

ANÁLISE DA FUSÃO DO PCM ÁCIDO LÁURICO EM CAVIDADE RETANGULAR

Aline Morais da Silveira – alinemsilveira@hotmail.com

Iago Dal-Ri dos Santos – dalri.iago@gmail.com

Rejane De César Oливски – decesaro@unisinos.br

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

F3 – Métodos de Modelamento e Estimativa Energéticas

Resumo: Armazenamento térmico é fundamental em muitos ramos da indústria e também na vida cotidiana, tais como manutenção isotérmica de processos, conservação de alimentos e climatização. O armazenamento térmico com mudança de fase possui algumas vantagens em relação ao monofásico. Este trabalho apresenta uma análise numérica por CFD (Computational Fluid Dynamics) da fusão de PCM (Phase Change Material). Neste caso, o PCM utilizado é o ácido láurico puro. A análise é realizada em uma cavidade retangular. O modelo numérico é composto pelas equações de conservação da massa, quantidade de movimento, energia e de mudança de fase. O estudo consiste em validar a metodologia empregada comparando resultados numéricos com resultados experimentais obtidos da literatura. Como condição de contorno utilizou-se não deslizamento em todas as paredes da cavidade, e para o problema térmico foi utilizado temperatura prescrita em uma parede vertical. O comportamento termodinâmico do ácido láurico durante a fusão foi avaliado, visando sua aplicação como PCM. São apresentados campos de temperatura, velocidade e evolução da fração líquida ao longo do tempo, evidenciando que o parâmetro C que melhor representa a fusão do ácido láurico é da ordem de 10^{11} , e que a convecção natural é o mecanismo mais influente durante a fusão.

Palavras-chave: Ácido láurico, CFD, Fusão, PCM

1. INTRODUÇÃO

O uso de sistemas de armazenamento de energia térmica (TES – Thermal Energy Storage) para aplicações de refrigeração e condicionamento de ar são considerados soluções interessantes para corrigir o desequilíbrio entre oferta e demanda de energia, visto que os TES dão a oportunidade de mudar a demanda de carga do período de alto custo de energia para o período fora de pico, satisfazendo as cargas térmicas que ocorrem durante as altas demandas, Moreno *et al.* (2014).

O armazenamento térmico de energia pode ser subdividido em sistema de armazenamento térmico de energia por calor sensível (SHTES – Sensible Heat Thermal Energy Storage) e sistema de armazenamento térmico de energia por calor latente (LHTES – Latent Heat Thermal Energy Storage). Os SHTES dependem do aumento ou redução de temperatura do material, sendo que a eficácia do sistema é influenciada pelo calor específico e pela massa específica do material. Já os LHTES dependem da capacidade de armazenamento de energia do material em uma condição de temperatura praticamente constante.

Com o crescente interesse de pesquisadores nos processos de transferência de calor que envolvem mudança de fase, principalmente devido à elevada capacidade de armazenamento térmico, os LHTES se tornaram atrativos em comparação aos SHTES, requerendo menor peso e volume. A utilização de PCMs permite avanços na performance e na rentabilidade dos sistemas térmicos devido às suas características termodinâmicas vantajosas, tais como: grande calor de fusão e armazenamento de quantidades significativas de calor durante um processo de mudança de fase, com pequena variação da temperatura.

Constantes estudos permitiram a criação de diversos PCMs artificiais, cujas propriedades termodinâmicas são manipuladas a fim de melhorar a aplicabilidade desses materiais para um determinado sistema, como por exemplo aparelhos de refrigeração e condicionamento de ar. Como alternativa aos PCMs artificiais, os ácidos graxos podem ser utilizados por serem materiais normalmente dotados de grande calor de fusão, baixa variação de volume durante a mudança de fase, e por serem ambientalmente sustentáveis. Devido a estas vantagens, a utilização dos ácidos graxos em sistemas térmicos tem ganhado força ao longo do tempo, e a pesquisa passou a ter boa parte do seu foco voltado para estes materiais. Conforme Shokouhmand e Kamkari (2013), o ácido láurico pode ser considerado um PCM interessante, pois possui baixo custo e boa estabilidade química, além de alto calor de fusão e temperatura média de derretimento (entre 43 °C e 48 °C). O entendimento dos fenômenos termodinâmicos que envolvem o processo de mudança de fase desses materiais é indispensável para a pesquisa e a melhoria de sistemas térmicos que contam com a utilização de PCMs.

Nos últimos anos, diversos estudos sobre o processo de mudança de fase de PCMs foram realizados de forma experimental, a fim de verificar o desempenho térmico destes materiais. Entre eles pode-se citar: Castell *et al.* (2010), que estudaram o uso de PCM em tijolos para resfriamento passivo; Rathod e Banerjee (2014), que investigaram uma unidade de armazenamento de calor latente usando cera de parafina como PCM, e Kamkari, Shokouhmand e Bruno (2014), que analisaram o efeito do ângulo de inclinação durante a fusão do PCM em um compartimento retangular. De forma numérica, Al-Abidi *et al.* (2013) estudaram a solidificação do PCM em um trocador de calor de tubos com aletas inter-

nas e externas, assim como Jmal e Baccar (2015) que estudaram a solidificação em um armazenador térmico com aletas incluindo a convecção natural. Já Assis *et al.* (2007) estudaram a fusão de PCM em geometrias esféricas de diferentes diâmetros e temperaturas de parede, enquanto que Kousksou *et al.* (2014) focaram na fusão de PCM sobre uma superfície ondulada. Wang *et al.* (2016) estudaram o processo de fusão em um tubo com aletas internas, diferente de Ho, Liu e Yan (2015) que simularam a fusão em uma geometria retangular como um atuador termicamente ativado.

