

**AJUSTE DA CONSTANTE C (MUSHY ZONE CONSTANT) PARA A IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DA  
ENTALPIA-POROSIDADE NO ESTUDO NUMÉRICO DO PROCESSO DE FUSÃO DE UM PCM**

**Rafael da Silveira Borahel** – rafaelborahel@gmail.com

**Ionatan Anton Schroer** – ionatan.schroer@gmail.com

**Rejane de César Oliveski** – decesar@unisin.br

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

F3 – Cálculo, Projeto e Simulação Termo Energética

**Resumo.** O desenvolvimento de sistemas destinados ao armazenamento térmico de energia é extremamente importante para diversas áreas. Basicamente, duas são as formas de armazenamento: através de calor sensível e/ou latente. Sistemas baseados em calor latente levam vantagem frente aos que operam com calor sensível, uma vez que os mesmos são mais compactos e operam a temperaturas praticamente constantes. Diversas são as técnicas que podem ser utilizadas para o estudo destes sistemas, sendo a abordagem numérica por fluidodinâmica computacional (CFD), através do método da entalpia-porosidade, uma das mais populares. Para a implementação deste método, alguns cuidados são necessários na determinação de um dos principais parâmetros que o compõem: a constante C (mushy zone constant). O objetivo deste trabalho é determinar o valor mais adequado, para esta constante no estudo computacional do processo de fusão do ácido láurico em uma cavidade retangular aletada. Neste trabalho, diferentes valores de C ( $10^4$  até  $10^{12}$ ) foram testados para as simulações realizadas no software comercial ANSYS Fluent 19.2. Resultados obtidos sugerem que valores de C inferiores a  $1 \times 10^7$  são inapropriados para a reprodução numérica do processo de fusão do ácido láurico, enquanto valores superiores a  $5 \times 10^7$  são incapazes de influenciar o processo. Assim, pode-se concluir que valores entre  $1 \times 10^7$  e  $5 \times 10^7$  mostram-se os mais adequados para o ajuste da constante em questão, principalmente o primeiro deles, o qual seus resultados diferiram dos experimentais constantes na literatura em apenas 3,7%.

**Palavras-chave:** Mushy Zone Constant, Processo de Fusão, Ácido Láurico, PCM, Armazenamento Térmico.

## 1. INTRODUÇÃO

De modo geral, o desenvolvimento de sistemas destinados ao armazenamento térmico de energia é considerado um dos mais importantes avanços tecnológicos já ocorridos. (Dincer, 2002). Tais sistemas, tradicionalmente conhecidos por reservatórios térmicos, atuam melhorando o desempenho e a eficiência dos mais variados sistemas termoenergéticos, reduzindo a lacuna existente entre a demanda e a oferta de energia. (Regin *et al.* 2008 e Sharma *et al.* 2009). Basicamente, dois são os principais tipos de armazenamento térmico existentes: armazenamento de calor sensível e de calor latente. Segundo Regin *et al.* (2008), variações na temperatura da substância contida nos reservatórios térmicos é que propiciam o armazenamento de calor sensível, enquanto a mudança de fase desta substância é que dá origem ao armazenamento de calor latente. Do ponto de vista prático, reservatórios térmicos que armazenam calor latente, através do uso dos materiais de mudança de fase (PCM), levam vantagem frente aqueles que armazenam calor sensível. Estes sistemas, operam sob temperaturas praticamente constantes, possuem uma maior densidade de armazenamento e são muito mais compactos. (Agyenim *et al.* 2010). Área médica, construção civil, eletrônica e setor industrial de transporte refrigerado são algumas das áreas em que os reservatórios térmicos de calor latente são utilizados. Conforme Pielichowsa e Pielichowski (2014), devido a este grande potencial de uso, um crescente interesse da comunidade científica no aprimoramento/estudo destes sistemas pode observado na última década. Uma das principais técnicas utilizadas nestes estudos é a utilização de ferramentas computacionais de análise, como os softwares de fluidodinâmica computacional (CFD).

