

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO POSICIONAMENTO DE ALETA EM CAVIDADE RETANGULAR  
CONTENDO PCM EM MUDANÇA DE FASE

Alexandre de Quadro Tacques Filho – alexandretacques@gmail.com

Ionatan A. Schroer – ionatan.schroer@gmail.com

Rejane de César Oliveski – decesar@unisin.br

Laboratório de Simulação Numérica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisin), www.unisin.br

F3 – Cálculo, Projeto e Simulação Termo Energética

**Resumo.** *Sistemas que propõem o gerenciamento de recursos naturais possuem inúmeros empregos na engenharia. Tendo em vista a questão energética, sistemas de armazenamento de calor são constantemente analisados para que ganhos de eficiência sejam obtidos. As três principais formas de armazenamento de energia térmica são: calor sensível, calor latente e energia termoquímica. No presente trabalho, analisa-se por CFD o processo de fusão de um material de mudança de fase numa cavidade retangular aletada, tendo a variação no posicionamento da aleta ao longo da fonte de calor. O objetivo é avaliar a influência do seu posicionamento em relação à cavidade para o aprimoramento de sistemas energéticos. Em se tratando de PCM, uma vez que estes materiais armazenam ou liberam calor latente, o processo ocorre à temperatura constante. Para esta análise, utiliza-se o software ANSYS® FLUENT 19.2, considerando que o problema é bidimensional e transiente. Para o problema em questão, o modelo matemático utilizado é composto pelas equações de conservação de massa, energia e movimento, acrescido do modelo de mudança de fase. O modelo matemático foi validado com resultados experimentais. São apresentados resultados de tempo total de fusão, fração líquida bem como os campos de temperatura e de velocidade. Os resultados mostram que o posicionamento da aleta tem influência direta no tempo total de fusão do PCM. Quanto mais próxima a parte inferior da cavidade, maior a transferência de calor. Em outras palavras, quanto maior a exposição da fração sólida do PCM à ação da aleta, menor o tempo de fusão do PCM.*

**Palavras-chave:** Materiais de mudança de fase (PCM), Fusão, Fluidodinâmica computacional, Simulação numérica.

## 1. INTRODUÇÃO

Profissionais de engenharia que atuam na área energética trabalham constantemente sob um duplo desafio: a crescente demanda de energia e a urgência pela redução do impacto ambiental na geração de energia. As três principais formas de armazenamento de energia térmica são: calor sensível, calor latente e energia termoquímica, através de reações químicas. Enquanto o calor sensível está associado a uma variação de temperatura, o calor latente está associado à mudança de fase.

Na difícil busca por eficiência energética, sistemas que armazenam calor latente (LHESS) são particularmente atraídos. Os processos de mudança de fase apresentam excepcional capacidade de armazenamento em pequenos volumes (Agyenim et al., 2010) (Nkwetta; Haghghat, 2014). Por outro lado, normalmente, materiais de mudança de fase apresentam baixa condutividade térmica. Para explorar melhor as vantagens energéticas dos processos de mudança de fase, muitas aplicações têm sido desenvolvidas na academia e na indústria de modo a otimizar um LHESS para certa aplicação de engenharia, tais como na biomedicina (Zhang, 2001), construção civil (Cheng et al., 2020; Dong et al., 2020), indústria automotiva (Jaguemont et al., 2018), indústria têxtil (Oliveira et al., 2013), em dispositivos eletrônicos (Ho et al., 2020) e em plantas de energia solar (Gautam e Saini, 2020; Nazir et al., 2019; Pielichowska e Pielichowski, 2014).

Nos LHESS, o calor é armazenado em Materiais de Mudança de Fase (PCM, Phase Change Material), onde o material funde ao absorver o calor de uma fonte externa e solidifica ao ceder calor (Alva, Lin e Fang, 2018; Crespo et al., 2019; Du et al., 2018; Jaguemont et al., 2018; Lin et al., 2018). Os mecanismos governantes de transferência de calor nos processos de fusão e de solidificação são a condução e a convecção natural (Abdi, Martin e Chiu, 2019; Kabbara, Groulx e Joseph, 2018; Mahdi e Nsofor, 2018; Eslamnezhad e Rahimi, 2017; Seddegh et al., 2017; Fan et al., 2016; Dhaidan e Khodadadi, 2015;). Assim sendo, no sentido de controlar estes fenômenos, algumas técnicas são propostas para: (a) aumentar sua condutividade térmica do PCM (pela inclusão de material altamente condutivo, poroso ou fibroso) (Darkwa e Zhou, 2011; Cheng et al., 2010; Zhang et al., 2006) e/ou (b) propor diferentes técnicas de encapsulamento de modo a otimizar a distribuição do fluxo de calor (Tabassum, Hasan e Begum, 2020; Han et al., 2017; Soares et al., 2013)