Alguns autores focam seus estudos em PCMs de alta temperatura (acima 120°C), como é o caso de Guo e Zhang (2008), que realizaram simulação numérica e estudo paramétrico de um sistema de armazenamento térmico de alta temperatura de calor latente, e de Hengstberger *et al.* (2016), que analisaram o uso de PCMs para a proteção contra superaquecimento de fachadas com coletores solares integrados. Dentre os PCMs de baixa temperatura (até 120°C) está o ácido láurico, que foi estudado por Sari e Kaygusuz (2002) a fim de determinar suas características térmicas e de transferência de calor em um sistema de armazenamento de calor latente, onde foi observado que o ácido láurico é um material adequado para armazenamento de energia térmica em aplicações espaciais e de aquecimento com efeito estufa. Em forma de compósito, ácido láurico e perlita expandida, foram estudados por Sari, Karaipekli e Alkan (2009), buscando caracterizar um novo PCM. Estes autores concluíram que o compósito é um promissor candidato como gesso armazenador de energia ou material de reboco para aplicações com armazenamento de energia térmica, visto que possui propriedades térmicas satisfatórias, preparação simples e usabilidade direta, sem a necessidade de encapsulamento extra. Desgrosseilliers *et al.* (2011) aplicaram o ácido láurico em um sistema de armazenamento de energia de calor latente juntamente com um sistema térmico solar para aquecimento de água doméstica, verificando que com apenas um compartimento de PCM termicamente isolado e um trocador de calor de superfície estendida otimizada, o LHTES rudimentar se mostrou uma alternativa promissora para o desenvolvimento de um LHTES em escala real para aplicações residenciais e comerciais de sistemas solares de aquecimento de água.

A fim de determinar novas informações sobre o processo de mudança de fase do ácido láurico, uma abordagem por simulação numérica é utilizada a fim de contemplar fenômenos termodinâmicos que seriam muito difíceis de serem observados e estudados experimentalmente. Este trabalho tem como objetivo investigar numericamente o processo de fusão do PCM ácido láurico, complementando resultados experimentais disponíveis na literatura. A geometria do recipiente, as condições iniciais e as condições de contorno das simulações são baseadas no trabalho de Shokouhmand e Kamkari (2013), a fim de validar os resultados obtidos. Os mecanismos de transferência de calor envolvidos no processo (radiação e convecção) são analisados por meio de campos de temperatura e de velocidade, juntamente com a evolução da fração líquida ao longo do tempo.

2. MODELO FÍSICO

A unidade de armazenamento possui as seguintes dimensões: 50 mm de largura, 120 mm de altura e 50 mm de profundidade. Ela é isolada termicamente e recebe calor apenas através da parede de alumínio da direita, cuja espessura é de 35 mm. As demais paredes foram isoladas com Plexiglass transparente (condutividade térmica $k_1 = 0,19 \text{ W/m K}$) de 25 mm de espessura (e_1) e EPDM ($k_2 = 0,245 \text{ W/m K}$) de 3 cm de espessura (e_2). Uma representação esquemática do recipiente térmico é mostrada na Fig. 1.

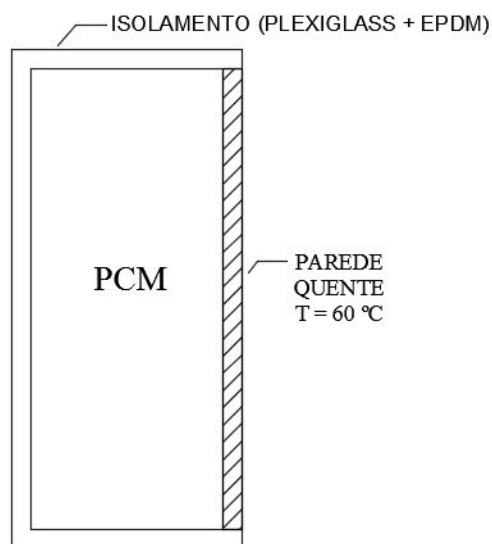


Figura 1. Desenho esquemático.

2.1 Equações governantes

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

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

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

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

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

onde t é o tempo, p é a pressão, $\vec{V}$ é o vetor velocidade, g é a gravidade, γ_n é a n -ésima fração volumétrica na célula computacional. A entalpia do sistema foi definida como a soma da entalpia sensível (h_s) e a variação da entalpia latente (γL), onde h_{ref} é a entalpia de referência na temperatura de referência (T_{ref}), c_p é o calor específico, γ é a fração líquida durante a troca de fase que ocorre dentro do intervalo de temperatura $T_{solidus} < T < T_{liquidus}$, e L é a entalpia específica da fusão/solidificação (calor latente do material). A equação para o cálculo dessa variável é definida conforme abaixo (Shmueli *et al.*, 2010):

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

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

O modelo trata a mushy zone, que consiste uma zona de transição líquido-sólido, como uma zona cuja porosidade é igual à fração líquida na célula computacional. Em regiões totalmente solidificadas, a porosidade é tida como sendo nula, juntamente com as velocidades de fluxo do material. Devido à esta redução de porosidade em função da fração líquida, o termo $\vec{S}$ da Eq. (2) é descrito conforme a equação abaixo (Assis *et al.*, 2007):

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

onde $A(\gamma)$ é a "função da porosidade" definida por Brent *et al.* (1988) e representada pela seguinte equação:

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

onde ε é uma constante de valor 0,001, utilizada para evitar a divisão por zero e C é uma constante que depende da morfologia da mushy zone (Voller e Prakash, 1987). A fração líquida (γ) para diferentes instantes de tempo é obtida através da Eq. 9, adaptada a partir da equação apresentada por Shmueli *et al.* (2010):

$$\gamma_{(t)} = \frac{V_{(t)}}{V_{(t=0)}} \quad (9)$$

onde V é o volume ocupado pelo PCM na fase líquida.