A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta de grande valia para a otimização de processos de inúmeras áreas, principalmente por seu uso dispensar a necessidade de equipamentos sofisticados de análise, propiciar a obtenção de uma grande gama de resultados em um curto espaço de tempo e conseguir representar adequadamente a física dos processos estudados. (Verma *et al.* 2008 e Dutil *et al.* 2011). Para o estudo dos reservatórios térmicos de armazenamento de calor latente, diversos são os métodos matemáticos e numéricos atualmente disponíveis para o estudo destes sistemas através dos softwares de CFD, sendo que um deles merece destaque, o método da entalpia-porosidade originalmente proposto por Voller e Prakash (1987). Tal método, considerara regiões parcialmente sólidas (*Mushy Zone*) como se fossem um meio poroso, sendo diversos os estudos que o utilizam para a análise numérica dos sistemas de calor latente. Dentre os estudos que o adotam, pode-se mencionar os conduzidos por Kamkari e Amlashi (2017), Fadl e Eames (2019) e Yadav e Samir (2019). Ainda que em todos os trabalhos o mesmo método tenha sido compartilhado, diferenças relevantes podem ser observadas no que diz respeito aos valores utilizados para o ajuste de um dos principais parâmetros que o compõem, no caso a constante C (conhecida por *Mushy Zone Constant*). Conforme Fadl e Eames (2019), tal constante é responsável por tratar a transição existente entre as fases sólida e líquida do PCM durante seu processo de mudança de fase, sendo seu valor dependente de fatores intrínsecos dos sistemas de armazenamento, como geometria e morfologia do

PCM utilizado. Para os sistemas de formato retangular, como a cavidade vertical analisada no presente trabalho, valores de  $C$  variando entre  $10^3$  (Vogel *et al.* 2016) e  $10^8$  (Kozak e Ziskind, 2017) já se mostraram adequados em outras situações, porém sua determinação sempre se faz necessária como uma etapa preliminar de estudos numéricos mais complexos, já que o correto ajuste da constante é fundamental para a obtenção de resultados fisicamente coerentes.

Deste modo, compreendendo a real importância da constante  $C$  para o estudo por CFD de problemas modelados por intermédio do método da entalpia-porosidade, bem como visando facilitar a modelagem de trabalhos futuros que façam uso do método em questão, objetivou-se no presente trabalho identificar qual o valor mais adequado a ser atribuído à constante  $C$  quando o processo de fusão de ácido láurico em uma cavidade retangular aletada é estudado numericamente.

## 2. PROBLEMA ESTUDADO

Em razão do presente trabalho ser basicamente um estudo de validação, o problema analisado consiste na reprodução numérica do estudo experimental de Kamkari e Shokouhmand (2014). O estudo em questão, buscou avaliar o processo de fusão de ácido láurico em uma cavidade retangular aletada, esta bidimensionalmente representada aqui (vide Fig.1). Medindo 50 mm de largura ( $W$ ) por 120 mm de altura ( $H$ ), a cavidade analisada possui em seu interior uma aleta com 4 mm de espessura ( $e$ ) por 25 mm de largura ( $L_f$ ), a qual está instalada de modo centralizado junto à parede direita da cavidade. Destacadas em vermelho, perímetro da aleta e parede direita são as superfícies responsáveis pelo aquecimento do sistema, enquanto às demais paredes são termicamente isoladas. Para atenuar qualquer pico de pressão que venha a ocorrer no interior da cavidade durante o processo de fusão, uma pequena abertura é admitida à região superior direita do sistema, esta medindo 2 mm.

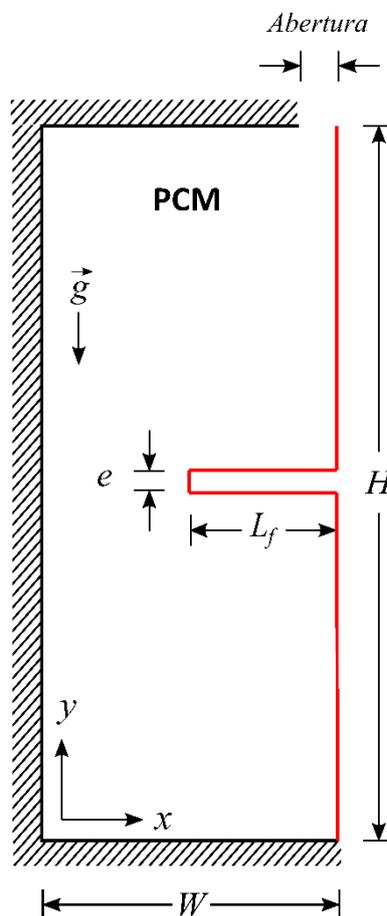


Figura 1. Representação Esquemática da Cavidade Retangular Estudada

Fundindo em uma faixa de temperatura que varia de 316,65 K ( $T_s$ ) até 321,35 K ( $T_l$ ), ácido láurico é o PCM utilizado no presente trabalho. Propriedades necessárias a sua modelagem foram obtidas junto à literatura, de modo que valores de massa específica ( $\rho$ ), calor específico ( $c_p$ ), condutividade térmica ( $k$ ) e calor latente de fusão ( $L$ ) são os fornecidos por Shokouhmand e Kamkari (2013); valores de viscosidade dinâmica foram obtidos do estudo de Valeri e Meirelles (1997) e o valor do coeficiente de expansão térmica ( $\beta$ ) obtido junto ao trabalho de Yuan *et al.* (2016); estando todos estes valores apresentados na Tab. 4.1:

