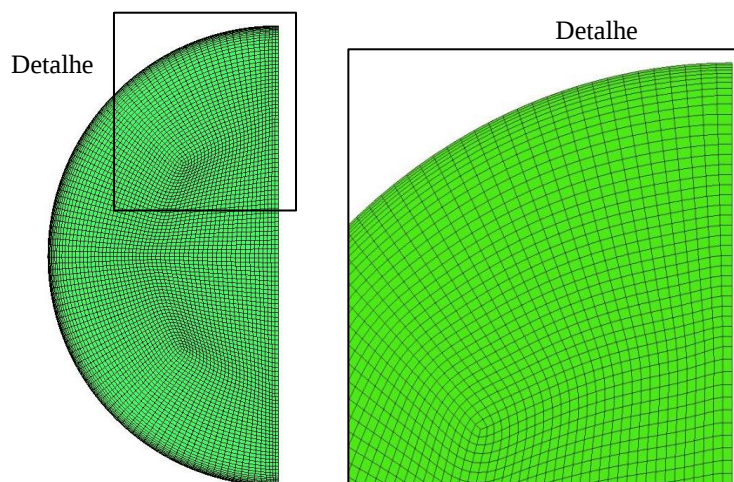


Figura 6. Malha computacional e região de refino junto à parede.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados na Fig. 4 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. A Fig. 7 apresenta os resultados de fração líquida para esferas abertas e fechadas. 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. Assim, na continuidade do trabalho foi considerado esferas fechadas.

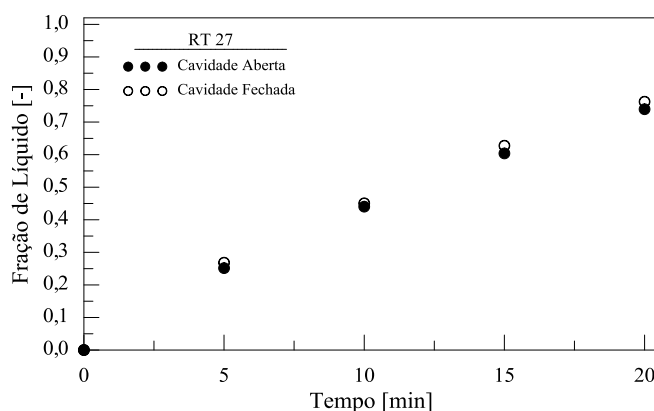


Figura 7. Campo de fração líquida vs. tempo para cavidades abertas e fechadas.

As Figuras 8(a-d) apresentam a variação da fração líquida ao longo do tempo para $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, RT 35, RT 55 e RT 82 com $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, respectivamente. Inicialmente observa-se que, para todos D analisados, a fração líquida é independente do RT. Condição semelhante foi observada para ΔT de 10 e 20°C . Esta concordância é justificada pelo fato de que as diferenças de propriedades térmicas dos PCM são pequenas, conforme demonstrado na Tab. 1. A diferença máxima encontrada entre os PCM escolhidos foi de $3,41\%$ para a capacidade de armazenamento térmico e de $2,27\%$ para a massa específica da fase sólida do PCM. No entanto, observa-se também que, quanto maior D , maior é o tempo necessário para atingir a fusão completa.

As Figuras 9(a-c) apresentam os resultados do fluxo de calor ao longo do tempo para $D = 80$ mm, RT 35, RT 55, RT 82, $\Delta T = 10, 20$ e 30°C , respectivamente. Pode-se observar que, nos instantes iniciais ocorrem os maiores fluxos de calor, diminuindo de forma exponencial ao longo do tempo. No entanto, quanto maior o ΔT , menor é o tempo para atingir determinado fluxo de calor. Este mesmo comportamento é verificado para $D = 40, 60$ e 100 mm.