2.2 Condições iniciais, de contorno e de simulação

Inicialmente, a unidade está completamente *preenchida* com PCM sólido, à 26°C. A parede direita é aquecida a uma temperatura constante de 60°C e, conforme a fusão evolui, o excesso de PCM líquido dentro da unidade, devido à variação volumétrica, é retirado, a fim de manter a pressão constante. Para simular esta condição, foi criada uma abertura no domínio computacional, posicionada no canto superior direito com 2 mm de largura. Esta abertura foi modelada como "pressure-outlet", com pressão manométrica de 0 Pa e temperatura de 60°C.

As paredes da unidade foram consideradas na condição de não deslizamento (no-slip). O esquema PRESTO foi utilizado para a equação de correção da pressão, SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade e First Order Upwind para resolver as equações de quantidade de movimento e energia. Utilizou-se um time-step de 0,1 segundos, com limite máximo de 1000 iterações por time-step. Para os critérios de convergência, utilizou-se valores de 10^{-5} para as equações de velocidade e de continuidade, e de 10^{-8} para a equação de energia.

A fim de verificar a eficiência do isolamento, calculou-se o valor do coeficiente global de transferência de calor (U), através da Eq. 10, com coeficiente de transferência de calor das paredes ($h = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$) e com informações de condutividade térmica das camadas de isolamento informadas anteriormente. O valor encontrado para U foi de $2,638 \text{ W/m}^2\text{K}$. Comparando as simulações para a malha MI com U igual a zero (paredes adiabáticas) e $2,638 \text{ W/m}^2\text{K}$, foi observada uma pequena variação na taxa de derretimento, evidenciando que as perdas de calor nas paredes tiveram pouca influência sobre os resultados obtidos. Assim, os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos considerando-se paredes adiabáticas, para fins de simplificação e redução do tempo de simulação.

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h} + \frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2}} \quad (10)$$

As malhas computacionais foram criadas no módulo ANSYS-ICEM e são do tipo estruturadas hexaédricas e bidimensionais. Durante o processo de fusão, os maiores gradientes de temperatura e velocidade são encontrados próximos às paredes sólidas. Assim, nestas regiões, a malha computacional recebeu maior refinamento, conforme pode ser observado na Fig. 2.

Para análise de independência de malha, foram testadas três malhas computacionais com diferentes números de elementos: (a) 79×199 (MI), (b) 54×139 (ME) e (c) 104×259 (MA), onde MI , ME e MA representam as malhas computacionais intermediária, menos refinada e mais refinada, respectivamente.

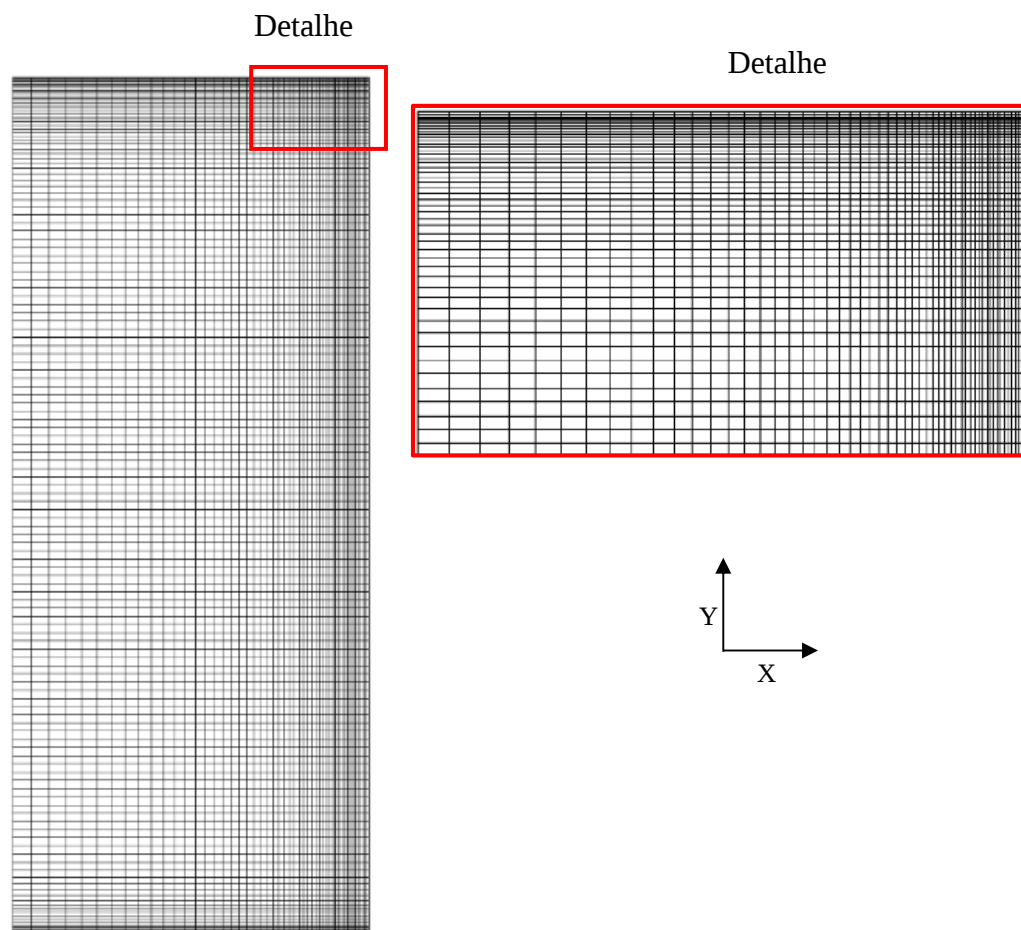


Figura 2. Malha computacional.