Neste contexto é possível encontrar uma considerável utilização de diferentes geometrias. No campo das geometrias cilíndricas, por exemplo, observa-se um grande potencial econômico uma vez que muitos sistemas de engenharia são construídos por tubos (Abdulateef et al., 2018). Deste grupo, pode-se extrair uma relação direta entre a intensidade do fluxo de calor com a velocidade de fusão/solidificação (Li et al., 2020; Mahdi et al., 2020). Isto ocorre devido à variação da resistência térmica do sistema, que diminui com o aumento do fluxo. Isto porque a resistência térmica diminui como consequência da intensificação do campo convectivo – onde se observam os maiores gradientes de transferência de calor. Este avanço tecnológico permite a criação de sistemas mais eficientes, uma vez que une a capacidade de armazenamento do PCM com a sua disposição de forma mais rápida. Pode-se dizer o mesmo para sistemas de geometria esférica, onde a literatura reforça a grande influência das condições térmicas e geométricas na performance de um LHESS (Kenisarin et

al., 2020; Bechiri, Mansouri e Saleem, 2020; Junior et al., 2018; Li et al., 2017; Assis, Ziskind e Letan, 2009). Mesmo que exista a dificuldade em descrever casos específicos numericamente estudados, como nos casos de *constrained melting* (Soni, Kumar e Jain, 2018; Li et al., 2017; Sattari et al., 2017), a literatura mostra concordância num aspecto: diferentes momentos da fusão têm mecanismos de transferência governantes distintos. Nos momentos iniciais do processo de fusão, por exemplo, a condução é o mecanismo dominante de transferência de calor. Ao fundir, o material começa a apresentar variações de massa específica em diferentes pontos - o que motiva a movimentação do líquido e contribui para intensificar a convecção natural. As forças de empuxo determinam o local de formação do perfil sólido-líquido, tendo efeito determinante na efetividade de um sistema (Al Siyabi et al., 2019; Duan, Xiong e Yang, 2020; Groulx, Biwolé e Bhourri, 2020; Hong et al., 2019; Joneidi et al., 2017; Kamkari e Amlashi, 2017; Kamkari e Groulx, 2018; Karami e Kamkari, 2019; Sathe e Dhoble, 2019). Estes autores demonstram isto ao qualificar e quantificar o processo de mudança de fase em PCM com diferentes condições de operação.

Notadamente, as aplicações de engenharia demandam diferentes técnicas para melhorar a performance dos LHSS. Para exemplificar, tem-se (1) a dispersão de partículas de alta condutividade no PCM, (2) a impregnação de material poroso com o PCM, (3) técnicas microencapsulamento para otimização da área de troca, (4) a construção de materiais metálicos na forma de aletas para melhor distribuição térmica. Neste sentido, a utilização de aletas desponta como uma das principais técnicas de controle do processo de fusão devido à sua alta aplicabilidade (Deng et al., 2019; Ji et al., 2018; Johnson et al., 2017; Li et al., 2018; Mahdi et al., 2018; Pu et al., 2020; Zhang et al., 2020; Zhao et al., 2020). Porém, aletas ocupam certo espaço físico, o que pode ser um problema caso a capacidade relativa de armazenamento seja pequena. Portanto, o projeto destes sistemas requer uma metodologia que avalie os diferentes aspectos da performance de um LHSS.

Ao avaliar os potenciais usos dos LHSS, é notável sua abrangente aplicabilidade em diversos setores. A literatura, por sua vez, também apresenta frequentes publicações nas diferentes geometrias estudadas, nas suas diferentes condições de operação, todas no estudo dos processos da mudança de fase. Portanto, pode-se dizer que os estudos citados fornecem um entendimento respeitável sobre os fenômenos envolvidos no processo de fusão de PCM em uma cavidade retangular aletada. De qualquer maneira, percebe-se a inexistência de uma análise específica sobre os efeitos do posicionamento da aleta, ao longo da fonte de calor vertical. Devido à complexidade prática na seleção de LHSS aletados, neste trabalho busca-se ampliar os conhecimentos teóricos explorados até então através da análise qualitativa e quantitativa do processo de mudança de fase de PCM.

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A geometria estudada é uma cavidade retangular aletada, conforme mostrado na Figura 1. As dimensões da cavidade são:  $H = 120$  mm,  $H_1 = 4$  mm,  $L = 50$  e  $L_1 = 25$  mm. Neste trabalho, a cavidade retangular genérica é estudada considerando três diferentes posições da aleta, onde  $H_2$  é igual a 90, 60 e 30 mm. As três geometrias criadas são mostradas na Fig. 1(a-d).

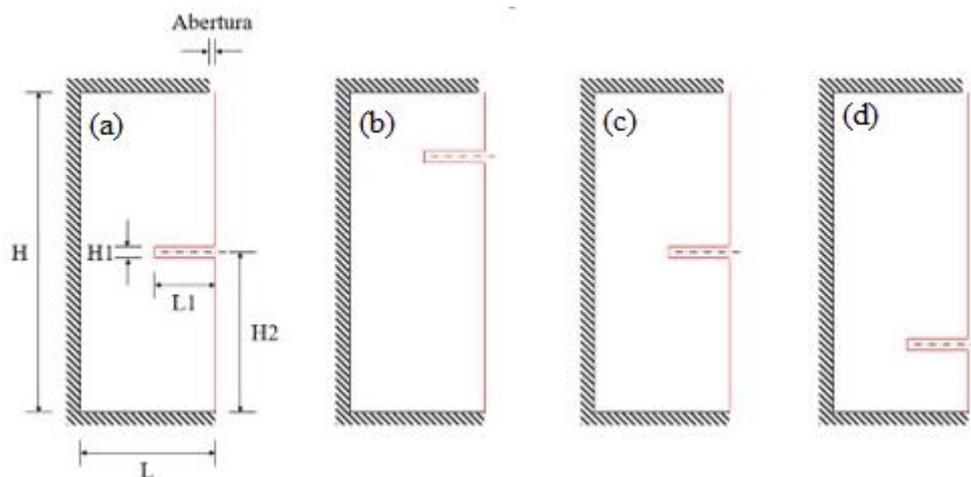


Figura 1. Vista transversal de cavidade aletada: (a) genérica; (b)  $H_2 = 90$  mm; (c)  $H_2 = 60$  mm e (d)  $H_2 = 30$  mm.