Tabela 1. Propriedades Termofísicas do Ácido Láurico

Propriedades		Valores							
Calor Específico (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )		2180 (T <sub>s</sub> ) e 2390 (T <sub>l</sub> )							
Calor Latente de Fusão (J kg <sup>-1</sup> )		187210							
Coeficiente de Expansão Térmica (K <sup>-1</sup> )		0,000615							
Massa Específica (kg m <sup>-3</sup> )		885 (T <sub>l</sub> )							
Condutividade Térmica (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )		293 K	303 K	313 K	323 K	328 K	333 K	338 K	343 K
		0,161	0,159	0,158	0,145	0,143	0,142	0,139	0,138
Viscosidade Dinâmica (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )		321,2 K	322 K	333 K	344 K	355 K	372 K	383 K	
		0,00760	0,00747	0,00542	0,00428	0,00338	0,00250	0,00210	

## 2.1 Modelo Matemático e Numérico

No presente trabalho, equações diferenciais da massa (Eq. 1), energia (Eq. 2) e quantidade de movimento (Eq. 3), acrescidas ainda do método da entalpia-porosidade proposto por Voller e Prakash (1987), compõem o modelo matemático e numérico implementado. (Ansys Fluent, 2013).

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

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

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \vec{V}) + \rho \vec{g} + \vec{S} \quad (3)$$

onde  $t$  representa o tempo,  $\vec{V}$  o vetor velocidade,  $\lambda$  a entalpia específica total,  $p$  a pressão,  $T$  a temperatura,  $\vec{g}$  a aceleração da gravidade e  $\vec{S}$  o termo fonte da equação conservativa da quantidade de movimento, o qual é representado pela Eq.4:

$$\vec{S} = \frac{C(1-\gamma)^2}{(\gamma^3 + \omega)} \vec{V} \quad (4)$$

onde  $\omega$  representa uma pequena constante ( $10^{-3}$ ) utilizada para evitar divisões por zero,  $C$  representa a constante da zona porosa que depende da morfologia desta região e  $\gamma$  representa a fração de líquido do PCM, esta obtida por intermédio da Eq. 5. (Voller e Prakash, 1987).

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

Pelo método utilizado (entalpia-porosidade) na modelagem do processo de fusão, valores de entalpia específica total foram obtidos para cada volume infinitesimal do domínio computacional pela soma das entalpias específicas sensível ( $\lambda_{se}$ ) e latente ( $\lambda_L$ ) do ácido láurico, respectivamente calculadas por intermédio das Eqs. 6 e 7. (Shmueli *et al.* 2010).

$$\lambda_{se} = \lambda_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (6)$$

$$\lambda_L = \begin{cases} 0 & \text{se } T < T_s \\ \gamma L & \text{se } T_s < T < T_l \\ L & \text{se } T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

onde  $\lambda_{ref}$  representa uma entalpia associada a uma temperatura de referência ( $T_{ref}$ ).

## 2.2 Condições Iniciais e de Contorno

Admitiu-se como condição inicial do PCM a temperatura de 298,15 K, enquanto as seguintes condições de contorno foram atribuídas às paredes da cavidade:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\substack{x=0 \\ y=0-H}} = 0 \quad e \quad \vec{V}|_{\substack{x=0 \\ y=0-H}} = 0 \quad (8)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\substack{x=0-W \\ y=0}} = 0 \quad e \quad \vec{V}|_{\substack{x=0-W \\ y=0}} = 0 \quad (9)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{\substack{x=0-W \\ y=H}} = 0 \quad e \quad \vec{V}|_{\substack{x=0-W \\ y=H}} = 0 \quad (10)$$

$$T|_{\substack{x=W \\ y=0-H}} = T_w \quad e \quad \vec{V}|_{\substack{x=W \\ y=0-H}} = 0 \quad (11)$$

onde  $q''$  representa o fluxo de calor na parede e  $T_w$  a temperatura da parede quente, a qual vale 343,15 K.