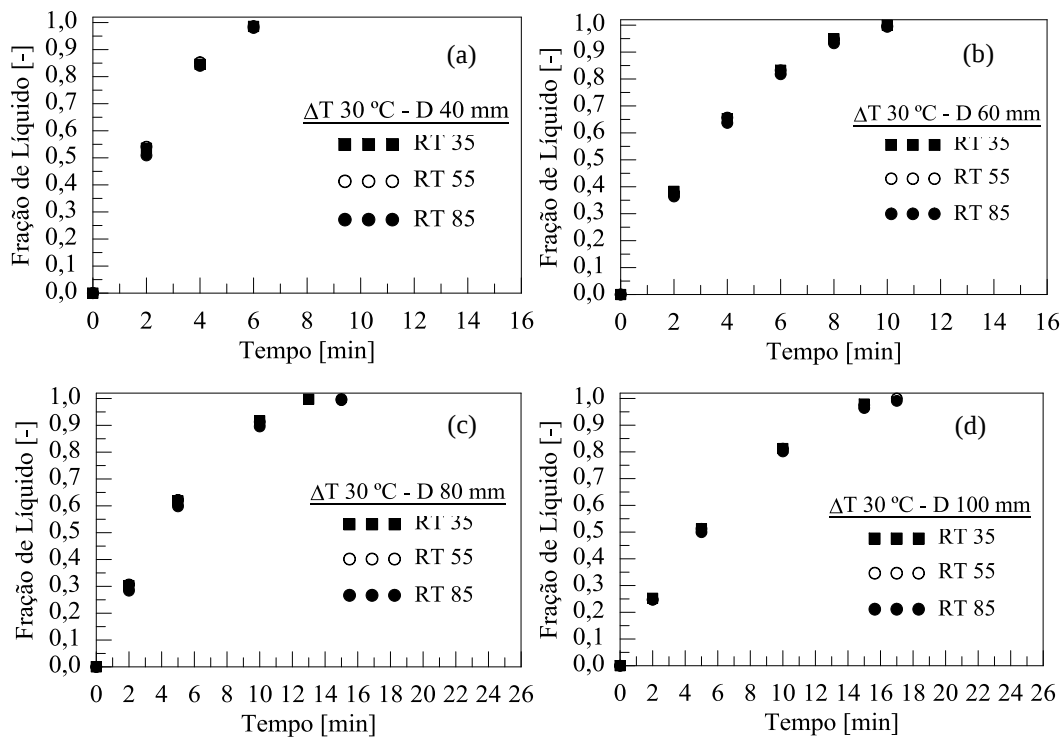


Figura 8. Fração líquida vs. tempo para $\Delta T=30^\circ\text{C}$, RT 35, 55 e 82: (a) $D=40$ mm; (b) $D=60$ mm, (c) $D=80$ mm e (d) $D=100$ mm.