É importante ressaltar aqui que as dimensões em todas as cavidades há a mesma massa de PCM dentro da cavidade. Desta forma, é mantida a capacidade de armazenamento térmico do PCM. A cavidade é preenchida com o PCM Ácido Láurico. A mesma é exposta ao ambiente na abertura do canto superior direito da geometria. A temperatura externa ao domínio é de 343K. Para massa específica, utiliza-se a aproximação de Boussinesq tendo o valor de  $885$  ( $\text{kg/m}^3$ ) como referência. Os valores de temperatura de solidificação ( $T_s$ ) e de fusão ( $T_f$ ), do calor específico de solidificação ( $C_{p_s}$ ) e de fusão ( $C_{p_f}$ ), bem como do calor latente de fusão ( $L$ ) do Ácido Láurico são mostrados na Tab. 1. Já a variação da condutividade térmica ( $k$ ) e da viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), em função da temperatura, são mostradas nas Tab. 2 e Tab. 3, respectivamente.

Tabela 1. Propriedades termo físicas do Ácido Láurico

$C_p (J kg^{-1} K^{-1})$		$T (K)$		$L (J kg^{-1})$
$s$	$l$	$s$	$l$	
2180	2390	316,65	321,35	187210

Fonte: Shokouhmand e Kamkari (2013)

Tabela 2. Condutividade térmica do Ácido Láurico

$T (K)$	293	303	313	323	328	333	338	343
$k (W m^{-1}K^{-1})$	0,161	0,159	0,158	0,145	0,143	0,142	0,139	0,138

Fonte: Shokouhmand e Kamkari (2013)

Tabela 3. Viscosidade dinâmica do Ácido Láurico

$T (K)$	321,2	322	333	344	355	372	383
$\mu (kg m^{-1} s^{-1})$	0,0076	0,0074	0,0054	0,0043	0,0034	0,0025	0,0021

Fonte: Valeri e Meirelles (1997).

### 3 MODELO MATEMÁTICO

As equações governantes do problema são a da conservação da massa, quantidade de movimento e energia, mais as equações referentes ao processo de mudança de fase. O modelo utilizado para representar o processo de mudança de fase foi o proposto por Voller e Prakash (1987). Este método aplica a técnica de entalpia-porosidade, que equaciona as transformações que ocorrem na interface sólido-líquido, considerando-a como uma zona porosa. As equações da conservação da massa e energia são representadas por:

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

$$\frac{\partial(\rho \cdot \lambda)}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \nabla \cdot \lambda) = \nabla(k \cdot \nabla T) \quad (2)$$

onde  $\rho$  é a massa específica,  $t$  o tempo,  $\vec{V}$  o vetor velocidade,  $\lambda$  é a entalpia total, obtida na soma direta da entalpia sensível ( $\lambda_{se}$ ) e da variação de entalpia no processo de mudança de fase ( $\lambda_{la}$ ), mostradas na sequência, respectivamente.

$$\lambda_{se} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3)$$

$$\lambda_{la} = \beta L \quad (4)$$

onde  $\lambda_{ref}$  é a entalpia de referência (na temperatura de referência, 298K) e  $\beta$  a fração líquida, a qual é dependente de  $T_l$  e  $T_s$ , conforme Eq. 5.

$$\beta = \begin{cases} 0 & se & T < T_s \\ 1 & se & T > T_l \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & se & T_s < T < T_l \end{cases} \quad (5)$$

Por sua vez, tem-se a equação da quantidade de movimento (Eq. 6), onde um termo fonte ( $\vec{S}$ ) é adicionado.

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (6)$$

onde  $p$  é a pressão,  $\vec{g}$  é a aceleração da gravidade. O parâmetro  $\vec{S}$  é utilizado para satisfazer a condição de que todas as velocidades em regiões sólidas são iguais à zero. Na fase líquida  $\vec{S}$  é igual a zero, mas na fase será muito maior do que os

outros termos da equação, fazendo com que a velocidade seja zero. Na interface sólido-líquido o valor de  $\vec{S}$  é dominante em relação aos outros termos das equações governantes fazendo com que a velocidade seja variável. Em outras palavras, o princípio básico é de reduzir a velocidade a partir de um valor finito (na área de líquido total) até zero (na área de sólido total). Este parâmetro é obtido através da Eq. 7

$$\vec{S} = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3-\epsilon)} C_{mushy\ zone} \vec{V} \quad (7)$$

onde  $C_{mushy\ zone}$  é a constante que define a morfologia da região de mudança de fase. Esta constante determina a penetração dos campos convectivos na região de mudança de fase, podendo influenciar significativamente nos resultados. Neste trabalho, utiliza-se o valor de  $10 \times 10^7$ . Por fim,  $\epsilon$  é uma constante de valor suficientemente pequeno (0,0001) para evitar a divisão por zero.

Todas as paredes foram consideradas impermeáveis e sem deslizamento, com exceção da abertura, a qual foi considerada com escoamento livre. Foram consideradas adiabáticas as paredes da esquerda, inferior e superior, conforme indica as Eqs. (8 - 10), respectivamente. A parede direita e a aleta foram mantidas com temperatura prescrita e uniforme, conforme Eqs. (11, 12), respectivamente.