O PCM utilizado, ácido láurico, também conhecido como ácido dodecanóico ($C_{12}H_{24}O_2$), é um ácido graxo que está presente em diversas gorduras vegetais, em especial nas que provêm do coco e da semente da palma. Foram utilizados os valores da condutividade térmica (k), do calor específico (cp), da massa específica (ρ), do calor latente de fusão (L), das temperaturas de fusão (T_f) e de solidificação (T_s) apresentados por Shokouhmand e Kamkari (2013) e informados nas Tab. 1 e 2.

Tabela 1. Propriedades Termofísicas do Ácido Láurico.

cp (kJ/kg K)		L (kJ/kg)	ρ (kg/m ³)		T (°C)	
l	s		l	s	l	s
2,18	2,39	187,21	940	885	43,5	48,2

Considerou-se ρ da fase sólida do ácido láurico como constante. Já os valores de ρ da fase líquida foram obtidos a partir dos estudos de Chuah *et al.* (2006), sendo: de 870 kg/m³ para 50°C, 862 kg/m³ para 60°C e 852 kg/m³ para 75°C. Os valores de ρ , de k (Tab. 2) e μ (Tab.3, Valeri e Meirelles (1997)), para diferentes temperaturas, foram obtidas por interpolação linear.

Tabela 2. Condutividade Térmica do Ácido Láurico.

T (°C)	20	30	40	50	55	60	65	70
k (W/m K)	0,161	0,159	0,158	0,145	0,143	0,142	0,139	0,138

Tabela 3. Viscosidade Dinâmica do Ácido Láurico.

T (°C)	48,2	49	60	71	82	99	110
μ (kg/m s)	0,00760	0,00747	0,00542	0,00428	0,00338	0,00250	0,00210

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A constante C , presente na Eq. 8, é responsável pela intensidade de mudança de fase na unidade de tempo. O valor desta constante depende do tipo de PCM utilizado e, para o ácido láurico, ainda não foram encontrados valores na literatura. Assim, faz-se necessário uma calibração do modelo numérico em termos da constante C . A Fig. 3 apresenta resultados da fração de líquido pelo tempo, obtidos através do software ANSYS CFD-Post 16.1, para valores de C de 10^9 , 10^{10} e 10^{11} , comparando estes com os resultados experimentais de Shokouhmand e Kamkari (2013), onde é possível observar que o valor de C que melhor reproduziu o processo experimental de fusão foi o de 10^{11} .

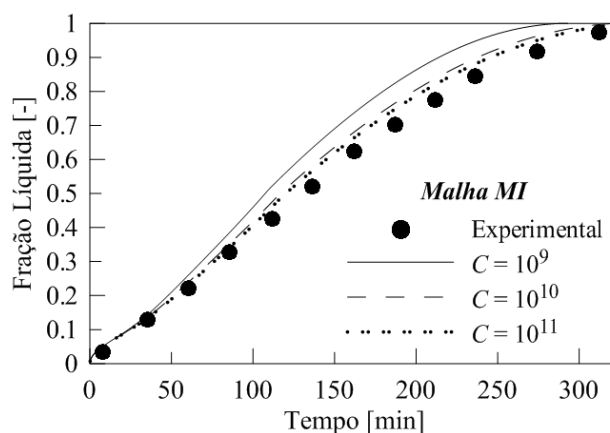


Figura 3. Fração líquida vs. tempo para malha MI.

A fim de analisar a influência do refinamento da malha sobre os resultados apresentados na Fig. 3 (malha MI), simulações com as malhas ME e MA também foram realizadas. Para valores de $C = 10^9$, 10^{10} e 10^{11} , as Fig. 4(a-c), respectivamente, apresentam resultados de fração de líquido ao longo do tempo obtidos de forma experimental e com as três malhas construídas. Nestas figuras pode-se observar que houve pouca variação entre os resultados com $C = 10^{10}$ e 10^{11} , evidenciando uma convergência dos resultados da fração de líquido dentro dessa faixa, não havendo efeitos significativos com o aumento do parâmetro C a partir de 10^{11} .

Embora quantitativamente a malha ME tenha apresentado resultados mais próximos aos experimentais, foi observada uma diferença significativa nos resultados qualitativos, quando comparados com aqueles obtidos experimentalmente por Shokouhmand e Kamkari (2013). As Figs. 5(a-d) apresentam campos de fração líquida para o tempo de 110 min, obtidos experimentalmente e com as malhas ME, MI e MA, respectivamente, com $C = 10^{11}$. As cores preto e vermelho representam a fase líquida, enquanto que cinza e azul representam a fase sólida. Comparando-se os diferentes resultados, pode-se verificar que, entre aqueles obtidos com as diferentes malhas, o que se aproximou mais do campo de fração líquida experimental foi o da malha mais refinada (MA). Muito provavelmente a maior quantidade de elementos

possibilitou melhor captação dos gradientes de temperatura e velocidade. No entanto, conforme observado na Fig. 4(c), a malha *ME* foi a que apresentou resultados mais próximos dos experimentais. Apesar disso, deve-se observar que aqueles resultados (da Fig. 4(c)), não apresentam diferenças significativas entre si. Em função destas observações, a continuidade do trabalho foi realizada com malhas *MA*, a mais refinada.