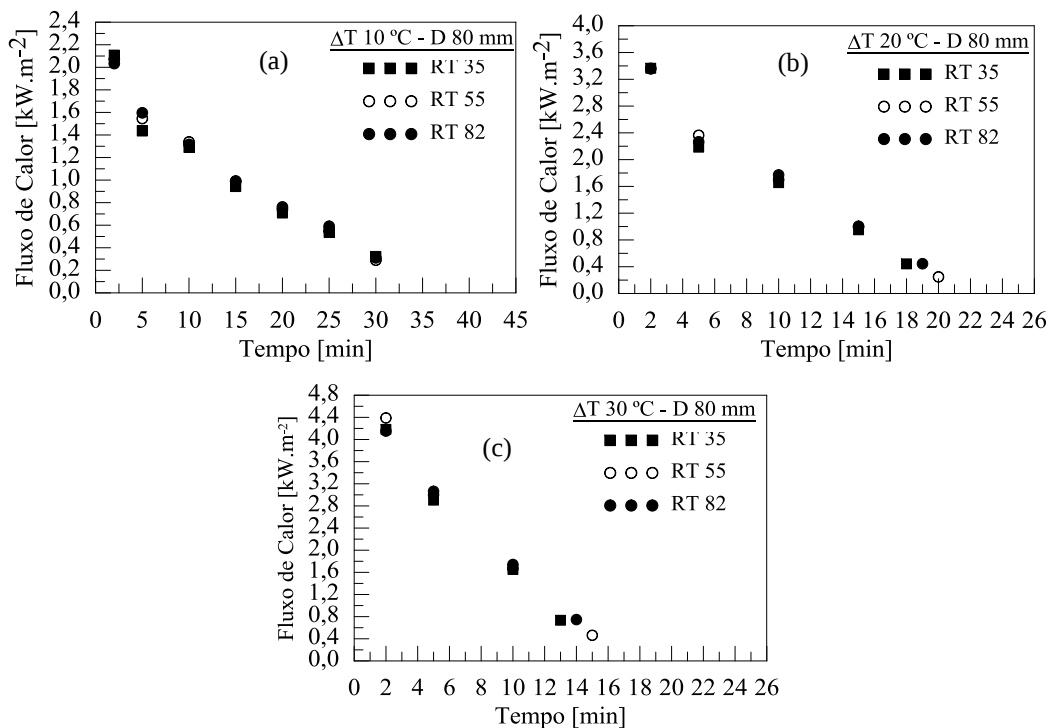


Figura 9. Fluxo de calor vs. tempo para $D=80$ mm, RT 35, 55 e 82: (a) $\Delta T=10^\circ\text{C}$; (b) $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e (c) $\Delta T=30^\circ\text{C}$.

Nas Figs. 10(a-d) apresentam-se resultados da fração líquida ao longo do tempo para o PCM RT 35, $\Delta T = 10, 20$ e 30°C , e $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, respectivamente. Observa-se que, independentemente de D , quanto maior ΔT menor é o tempo de fusão. O mesmo comportamento é verificado para os PCMs RT 55 e RT 82. Aumentando-se ΔT aumenta também fluxo de calor da parede para o interior da esfera, ocorrendo assim uma fusão mais rápida do PCM sólido. Aumentando-se ΔT em 100% ($\Delta T=10^\circ\text{C}$ para 20°C) reduz-se o tempo de fusão em média 40,2%, ao passo que, aumentando-se ΔT em 200% ($\Delta T=10^\circ\text{C}$ para 30°C), reduz o tempo de fusão em média 56,7%. Ou seja, o aumento do ΔT não reduz proporcionalmente o tempo de fusão.

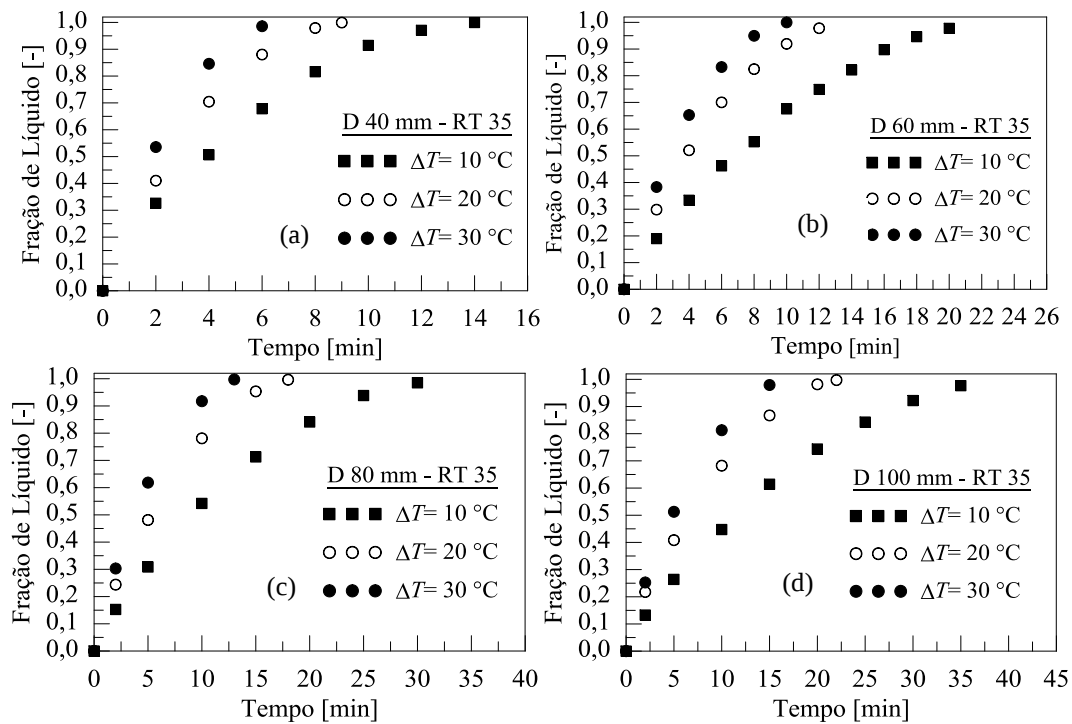


Figura 10. Fração líquida vs. tempo para RT 35, $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$: (a) $D=40$ mm; (b) $D=60$ mm, (c) $D=80$ mm e (d) $D=100$ mm.