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0-H}} = 0 \quad (8)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\substack{x=0-W \\ y=0}} = 0 \quad (9)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=W-abertura \\ y=H}} = 0 \quad (10)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=W \\ y=0-H}} = T_a \quad (11)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=abertura \\ y=H}} = T_a \quad (12)$$

A parede vertical do lado direito da cavidade e a aleta estão submetidas a uma temperatura de aquecimento  $T_a = 343$  K. Na parede superior há uma abertura de 2 mm, rente à parede direita, para simular a saída do PCM durante o processo de fusão. O PCM foi submetido inicialmente a uma temperatura inicial ( $T_i$ ) de 298 K.

O problema foi resolvido através de fluidodinâmica computacional, com o software ANSYS FLUENT-19R2. Com ele, para o acoplamento pressão-velocidade, utilizou-se o método SIMPLE. O esquema PRESTO! (*pressure staggering option*) foi aplicado para a correção da pressão. Por questões de convergência, utilizou-se *Second Order Upwind* como método de discretização das equações diferenciais. O critério de convergência utilizado foi de  $1 \times 10^{-8}$  para a equação de energia e  $1 \times 10^{-5}$  para as equações da conservação da massa e de quantidade de movimento. O intervalo de tempo utilizado foi de 0.1 s.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE

Nesta Seção são apresentados resultados da análise da malha computacional, validação numérica e resultados do estudo de caso propriamente dito.

### 4.1 Análise de Malha e Validação Experimental

Para avaliar a influência das malhas computacionais, três malhas foram criadas [Fig. 2(a - c)], com: (a)  $12 \times 10^3$ , (b)  $22 \times 10^3$  e (c)  $39 \times 10^3$  elementos. Observa-se nestas figuras que, apenas do número de elementos serem diferentes, todas elas apresentam refinamento dos elementos junto as paredes ativas (aleta e parede vertical direita). Isto é feito justamente para que as malhas possam acompanhar os maiores gradientes térmicos e de velocidade do sistema. As mesmas foram testadas com o Índice de Convergência de Malha (GCI, Grid Convergence Index), apresentado por Celik et al. (2008), o qual é recomendado pela ASME (American Society of Mechanical Engineers). Os valores de GCI, para todo intervalo do processo de fusão, apresentam valor médio de, aproximadamente, 3.5%.

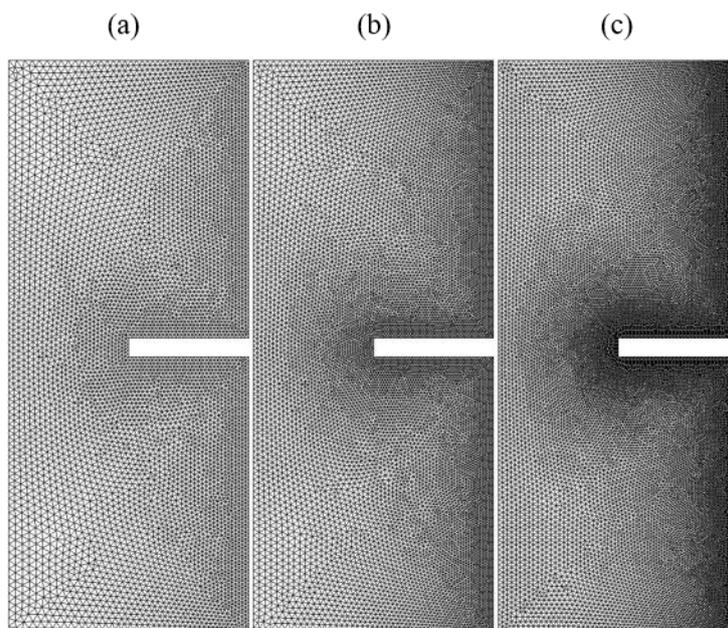


Figura 2. Malhas computacionais utilizadas: (a) Malha 1, (b) Malha 2, (c) Malha 3

Para validação numérica utilizou-se os resultados experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014). Neste caso, a fração líquida em função do tempo para as três malhas computacionais testadas são comparadas com os valores experimentais obtidos pelos autores e mostrados na Fig. 3. Nesta figura pode-se observar duas condições importante: (a) praticamente não existe diferença de resultados entre as malhas testadas e (b) as diferenças entre resultados numéricos e experimentais são muito pequenas ( $GCI = 3,4\%$ ).