Já para o perímetro da aleta, as condições de contorno apresentadas na Eq.12 foram utilizadas, enquanto na abertura superior da cavidade admitiu-se uma pressão manométrica de 0 Pa como condição de contorno.

$$T|_{\substack{x=L_f \\ y=e}} = T_w \quad e \quad \vec{V}|_{\substack{x=L_f \\ y=e}} = 0 \quad (12)$$

## 2.3 Parâmetros de Simulação

Para a análise numérica do problema estudado, utilizou-se no presente trabalho o método dos volumes finitos (MVF). Através de tal método, todas as equações conservativas anteriormente apresentadas foram solucionadas para cada volume infinitesimal do domínio computacional, isto sendo realizado com o uso do software comercial ANSYS-FLUENT 19.2. Empregando tal software, três diferentes intervalos de tempo (0,05; 0,1 e 0,2s) foram testados para a realização da discretização temporal do problema estudado, sendo apresentado na Fig. 2 os resultados referentes ao teste em questão para valores transientes globais de fração de líquido.

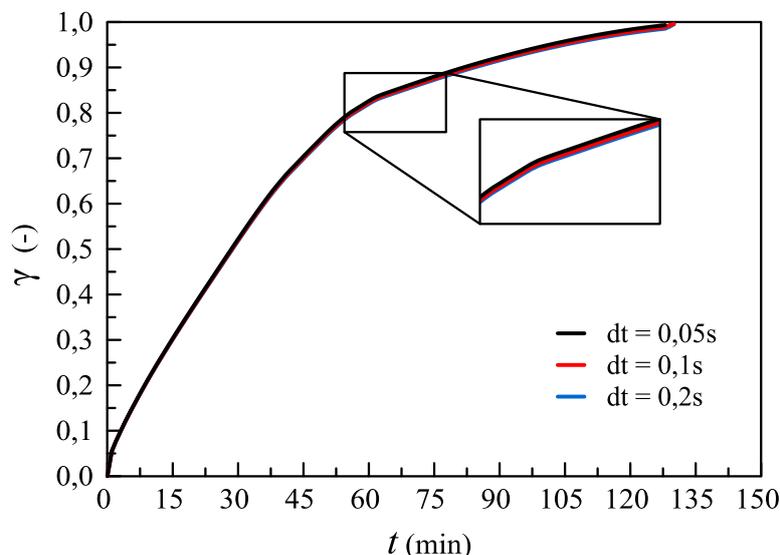


Figura 2. Resultados Transientes de Fração de Líquido Global para os Três Intervalos de Tempo Testados

Apesar de diferenças relevantes não possam ser visualizadas entre os resultados obtidos com os três intervalos de tempo testados, não optou-se aqui pela utilização do maior valor testado, mas sim pelo intermediário (0,1s), uma vez que seu uso propiciou uma melhor convergência das simulações realizadas. Como critério de convergência, adotou-se o valor residual de  $10^{-5}$  para as equações conservativas da massa e quantidade de movimento e  $10^{-8}$  para a equação conservativa da energia, considerando ainda um número máximo de 1000 iterações por intervalo de tempo. Em relação aos métodos de solução empregues, adotou-se para todas as simulações executadas o esquema SIMPLE para tratar o acoplamento pressão-velocidade; PRESTO! para a discretização espacial da pressão; *Least Squares Cell Based* para a solução do gradiente espacialmente discretizado e *Second Order Upwind* para tratar a discretização espacial das equações da energia e da quantidade de movimento, bem como a discretização temporal.

## 2.4 Discretização Espacial

Para todas as simulações solucionadas, malhas bidimensionais não estruturadas foram utilizadas na discretização espacial do problema apresentado na Fig. 1. Procedimentos quanto à verificação da qualidade de malha foram realizados através do método GCI (*Grid Convergence Index*), proposto por Celik et al. (2008). Este método, basicamente permite quantificar a incerteza existente entre três diferentes malhas, sendo que para problemas complexos, admite-se uma incerteza (GCI) numérica média de até 5%. Seguindo a metodologia imposta pelo método, três malhas bidimensionais com diferentes níveis de refinamento foram geradas e testadas para o domínio computacional, onde, Fig. 3 (a) apresenta a malha M1 (12.250 elementos); Fig. 3 (b) a malha M2 (22.296 elementos) e Fig. 3 (c) a malha M3 (39.296 elementos).