As Figuras 11 (a-c) apresentam os resultados da fração líquida 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 a mesma fração líquida. Por outro lado, quanto maior o ΔT , menor é o tempo necessário para atingir a mesma fração líquida.

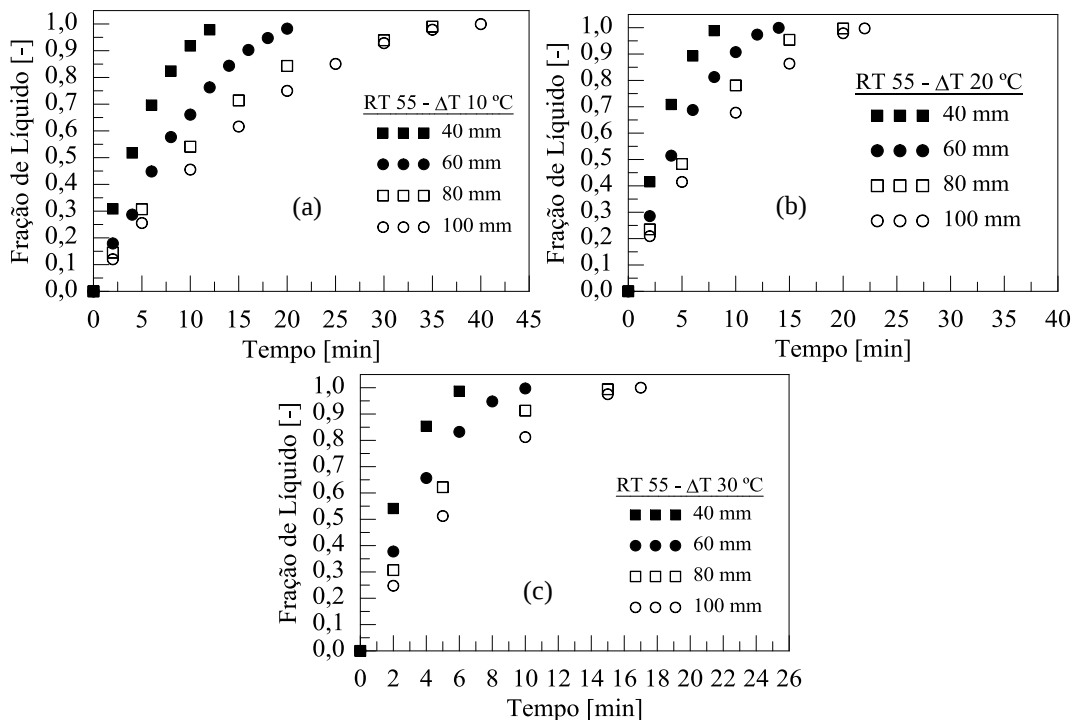


Figura 11. Fração líquida vs. tempo, para PCM RT 55, $D = 40, 60, 80$ e 100 mm: (a) $\Delta T 10^{\circ}\text{C}$, (b) $\Delta T 20^{\circ}\text{C}$ e (c) $\Delta T 30^{\circ}\text{C}$.

Para $D = 40, 60, 80$ e 100 mm, a Tab. 2 apresenta os tempos necessários para atingir fração líquida de 0,8, ao mesmo tempo em que apresenta a razão entre estes tempos. Pode-se observar que as razões de aumento entre os tempos são, praticamente, independentes de ΔT . No entanto, quanto maior o D , menor é esta razão. Esta razão entre está relacionada com o comprimento característico (L_c) da esfera, o qual relaciona o volume ($V = 4\pi r^3/3$) com sua área superfi-

cial ($S = 4\pi r^2$), 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 conheci-da a razão entre os L_c destas esferas.