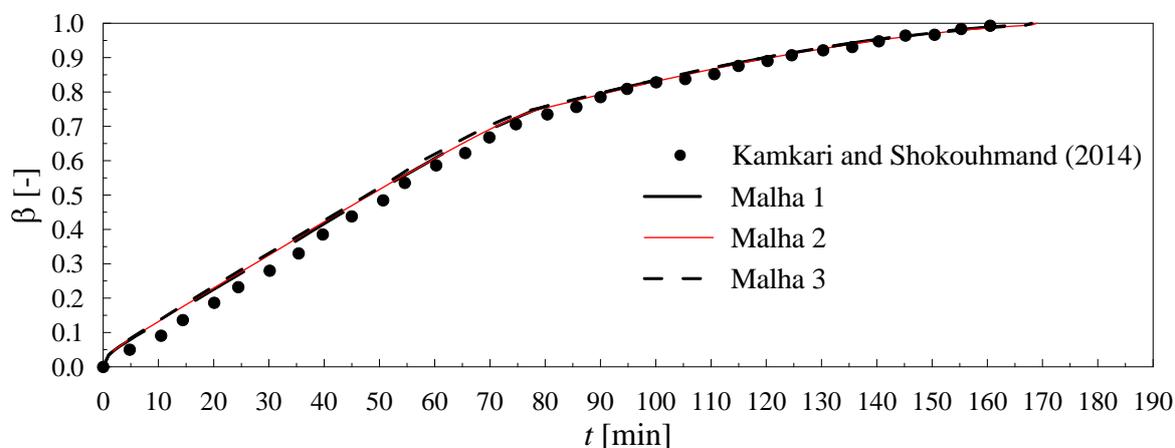


Figura 3. Fração líquida vs. Tempo

A Fig. 4(a - c) apresentam campos de temperatura para as três malhas testadas, em  $t = 60$  min. Nestas figuras, as cores em tom de azul representam a fase solidada e as cores nos tons de vermelho e amarelo representam a fase líquida da PCM. Nelas pode-se observar que, na fase líquida, estão presentes as maiores temperaturas do sistema – especialmente em áreas próximas à parede aletada e no topo da cavidade, onde também é observado estratificação térmica. Além das diferenças locais de temperatura, observa-se o contorno bem definido entre a fase sólida e líquida, quando as temperaturas se aproximam dos 321K, destacado pelo perfil em verde. Já na fase sólida é possível observar um gradiente de temperatura. Este gradiente se dá pelo armazenamento de calor sensível do PCM, o qual absorve calor sem mudar de fase. Isso ocorre porque a condição inicial do PCM foi de 23 K de sub resfriamento, em relação a temperatura de mudança de fase. Por último, observa-se que estes campos não apresentam grande variação entre si, mesmo em relação a malha menos refinada.

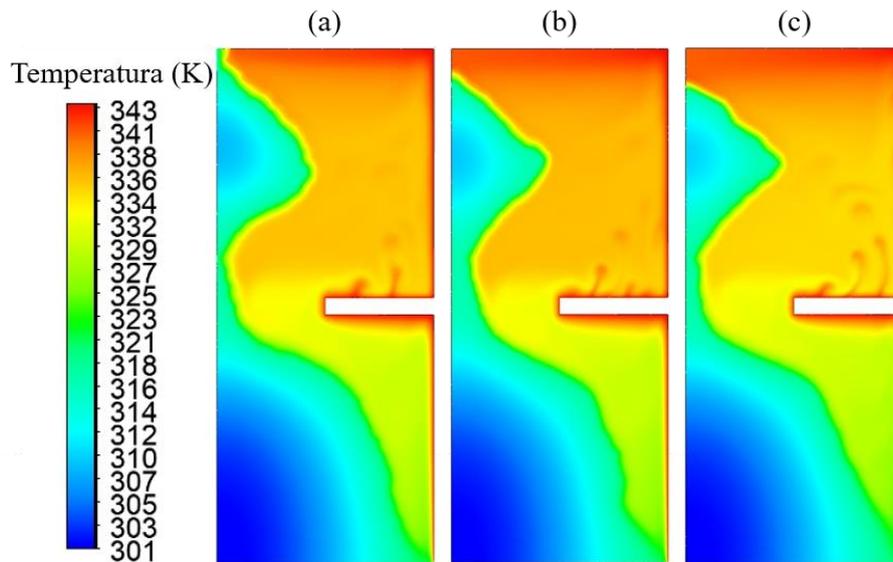


Figura 4. Campos de temperatura, para  $t = 60$  min: (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3

Com os resultados obtidos pelo método GCI e com a validação experimental, considera-se o modelo matemático validado e apto para estudo de caso.

#### 4.2 Influência da posição da aleta

Na Fig. 5 são mostrados perfis transientes de fração líquida para três posições de aleta ( $H_2 = 30, 60$  e  $90$  mm). Pode-se observar que nos instantes iniciais até, aproximadamente, 15 minutos, todas as configurações apresentam igual taxa de fusão do PCM. A partir deste momento a cavidade com  $H_2 = 90$  mm começa a apresentar menor taxa de fusão do PCM. O inverso ocorre para a posição de aleta mais próxima da base ( $H_2 = 30$  mm). Esta condição faz com que o tempo total de fusão seja maior na cavidade C1 e menor na cavidade C3, por exemplo. Esta ocorrência é justificada com os resultados que são apresentados na Fig. 6.