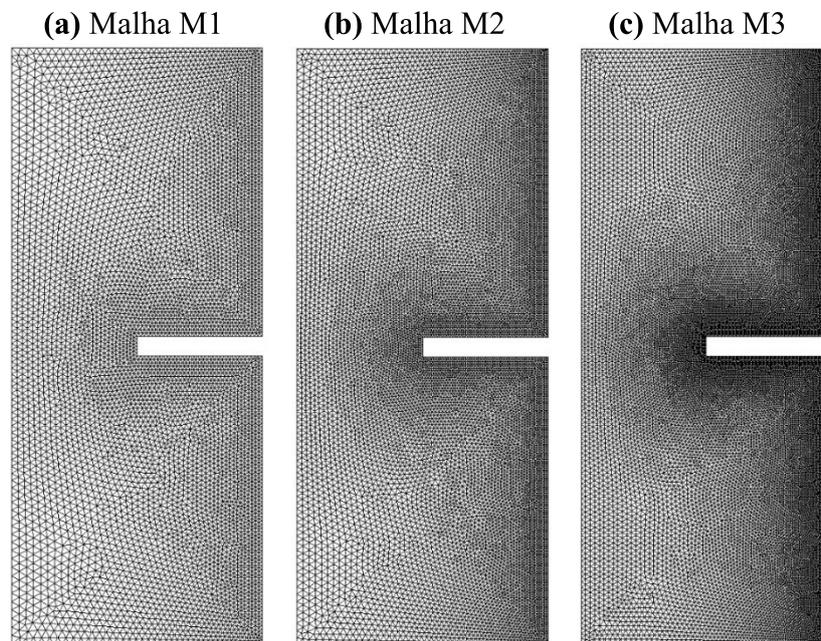


Figura 3. Malhas Testadas para a Discretização Espacial, onde: (a) representa a malha M1, (b) M2 e (c) M3

As referidas malhas, compostas exclusivamente por elementos triangulares, apresentam junto às superfícies quentes (aleta e parede direita) uma maior densidade de elementos, configurando assim um refino nas regiões onde há a ocorrência dos maiores gradientes de velocidade e temperatura do problema. Para os resultados obtidos, mais especificamente valores globais de fração líquida ao longo do tempo, ficou provado existir uma incerteza numérica média de aproximadamente 3,69% ( $GCI_{32}$ ) para as malhas M3 e M2 e 3,72% ( $GCI_{21}$ ) para as malhas M2 e M1; valores estes que evidenciam que a malha mais refinada (M3) é adequada para o estudo proposto. Deste modo, todos os resultados aqui apresentados foram obtidos com o uso da malha em questão (M3), garantindo assim a qualidade dos mesmos.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Comparando quantitativamente os resultados obtidos aos relatados por Kamkari e Shokouhmand (2014), a Fig. 4 traz os resultados transientes da fração de líquido global no interior da cavidade para os diferentes valores de  $C$  testados ( $10^4$  até  $10^{12}$ ). Nesta figura, pode-se observar que, para  $C=10^4$ ;  $10^5$ ;  $10^6$  e  $5 \times 10^6$ , o tempo necessário para se atingir a fusão completa ( $\gamma = 1$ ) do ácido láurico é de aproximadamente 108; 122; 144 e 151 min, respectivamente. Ou seja, bem inferior ao verificado (aprox. 162 min) por Kamkari e Shokouhmand (2014). Observa-se também que, para  $C=10^7$ , os resultados numéricos estão próximos dos resultados experimentais de Kamkari e Shokouhmand (2014). Utilizando este valor, o processo completo de fusão do ácido láurico se deu em 168 min, tempo 3,7% maior que o experimental considerado para fins de comparação. Tal diferença é pequena em grande parte do processo, com exceção dos primeiros 30 min, onde diferenças maiores são existentes. Neste período, observa-se que mais rapidamente se dá o processo de fusão estudado

computacionalmente, isto ocorrendo em razão da modelagem realizada ter considerado a aleta como sendo ideal. Assim, enquanto computacionalmente tal estrutura iniciava a trocar calor com o PCM já em sua temperatura de operação, experimentalmente a mesma necessitava de um determinado tempo para que tal temperatura fosse atingida. Quanto aos demais valores testados para  $C$  ( $5 \times 10^7 \leq C \leq 10^{12}$ ), obteve-se para todos um tempo total de processo que variou entre 180 e 182 min, de modo que optou-se aqui pela representação de apenas um destes resultados, o referente ao problema com  $C=5 \times 10^7$ .