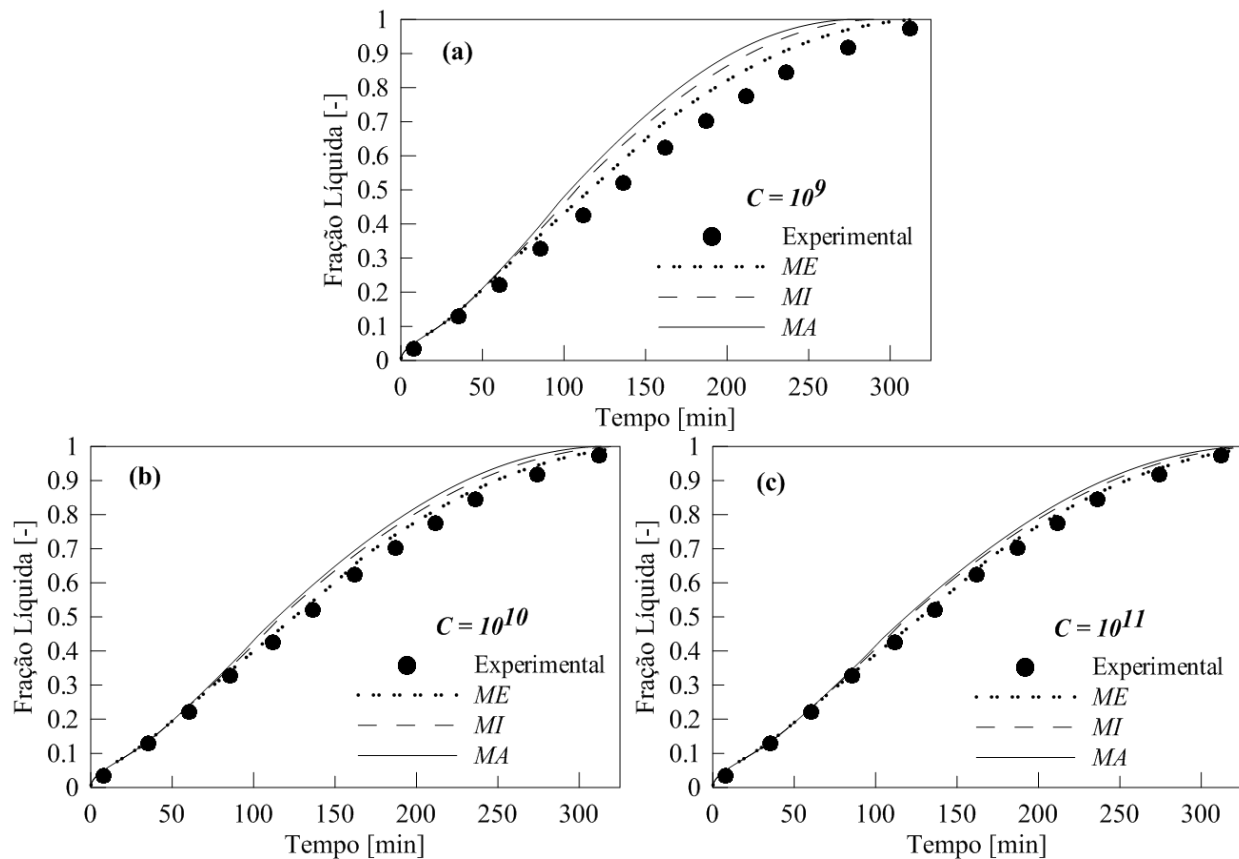


Figura 4. Fração líquida vs. tempo, para *ME*, *MI* e *MA*: (a) $C = 10^9$; (b) $C = 10^{10}$ e (c) $C = 10^{11}$.

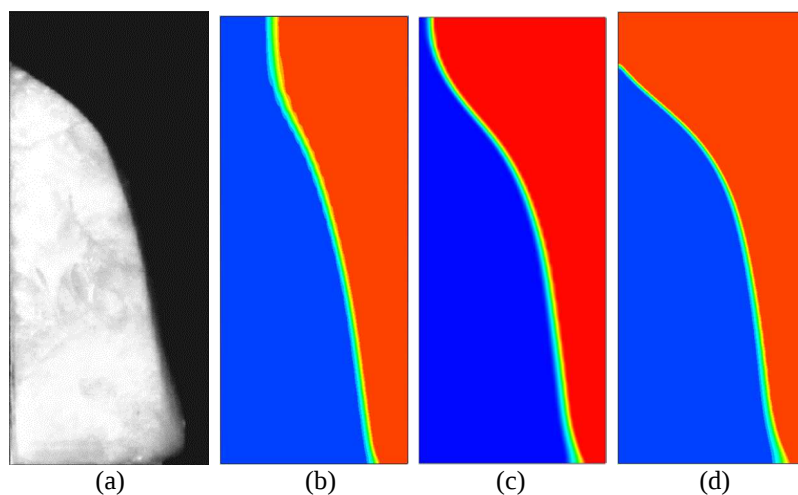


Figura 5. Fração líquida para o tempo de 110 minutos com: (a) experimental, (b) *ME*, (c) *MI* e (d) *MA*.

As Figs. 6(a-d) mostram campos de fração líquida para a malha *MA*, nos tempos de 10, 50, 130 e 230, respectivamente, obtidos de forma experimental e numérica, com $C = 10^{10}$ e 10^{11} . Pode-se observar uma concordância significativa entre os resultados experimentais e numéricos. Em cada bloco a primeira imagem corresponde ao experimental, a segunda corresponde a $C = 10^{10}$ e a terceira a $C = 10^{11}$.