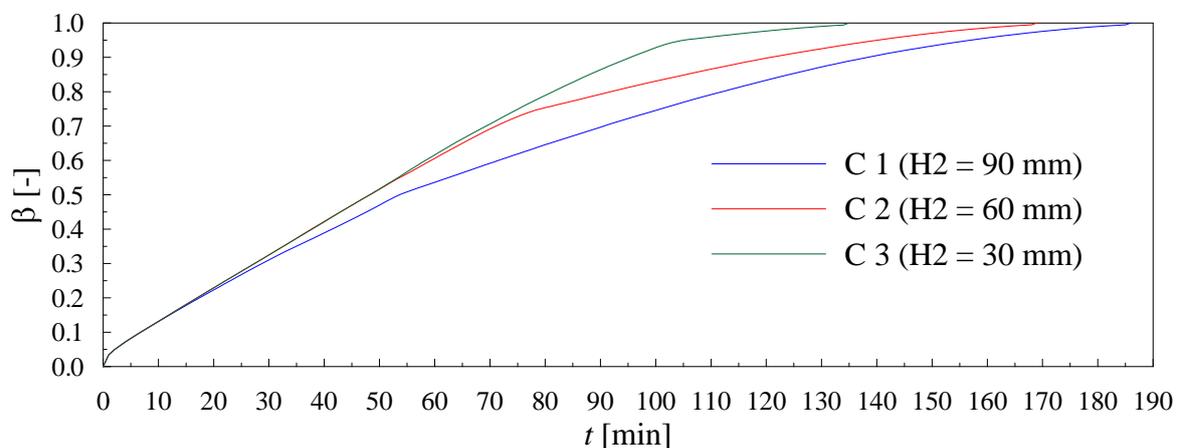


Figura 5. Fração líquida vs. Tempo, para diferentes posições da aleta

A influência da posição das aletas sobre a taxa de resfriamento pode ser justificada através dos campos de velocidades mostrados nas Fig. 6(a - c), para as cavidades C1, C2 e C3, respectivamente. Inicialmente, estas figuras mostram que a fração sólida, independentemente da posição da aleta, se concentra na parte inferior da cavidade. Isto acontece por consequência da direção das forças gravitacionais. Uma vez que a parede da direita é aquecida em relação ao PCM, uma corrente convectiva ascende para o topo da cavidade e, pela conservação da massa, uma corrente convectiva descende. Isto promove duas grandes recirculações: uma acima e outra abaixo da aleta. Observando a Fig. 6(a), percebe-se que a aleta tem seus efeitos na transferência de calor reduzidos, por estar mais distante da fração sólida de PCM. Isto é perceptível pela menor presença de recirculações. Comparando-se a intensidade de recirculações, entre os resultados mostrados nas Fig. 8(a - c), pode-se observar que a aleta inferior, Fig. 8(c), apresenta os maiores vetores de velocidade, os quais promovem maiores taxas de transferência de calor. Portanto, pode-se dizer que a posição da aleta influencia no tempo total de fusão do PCM de uma cavidade, quando a aleta é posicionada em regiões mais próximas à fração sólida.

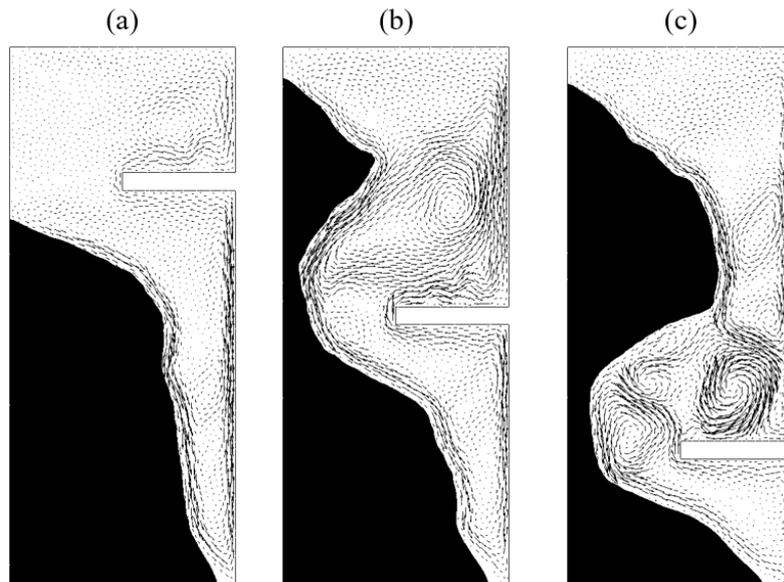


Figura 5. Campos de velocidade em  $t=60$  min: (a) C1, (b) C2, (c) C3

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, todas as cavidades analisadas possuem a mesma quantidade massa de PCM, mantendo, assim, a capacidade de armazenamento térmico. Considerando que forças gravitacionais ocasionam uma deposição específica da fração sólida do PCM (que vem a ser na parte inferior da cavidade), conclui-se, em relação à posição da aleta ao longo da parede quente, que: quanto mais próxima a aleta estiver da base inferior da cavidade, mais intenso é o processo de transferência de calor e menor é o tempo total de fusão do PCM. Isto se deve: (a) à maior exposição da fração sólida aos efeitos da aleta, que são de aumento de convecção e (b) ao aumento do campo convectivo superior à aleta, onde se observa o maior fluxo de calor na cavidade.

## 6 AUTORIZAÇÕES / RECONHECIMENTO

Os autores agradecem à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul) e à UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinos) pelo suporte financeiro recebido durante a realização do presente trabalho, bem como reconhecem serem os responsáveis por garantir o direito de publicar todo o conteúdo aqui disponível.

## 7 REFERÊNCIAS

- Abdi, A., Martin, V., & Chiu, J. 2019. Numerical investigation of melting in a cavity with vertically oriented fins. *Applied Energy*, 235, 1027-1040.
- Abdulateef, A., Mat, S., Abdulateef, J., Sopian, K., & Al-Abidi, A. 2018. Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1620-1635.
- Agyenim, F., Eames, P., & Smyth, M. 2010. Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array. *Renewable Energy*, 35(1), 198-207.
- Al Siyabi, I., Khanna, S., Mallick, T., & Sundaram, S. 2019. An experimental and numerical study on the effect of inclination angle of phase change materials thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 23, 57- 68.
- Alva, G., Lin, Y., & Fang, G. 2018. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341-378.
- Assis, E., Ziskind, G., & Letan, R. 2009. Numerical and experimental study of solidification in a spherical shell. *Journal of Heat Transfer*, 131(2), 1-5.
- Bechiri, M.; Mansouri, K.; Saleem, S. 2020. Study of heat sink effects during melting of constrained phase change material inside a spherical enclosure. *Journal of Energy Storage*, v. 27, p. 101151.
- Celik, I., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H and Raad, P. E. 2008. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130.
- Cheng, J., Zhou, Y., Ma, D., Li, S., Zhang, F., Guan, Y., Qu, W., Jin, Y., Wang, D. 2020. Preparation and characterization of carbon nanotube microcapsule phase change materials for improving thermal comfort level of buildings. *Construction and Building Materials*, 244, 118388.