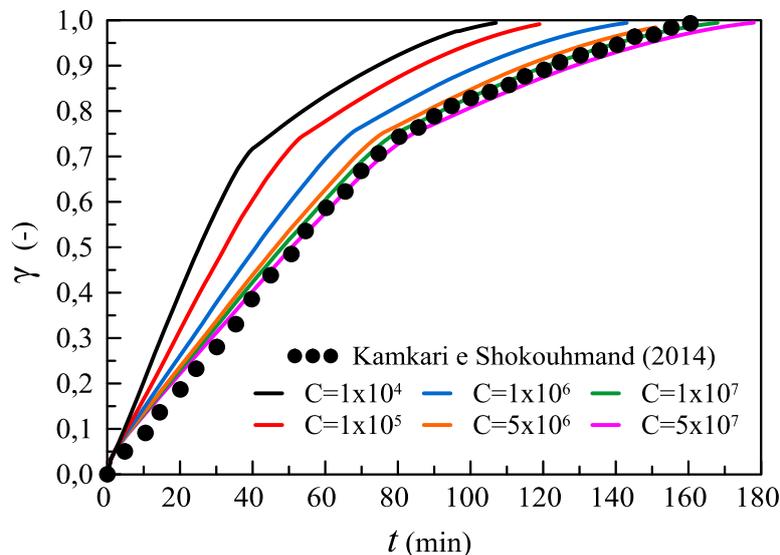


Figura 4. Valores Transientes Globais da Fração de Líquido na Cavidade para Cada valor de  $C$  Testado

Resultados qualitativos são mostrados nas Fig. 5 (a-e), onde a interface sólido-líquido do ácido láurico para os diferentes valores de  $C$  ( $10^6$ ;  $5 \times 10^6$ ;  $10^7$  e  $5 \times 10^7$ ) são respectivamente apresentadas para os instantes de 20, 40, 60, 80 e 140 min. Respaldo os resultados quantitativos já apresentados, percebe-se aqui uma diferença considerável entre a interface para  $C=10^6$  e a obtida por Kamkari e Shokouhmand (2014). Para todos os instantes de tempo, a interface em questão se mostrou a mais próxima da região esquerda inferior da cavidade, confirmando o processo de fusão mais intenso observado na Fig. 4 para o caso com  $C=10^6$ . Semelhanças marcantes podem ser relatadas entre as demais interfaces numéricas para os primeiros 40 min de processo. Neste período, percebe-se que as mesmas são praticamente idênticas, sendo semelhantes ainda em termos de formato à obtida experimentalmente, diferindo-se minimamente dela apenas por estarem posicionadas um pouco mais ao centro da cavidade. Passado este período inicial, a semelhança entre os resultados se mantém para as regiões mais inferiores da cavidade. Para os instantes de 60 e 80 min, resultados numéricos ( $5 \times 10^6$ ;  $10^7$  e  $5 \times 10^7$ ) são praticamente idênticos aos experimentais nestas regiões ( $H \leq 4,5$  cm), enquanto diferenças são registradas para as regiões superiores, as quais se devem ao acúmulo de PCM líquido à elevadas temperaturas no topo da cavidade.

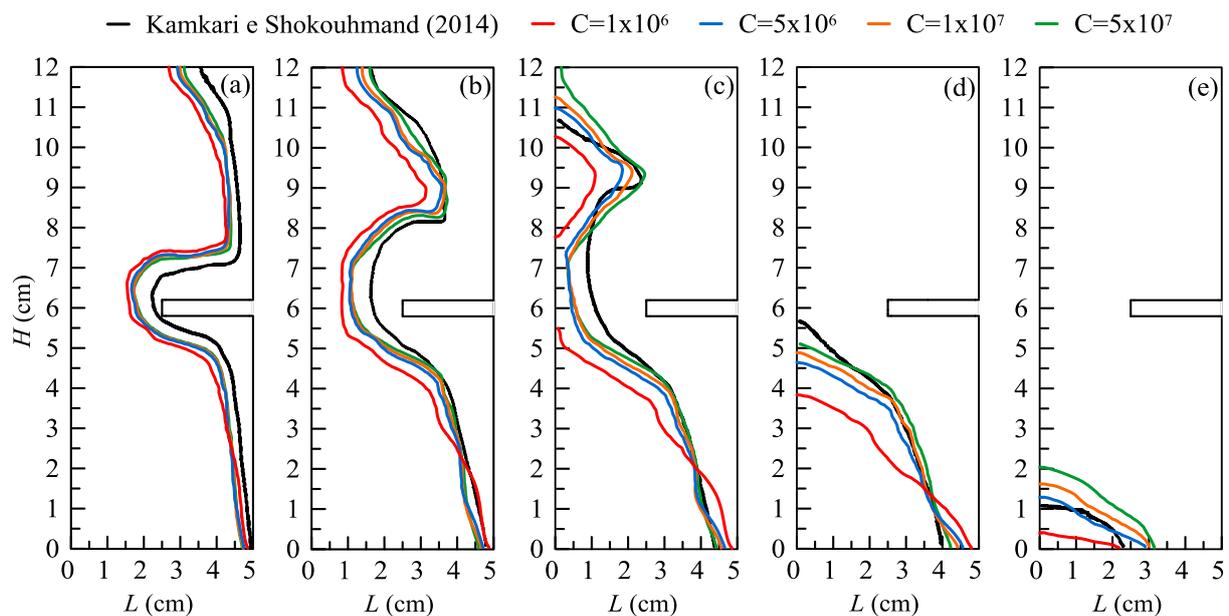


Figura 5. Posição Espacial da Interface Sólido-Líquido do Ácido Láurico para Diferentes Valores de  $C$ , onde: (a) 20 min, (b) 40 min, (c) 60 min, (d) 80 min e (e) 140min