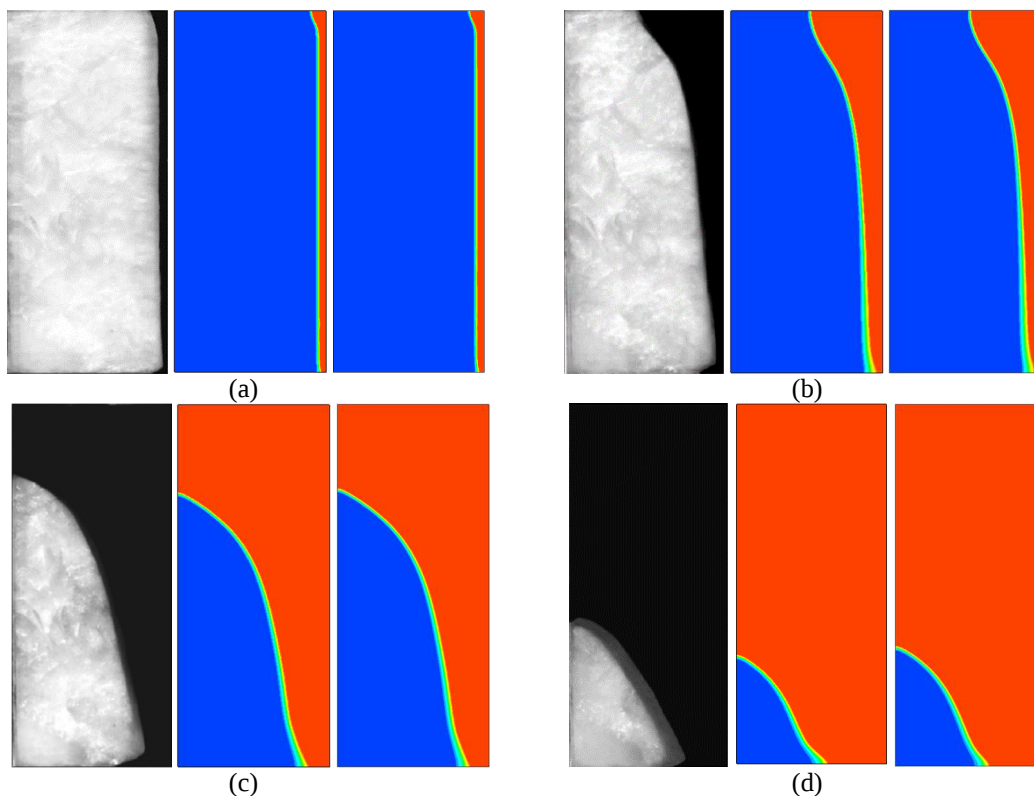


Figura 6. Fração líquida: (a) 10 min (b) 50 min (c) 130 min (d) 230 min.

As Figs. 7(a-b) apresentam campos de velocidade para os tempos de 30 e 130 min, respectivamente. Estes resultados foram obtidos com a malha MA e com $C = 10^{11}$, cuja configuração representou de maneira mais aproximada, de forma quantitativa e qualitativa, os resultados experimentais. Pode-se observar que as maiores velocidades do PCM líquido estão localizadas próximo da parede quente (à direita), onde o material é aquecido e sua massa específica reduzida. Esta diferença de massa específica faz com que ocorra um escoamento ascendente do PCM líquido em direção ao topo do recipiente, de encontro à região quente. Escoamentos também foram detectados na interface entre o PCM sólido e líquido, onde o material quente proveniente da região superior do recipiente é resfriado em contato com sólido, de temperatura mais baixa.