Tabela 2. Tempo e razão de tempos para $D = 40, 60, 80$ e 100 mm e fração líquida = 0,8.

ΔT (°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

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho era estudar o processo de fusão de PCM em esferas de diferentes diâmetros ($D=40, 60, 80$ e 100 mm), com três diferenças de temperaturas ($\Delta T = 10, 20$ e 30°C) e três diferentes tipos de PCM (RT 35, RT 55, RT 82). Para tal, foi implementado um modelo numérico no software ANSYS-FLUENT e foi realizado uma validação numérica com dados experimentais e numéricos existentes na literatura, apresentando boa aproximação. Desta forma, considera-se que a metodologia desenvolvida é validada para o estudo de casos.

Dos estudos realizados, concluiu-se que os PCM escolhidos não influenciam nos resultados de fração líquida e fluxo de calor. Isso porque suas propriedades são muito próximas entre si e apresentarem diferenças máximas de 3,41% na capacidade de armazenamento térmico e de 2,27% na massa específica.

Observou-se que, independentemente do valor de D , quanto maior ΔT menor é o tempo de fusão. Aumentando-se ΔT em 100% ($\Delta T= 10^\circ\text{C}$ para 20°C) reduz-se o tempo de fusão em média 40,2%, ao passo que, aumentando-se ΔT em 200% ($\Delta T= 10^\circ\text{C}$ para 30°C), reduz o tempo de fusão em média 56,7%. Ou seja, o aumento do ΔT não reduz proporcionalmente o tempo de fusão.

Concluiu-se também que o aumento do D aumenta o tempo de fusão independente do ΔT e do tipo de PCM. Relacionou-se a razão dos diferentes D com a razão dos L_c das esferas, mostrando ser possível prever o tempo de fusão conhecendo-se o L_c destas esferas.

Quanto ao fluxo de calor, observa-se, que, nos instantes iniciais, ocorrem os maiores fluxos de calor, diminuindo de forma exponencial ao longo do tempo. No entanto, quanto maior o ΔT , menor é o tempo para atingir determinado fluxo de calor. Este mesmo comportamento é verificado para $D = 40, 60, 80$ e 100 mm.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FAPERGS, CAPES e UNISINOS para realização deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ASSIS, E.; KATSMAN, G.; ZISKIND, G.; LETAN, R. 2007. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 50:1790-1804.
- BRENT, A.D.; VOLLER, V.R. 1988. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change – application to the melting of a pure metal. *Numerical Heat Transfer*. 13:297-318.
- CABEZA, L.F.; CASTELL, A.; BARRENECHE, C.; GRACIA A.; FERNÁNDEZ, A.I. 2011. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15:1675-1695.
- DOLADO, P; LAZARO, A; DELGADO, M; PEÑALOSA, C; MAZO, J; MARIN, J.M; ZALBA, B. 2012. Thermal energy storage by PCM-air heat exchangers: temperature maintenance in a room. *Energy Procedia*. 30:225 – 234.
- DUTIL, Y.; ROUSSE, D.R.; SALAH, N.B.; ZALEWSKI, L.L. 2011. A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15:112–130.
- FAN, L; KHODADADI, J.M. 2011. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15:24–46.
- GSCHWANDER, S; SCHOSSIG, P; HENNING, H.-M. 2005. Micro-encapsulated paraffin in phase-change slurries. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 89:307–315.
- HASNAIN, S. 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conservation and Management*. 39:1127–1138.
- KANDASAMY, R.; WANG, X.Q.; MUJUMDAR, A.S. 2007. Application of phase change materials in thermal management of electronics. *Applied Thermal Engineering*. 27:2822–2832.