- Cheng, W., Zhang, R., Xie, K., Liu, N., & Wang, J. 2010. Heat conduction enhanced shape-stabilized paraffin/HDPE composite PCMs by graphite addition: Preparation and thermal properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(10), 1636-1642.
- Crespo, A., Barreneche, C., Ibarra, M., & Platzer, W. 2019. Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium-high temperatures – A review. *Solar Energy*, 192, 3-34.
- Darkwa, J., & Zhou, T. 2011. Enhanced laminated composite phase change material for energy storage. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 810-815.
- Deng, S., Nie, C., Jiang, H., & Ye, W. 2019. Evaluation and optimization of thermal performance for a finned double tube latent heat thermal energy storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 532-544.
- Dhaidan, N., & Khodadadi, J. 2015. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 449-477.
- Dong, Y., Liu, Y., Wang, D., Wang, Y., Du, H., & Liu, J. 2020. Review of latent thermal energy storage systems for solar air-conditioning systems. *International Journal of Energy Research*, 44(2), 669-707.
- Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y., & Liu, H. 2018. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Applied Energy*, 220, 242-273.
- Duan, J.; Xiong, Y.; Yang, D. 2020. Study on the effect of multiple spiral fins for improved phase change process. *Applied Thermal Engineering*, v. 169, p. 114966.
- Eslamnezhad, H., & Rahimi, A. 2017. Enhance heat transfer for phase-change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangements of fins. *Applied Thermal Engineering*, 113, 813-821.
- Fan, L., Zhu, Z., Xiao, S., Liu, M., Lu, H., Zeng, Y., Cen, K. 2016. An experimental and numerical investigation of constrained melting heat transfer of a phase change material in a circumferentially finned spherical capsule for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 100, 1063-1075.
- Gautam, A., & Saini, R. 2020. A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solar thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 27, 101046.
- Groulx, D., Biwole, P., & Bhouri, M. 2020. Phase change heat transfer in a rectangular enclosure as a function of inclination and fin placement. *International Journal of Thermal Sciences*, 151, 106260.
- Han, G., Ding, H., Huang, Y., Tong, L., & Ding, Y. 2017. A comparative study on the performances of different shell-and-tube type latent heat thermal energy storage units including the effects of natural convection. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 228-235.
- Ho, C., Hsu, S., Jang, J., Hosseini, S., & Yan, W. 2020. Experimental study on thermal performance of water-based nano-PCM emulsion flow in multichannel heat sinks with parallel and divergent rectangular mini-channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118861.
- Hong, Y., Ye, W., Du, J., & Huang, S. 2019. Solid-liquid phase-change thermal storage and release behaviors in a rectangular cavity under the impacts of mushy region and low gravity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 1120-1132.
- Jaguemont, J., Omar, N., Van den Bossche, P., & Mierlo, J. 2018. Phase-change materials (PCM) for automotive applications: A review. *Applied Thermal Engineering*, 132, 308-320.
- Ji, C., Qin, Z., Low, Z., Dubey, S., Choo, F., & Duan, F. 2018. Non-uniform heat transfer suppression to enhance PCM melting by angled fins. *Applied Thermal Engineering*, 129, 269-279.
- Johnson, M., Vogel, J., Hempel, M., Hachmann, B., & Dengel, A. 2017. Design of high temperature thermal energy storage for high power levels. *Sustainable Cities and Society*, 35, 758-763.
- Joneidi, M., Hosseini, M., Ranjbar, A., & Bahrapoury, R. 2017. Experimental investigation of phase change in a cavity for varying heat flux and inclination angles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 594-607.
- Junior, J., Oliveski, R., Rocha, L., & Biserni, C. 2018. Numerical investigation on phase change materials (PCM): The melting process of erythritol in spheres under different thermal conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*, 148, 20-30.
- Kabbara, M., Groulx, D., & Joseph, A. 2018. A parametric experimental investigation of the heat transfer in a coil-in-tank latent heat energy storage system. *International Journal of Thermal Sciences*, 130, 395-405.
- Kamkari, B., & Amlashi, H. 2017. Numerical simulation and experimental verification of constrained melting of phase change material in inclined rectangular enclosures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 211-219.
- Kamkari, B., & Groulx, D. 2018. Experimental investigation of melting behaviour of phase change material in finned rectangular enclosures under different inclination angles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 97, 94-108.
- Kamkari, B., & Shokouhmand, H. 2014. Experimental investigation of phase change material melting in rectangular enclosures with horizontal partial fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78, 839-851.
- Karami, R., & Kamkari, B. 2019. Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units. *Applied Thermal Engineering*, 146, 45-60.
- Kenisarin, M. M., Mahkamov, K., Costa, S., Makhkamova, I. 2020. Melting and solidification of PCMs inside a spherical capsule: A critical review. *Journal of Energy Storage*, v. 27, p. 101082.
- Li, S., Sun, Z., Xu, B., & Hong, Y. 2018. Melting of phase change material from an isothermal vertical wall in a semi-enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 1041-1052.
- Li, W., Li, S., Guan, S., Wang, Y., Zhang, X., & Liu, X. 2017. Numerical study on melt fraction during melting of phase change material inside a sphere. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(29), 18232-18239.