Contornos de temperatura e vetores de velocidade são apresentados para um mesmo instante de tempo (8 min) na Fig. 6 (a-c), onde (a) foi obtido com  $C=10^4$ ; (b)  $C=10^7$  e (c)  $C=10^{11}$ . Para todos os valores de  $C$ , as maiores temperaturas são observadas nas regiões próximas à parede direita, abaixo da aleta e no topo da cavidade. Basicamente, a primeira situação ocorre em razão da parede direita ser a principal superfície de aquecimento do sistema, enquanto as demais zonas se dão pelas forças de empuxo que atuam sob o PCM líquido. Como líquidos de temperatura mais elevada apresentam menor massa específica, os mesmos tendem a ascender dentro do sistema em que se encontram, posicionando-se assim em regiões mais superiores. Tal fenômeno explica a ocorrência destas zonas de superaquecimento, já que o fluido de maior temperatura nas regiões mais inferiores da cavidade ascende ocupando a região existente logo abaixo da aleta, enquanto em regiões superiores (região acima da aleta) o mesmo ascende para ocupar a região do topo da cavidade.

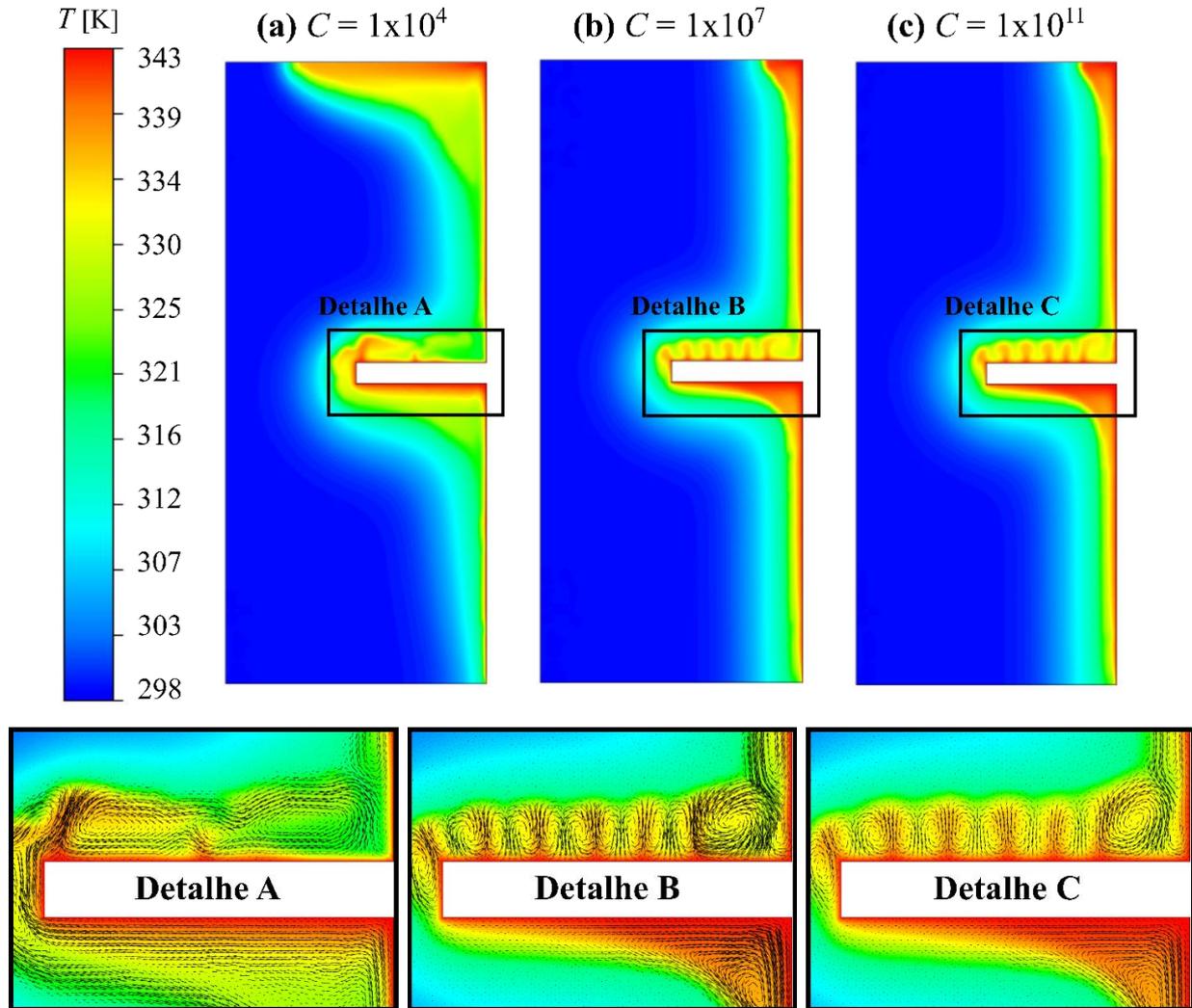


Figura 6. Contornos de Temperatura e Vetores de Velocidade Obtidos para o Instante de 8 minutos com Diferentes Valores de  $C$ , onde: (a)  $C=10^4$ , (b)  $C=10^7$  e (e)  $C=10^{11}$

Como já comentado, PCM líquido à elevadas temperaturas junto ao topo da cavidade é que confere a curvatura observada para interface sólido-líquido do ácido láurico nesta região, como mostrado na Fig. 5 (a-c). Como o fluido encontra-se ali em temperaturas maiores que as observadas nas demais regiões, logicamente o PCM sólido será fundido de um modo mais intenso nesta região, o que faz a interface se deslocar para a esquerda da cavidade. Apesar de expressivos pontos de superaquecimento não serem observados logo acima das aletas, uma curvatura na interface sólido-líquido também é ali existente. O recuo da mesma, nesta região, se dá em razão da intensa transferência de calor por convecção que ali ocorre, isto sendo confirmado pelos vetores de velocidade exibidos nos detalhes da Fig. 6 (a-c), os quais sugerem a ocorrência do fenômeno convectivo conhecido por convecção Rayleigh-Bénard. Neste processo, uma substância líquida é simultaneamente aquecida e resfriada por duas superfícies sólidas que se encontram em temperaturas distintas, isto ocasionando recirculações da fase líquida naquela região. (Moore e Weiss, 1973). Para o presente trabalho, a superfície superior da aleta aquece o PCM líquido fazendo com que o mesmo