- KAO, M.T.; TUNG, Y.H.; Y.M. FERNG, Y.M.; CHIENG, C.C. 2014. Investigating effects of sphere blockage ratio on the characteristics of flow and heat transfer in a sphere array energy. *Conversion and Management*. 81:455-464.
- KARTHIKEYAN, S; SOLOMON, G. R; KUMARESAN, V; VELRAJ, R. 2014. Parametric studies on packed bed storage unit filled with PCM encapsulated spherical containers for low temperature solar air heating applications. *Energy Conversion and Management* 78:74–80.
- KENISARIN, M; MAHKAMOV, K. 2007. Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11: 1913–1965.
- MAWIRE, A; MCPHERSON, M. 2009. Experimental and simulated temperature distribution of an oil-pebble bed thermal energy storage system with a variable heat source. *Applied Thermal Engineering* 29.
- MAHFUZ, M.H; ANISUR M.R; KIBRIA M.R; SAIDUR, R; I.H.S.C. Metselaar. 2014. Performance investigation of thermal energy storage system with Phase Change Material (PCM) for solar water heating application. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 57:132–139.
- METTAWEE, E.S; ASSASSA G.M.R. 2006. Experimental study of a compact PCM solar collector. *Energy* 31:2958–2968.
- NORO, M; LAZZARIN, R.M; BUSATO, F. 2014. Solar cooling and heating plants: An energy and economic analysis of liquid sensible vs phase change material (PCM) heat storage. *International journal of refrigeration* 39:104-116.
- OHKAWARA, H; KITAGAWA, T; FUKUSHIMA, N; ITO, T; SAWA, Y; YOSHIMINE, T. 2012. 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* 44:855-858.
- ORÓ, EDUARD; CHIU, J; MARTIN, V; CABEZA, L. F. 2013. Comparative study of different numerical models of packed bed thermal energy storage systems. *Applied Thermal Engineering* 50:384-392.
- ORÓ, E; MIRÓ, L; FARID, M.M; CABEZA, F.L. 2012. Improving thermal performance of freezers using phase change materials. *International journal of refrigeration* 35:984-991.
- PIELICHOWSKA, K.; PIELICHOWSKI, K. 2014. Phase change materials for thermal energy storage *Progress in Materials Science*. 65:67–123.
- PRAKASH, J; GARG, H. P; DATTA, G. 1985. A solar water heater with a built-in latent heat storage. *Energy Convers. Mgmt Vol. 25, No. 1, pp. 51-56*.
- RATHOD, M. K; BANERJEE, J. 2013. Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18:246–258.
- SÁNCHEZ, P; SÁNCHEZ-FERNANDEZ, M. V; ROMERO, A; RODRÍGUEZ, J.F; SÁNCHEZ-SILVA, L. 2010. Development of thermo-regulating textiles using paraffin wax microcapsules. *Thermochimica Acta* 498:16–21.
- SHARMA, A.; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R.; BUDDHI, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy*.13:318–345.
- SHMUELI, H.; ZISKIND, G.; LETAN, R. 2010. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 53:4082-4091.
- SOARES, N.; COSTA, J.J.; GASPAR, A.R.; SANTOS, P. 2013. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*. 59:82-103.
- VOELKER, CONRAD; KORNADT, O; OSTRY, M. 2008. Temperature reduction due to the application of phase change materials. *Energy and Buildings* 40:937–944.
- XU, J.; WANG, R.Z.; LI, Y. 2014. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Solar Energy*. 103:610-638.
- ZHOU, D.; ZHAO, C.Y.; TIAN, Y. 2012. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*.92:593-605.
- ZIYE, L.; ZHANG, Z.; SHI, G.; FANG, X.; WANG, L.; GAO, X.; FANG, Y.; XU, WANG, S.; LIU, X. 2014. Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31:427-438.

MELTING EVALUATION PCM IN SPHERICAL CAVITIES

ABSTRACT. This paper presents a numerical study of PCM melting process (Phase Change Materials) in spherical cavities. The numerical model is two-dimensional and consists of the mass, momentum, energy and volume fraction conservation equations, modeled by enthalpy-porosity technique. The computational mesh is hexahedral with refinements in regions with the highest thermal and fluid dynamic gradients. The numerical model was validated with experimental and numerical results literature. The study is an analysis of melting process of RT35, RT55 and RT82 PCM in spherical cavities with constant wall temperatures, which are at 10 ° C, 20 ° C and 30 ° C above the melting temperature of the PCM. The spheres diameters are: 40, 60, 80 and 100 mm. Liquid fraction and heat flux profiles in function of sphere diameters, temperature differences and different types of PCM.

Key words: PCM, CFD, thermal storage, Fluent