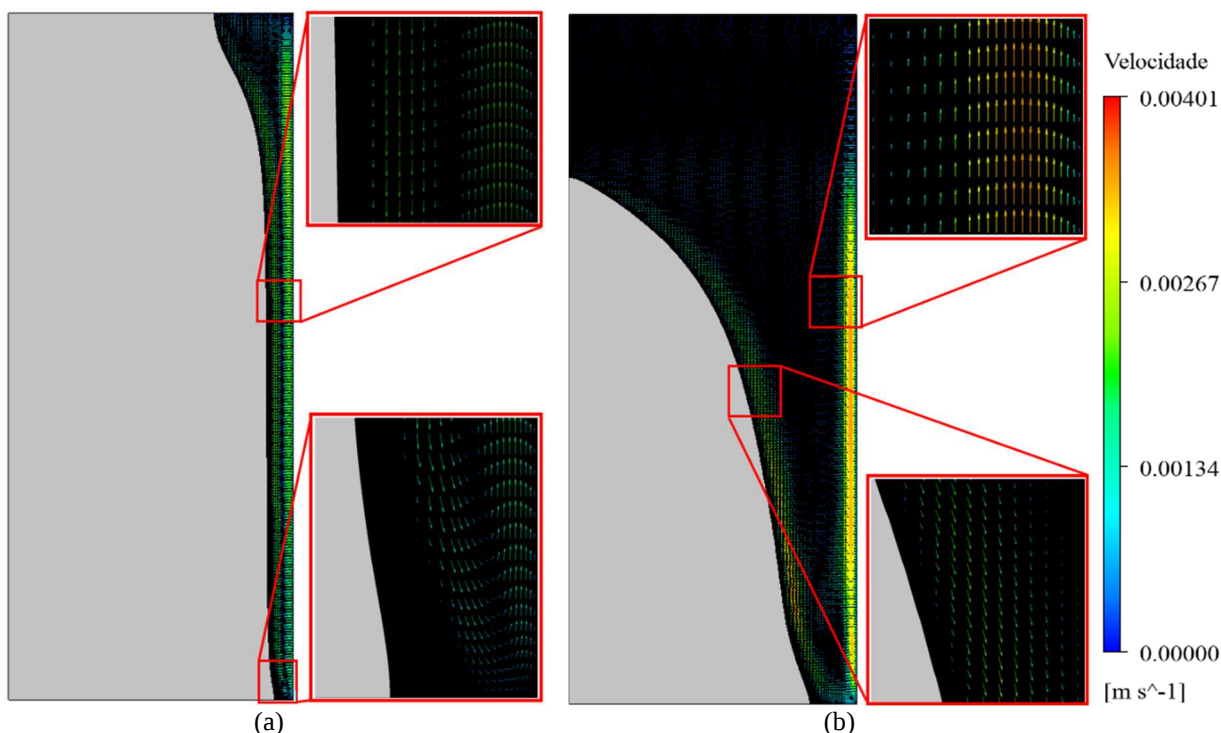


Figura 7. Campos de velocidade de PCM líquido em: (a) 30 min e (b) 130 min.

As Figs. 8(a-d) mostram campos de temperatura para os tempos de 10, 50, 170 e 230 min, respectivamente. Com estes campos, pode-se observar que, nos instantes iniciais (Figs. 8(a-b)) o processo de transferência de calor é dominado pela condução, enquanto que, nos estágios finais (Figs. 8(c-d)), o processo dominante é a convecção natural. Nestas últimas figuras pode-se observar a clara estratificação térmica da fase líquida do ácido láurico, sempre até a altura corresponde à fase sólida. Nesta região também pode-se observar a camada limite térmica junto à parede vertical direita. O escoamento ascendente, mostrado na Fig. 7(b), faz com que, quantidades de massa com diferentes temperatura sejam deslocadas para uma mesma região. Pela ação do empuxo, essas quantidades de massa com diferentes temperatura tendem a se deslocar para regiões de mesma massa específica, ocorrendo um pequeno retorno de parte do escoamento ascendente, o que pode ser observado pela pequena descontinuidade das isotermais horizontais junto à parede vertical. Acima da região sólida a temperatura é praticamente isotérmica na maior temperatura do sistema, condição esta típica de processos de convecção natural.

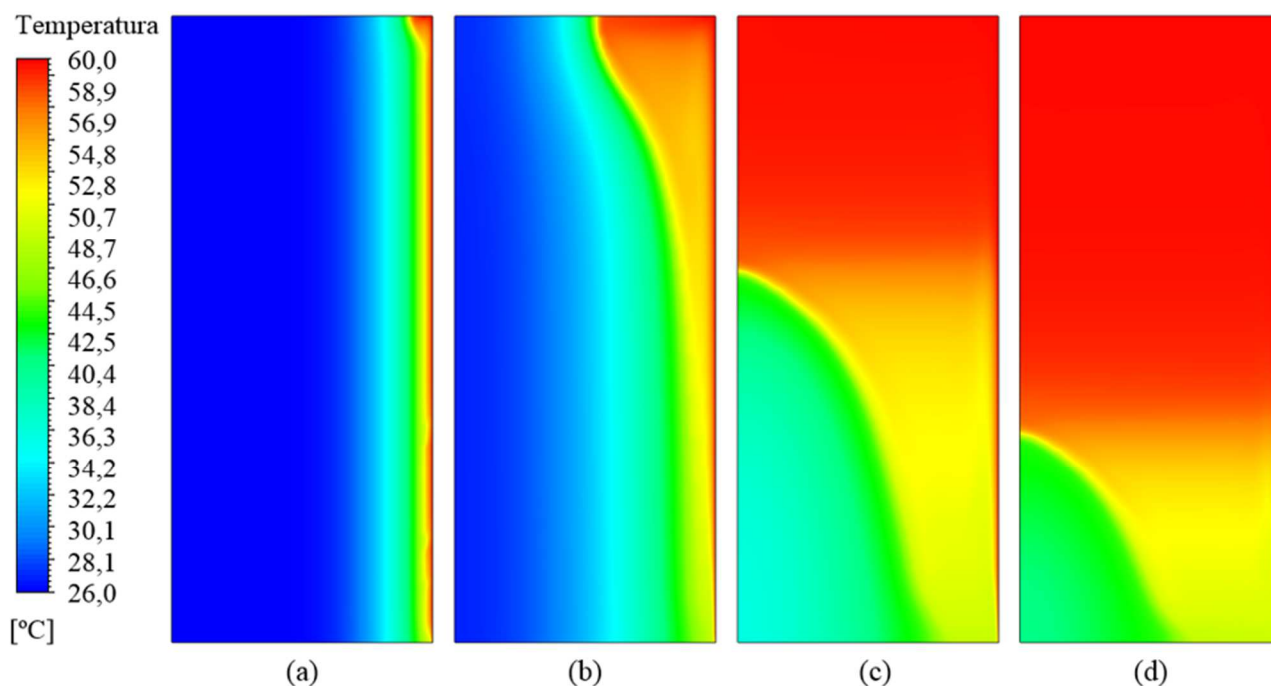


Figura 8. Campos de temperatura em: (a) 10 min, (b) 50 min, (c) 170 min e (d) 230 min.

4. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho era simular o comportamento de fusão do PCM ácido láurico. Para isso foi implementado um modelo matemático e os resultados foram comparados com resultados experimentais da literatura. Além disso, foi realizada análise de independência de malha computacional, bem como da influência do parâmetro C do modelo de mudança de fase. Com os resultados apresentados, pode-se dizer que:

- a simulação numérica foi capaz de prever com boa precisão o comportamento da convecção natural e sua atuação sobre a evolução da fração líquida, evidenciada pela maior taxa de derretimento na região superior da fração sólida do PCM;
- a presença de recirculações na parte superior do recipiente influencia consideravelmente o perfil irregular de da fase sólida, visto que a presença dessas recirculações aumenta a transferência de calor. O escoamento de PCM líquido não só aumenta a transferência de calor na região de contato com a mushy zone, como também desgasta a superfície do PCM sólido. Desta forma, a convecção natural é o mecanismo mais influente no processo de fusão, e seu comportamento deve ser levado em consideração no projeto de recipientes de PCMs e na escolha do PCM adequado;
- o parâmetro C da ordem de 10^{11} reproduziu de forma satisfatória a fusão do ácido láurico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERGS, CAPES e UNISINOS, pelo apoio financeiro para produção desta pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

- Al-Abidi, A.A., S. Mat, K. Sopian, M.Y. Sulaiman and A.T. Mohammad. 2013. Numerical study of PCM solidification in a triplex tube heat exchanger with internal and external fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 61:684-695.
- ANSYS FLUENT, 2013. Release 14.0. Solver modeling guide.
- Assis, E., L. Katsman, G. Ziskind, and R. Letan. 2007. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50:1790-1804.
- Brent, A.D., V.R. Voller, and K.J. Reid. 1988. Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal. *Numerical Heat Transfer* 13:297-318.
- Castell, A., I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez and L.F. Cabeza. 2010. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings* 42:534-540.
- Chuah, T.G., D. Rozanna, A. Salmiah, S.Y.T. Choong, and M. Sa'ari. 2006. Fatty acids used as phase change materials (PCMs) for thermal energy storage in building material applications. *JURUTERA* 8-15.
- Desgrosseilliers, L., R. Murray, A. Safatli, G. Marin, J. Stewart, N. Osbourne, M.A. White and D. Groulx. 2011. Phase change material selection in the design of a latent heat energy storage system coupled with a domestic hot water solar thermal system. *ASHRAE Transactions* 117:183-190.
- Guo, C., and W. Zhang. 2008. Numerical simulation and parametric study on new type of high temperature latent heat thermal energy storage system. *Energy Conversion and Management* 49:919-927.
- Hengstberger, F., C. Zauner, K. Reschb, S. Holper, M. Grobbauer. 2016. High temperature phase change materials for the overheating protection of facade integrated solar thermal collectors. *Energy and Buildings* 124:1-6.
- Ho, C.J., K.C. Liu and W.M. Yan. 2015. Simulation on melting processes in a vertical rectangular enclosure with a free-moving ceiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 83:222-228.
- Jmal, I. and M. Baccar. 2015. Numerical study of PCM solidification in a finned tube thermal storage including natural convection. *Applied Thermal Engineering* 84:320-330.
- Kamkari, B., H. Shokouhmand and F. Bruno. 2014. Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 72:186-200.
- Kousksou, T., M. Mahdaoui, A. Ahmed and J. Batina. 2014. Numerical simulation of PCM melting over a wavy surface. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 24:1660-1669.
- Moreno, P., C. Solé, A. Castell, and L.F. Cabeza. 2014. The use of phase change materials in domestic heat pump and air-conditioning systems for short term storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39:1-13.
- Rathod, M.K. and J. Banerjee. 2014. Experimental investigations on latent heat storage unit using paraffin wax as phase change material. *Experimental Heat Transfer* 27:40-55.
- Sari, A., A. Karaipikli and C. Alkan. 2009. Preparation, characterization and thermal properties of lauric acid/expanded perlite as novel form-stable composite phase change material. *Chemical Engineering Journal* 155:899-904.
- Sari, A. and K. Kaygusuz. 2002. Thermal and heat transfer characteristics in a latent heat storage system using lauric acid. *Energy Conversion and Management* 43:2493-2507.
- Shmueli, H., G. Ziskind, and R. Letan. 2010. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53:4082-4091.
- Shokouhmand, H., and B. Kamkari. 2013. Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit. *Experimental Thermal and Fluid Science* 50:201-212.
- Valeri, D., and A.J.A Meirelles. 1997. Viscosities of fatty acids, triglycerides, and their binary mixtures. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 74:1221-1226.
- Voller, V.R., and C. Prakash. 1987. A fixed grid numerical modeling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 30:1709-1719.
- Wang, P., H. Yao, Z. Lan, Z. Peng, Y. Huang and Y. Ding. 2016. Numerical investigation of PCM melting process in sleeve tube with internal fins. *Energy Conversion and Management* 110:428-435.

ANALYSIS OF THE MELTING PROCESS OF LAURIC ACID IN RECTANGULAR CAVITY

Abstract. Thermal storage is important in both industrial and daily applications, such as isothermal maintenance of processes, food conservation and climatization. The thermal storage with phase change has some advantages over the monophasic one. This article presents a numerical analysis using CFD (Computational Fluid Dynamics) of a PCM (Phase Change Material) melting process. In this case, the PCM used is pure lauric acid. The analysis is performed on a rectangular enclosure. The numeric model is composed by the mass, energy and momentum conservation equations, together with the phase change model. The study consists in validate the methodology employed, comparing the numerical results with experimental results from literature. No slip condition was used as a boundary condition for the cavity walls, together with a prescribed temperature for a vertical wall of the enclosure. The lauric acid's thermodynamic behavior during the melting was available with a view to its use as a PCM. Temperature fields, velocity fields and liquid fraction evolution through time are presented, showing that the C parameter that better represents the melting of lauric acid is 10^{11} , and that the natural convection is the most influent mechanism during the melting.

Key words: Lauric acid, CFD, Melting, PCM