- Li, Z., Yu, X., Wang, L., Lu, Y., Huang, R., Chang, J., & Jiang, R. 2020. Effects of fluctuating thermal sources on a shell-and-tube latent thermal energy storage during charging process. *Energy*, 199, 117400.
- Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., & Fang, G. 2018. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2730-2742.
- Mahdi, J., & Nsofor, E. 2018. Solidification enhancement of PCM in a triplex-tube thermal energy storage system with nanoparticles and fins. *Applied Energy*, 211, 975-986.
- Mahdi, J., Lohrasbi, S., Ganji, D., & Nsofor, E. 2018. Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 663-676.
- Mahdi, J., Mohammed, H., Hashim, E., Talebizadehsardari, P., & Nsofor, E. 2020. Solidification enhancement with multiple PCMs, cascaded metal foam and nanoparticles in the shell-and-tube energy storage system. *Applied Energy*, 257, 113993.
- Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin, M. Kannan, A. 2019. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491-523.
- Nkwetta, D. N.; Haghghat, F. 2014. Thermal energy storage with phase change material - A state-of-the art review. *Sustainable Cities and Society*, v. 10, p. 87-100.
- Oliveira, F., Fernandes, M., Carneiro, N., & Pedro Souto, A. 2013. Functionalization of wool fabric with phase-change materials microcapsules after plasma surface modification. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(5), 2638-2647.
- Pielichowska, K., & Pielichowski, K. 2014. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67-123.
- Pu, L., Zhang, S., Xu, L., Yanzhong, L. 2020. Thermal performance optimization and evaluation of a radial finned shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, v. 166, p. 114753.
- Sathe, T.; Dhoble, A. S. 2019. Thermal analysis of an inclined heat sink with finned PCM container for solar applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Sattari, H., Mohebbi, A., Afsahi, M., & Azimi Yancheshme, A. 2017. CFD simulation of melting process of phase change materials (PCMs) in a spherical capsule. *International Journal of Refrigeration*, 73, 209-218.
- Seddegh, S., Joybari, M., Wang, X., & Haghghat, F. 2017. Experimental and numerical characterization of natural convection in a vertical shell-and-tube latent thermal energy storage system. *Sustainable Cities and Society*, 35, 13-24.
- Shokouhmand, H., & Kamkari, B. 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.
- Soares, N., Costa, J., Gaspar, A., & Santos, P. 2013. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. *Energy and Buildings*. 59, 82-103.
- Soares, N., Gaspar, A., Santos, P., & Costa, J. 2016. Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications. *Energy and Buildings*, 116, 18-34.
- Soni, V., Kumar, A., & Jain, V. 2018. Modeling of PCM melting: Analysis of discrepancy between numerical and experimental results and energy storage performance. *Energy*, 150, 190-204.
- Tabassum, T.; Hasan, M.; Begum, L. 2020. Thermal Energy Storage through Melting of a Commercial Phase Change Material in an Annulus with Radially Divergent Longitudinal Fins. *International Journal of Thermofluid Science and Technology*, v. 7, n. 1.
- Valeri, D.; Meirelles, A. J. A. 1997. Viscosities of fatty acids, triglycerides, and their binary mixtures. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, v. 74, n. 10, p. 1221-1226.
- Voller, V., & Prakash, C. 1987. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(8), 1709-1719.
- Zhang, C., Yu, M., Fan, Y., Zhang, X., Zhao, Y., & Qiu, L. 2020. Numerical study on heat transfer enhancement of PCM using three combined methods based on heat pipe. *Energy*, 195, 116809.
- Zhang, X. 2001. Heat-storage and thermo-regulated textiles and clothing. In X. Zhang, *Smart Fibres, Fabrics and Clothing* (pp. 34-57).
- Zhang, Y., Ding, J., Wang, X., Yang, R., & Lin, K. 2006. Influence of additives on thermal conductivity of shape-stabilized phase change material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(11), 1692-1702.
- Zhao, C., Opolot, M., Liu, M., Bruno, F., Mancin, S., & Hooman, K. 2020. Numerical study of melting performance enhancement for PCM in an annular enclosure with internal-external fins and metal foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150, 119348.

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FIN POSITIONING IN RECTANGULAR CAVITY CONTAINING PHASE CHANGING MATERIAL

**Abstract.** Heat storage systems are being constantly analyzed for efficiency gains. The three main forms of thermal energy storage are: sensitive heat, latent heat and thermochemical heat, through chemical reduction. In the present work, the fusion process of a phase change material in a finned rectangular cavity is analyzed through CFD, being that the position of the fin along the heat source varies. The objective is to assess the influence of the fin position in terms of heat transfer and its effects on the system's storage capacity. In the case of PCMs, these materials store or release latent heat; therefore, the process occurs at constant temperature. For this analysis, the package of ANSYS® FLUENT 19.2 software has been used, being that the problem is a two-dimensional and transient one. For the problem in question, the mathematical model used is composed of the equations of mass, energy and movement conservation with the addition of a phase change model. The mathematical model was validated with experimental results. Values of total melting time, liquid fraction, temperature contour and vector fields are presented. The results show that the position of the fin influences the total melting time directly. The closer the fin is to the bottom of the cavity, the greater the heat transfer.

**Keywords:** Phase Change Materials (PCM), Fusion, Computational fluid dynamics (CFD), Numerical analysis.