ascenda em direção ao PCM sólido, o qual em menor temperatura efetua o resfriamento do líquido que acaba por descender no interior da cavidade. Regiões de escoamento ascendente e descende podem ser visualizadas no detalhe da Fig. 6 (b), tanto em termos de temperatura quanto em termos de velocidade. Para temperatura, verifica-se a existência de quatro pequenos gradientes verticais vermelho-

amarelados que sugerem o arrasto de líquido quente em direção do PCM ainda sólido (movimento ascendente), enquanto o movimento contrário (descendente) é associado aos gradientes verticais de cor amarelo-esverdeada. Observando-se os vetores de velocidade sob estes gradientes, de fato percebe-se vetores ascendentes nos gradientes vermelho-amarelados e descendentes nos amarelo-esverdeados, vetores estes que dão origem a diversos pequenos turbilhonamentos circulares, o que atesta a ocorrência da convecção Rayleigh-Bénard.

#### 4. CONCLUSÕES

Aplicando o método dos volumes finitos para o estudo numérico do processo de fusão do ácido láurico em uma cavidade retangular aletada, buscou-se identificar aqui o valor mais adequado a ser atribuído a uma das variáveis que compõem o método da entalpia-porosidade, neste caso a constante  $C$  (*mushy zone constant*). Para alcançar o objetivo proposto, simulações numéricas bidimensionais transientes foram realizadas para diferentes valores de  $C$  ( $10^4$  até  $10^{12}$ ) através do software comercial ANSYS-FLUENT 19.2. Em todas as simulações, malhas computacionais não estruturadas foram utilizadas para a discretização especial do problema físico analisado. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir o seguinte:

- Diferentes valores de  $C$  dão origem a resultados distintos, alguns corretos, outros não. Valores de  $C$  inferiores a  $10^7$  intensificam de modo irreal o processo de mudança de fase, enquanto valores de  $C$  superiores a  $5 \times 10^7$  dão origem a resultados idênticos;
- O modelo matemático e numérico implementado é apropriado para a reprodução do processo de fusão do ácido láurico em uma cavidade retangular aletada quando atribuiu-se o valor de  $10^7$  à constante  $C$ ;
- Gradientes de temperatura no PCM líquido originam um processo intenso de convecção no interior da cavidade, o qual confere curvaturas à interface sólido-líquido do ácido láurico.

#### 5. AUTORIZAÇÕES / RECONHECIMENTO

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), 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 únicos responsáveis por garantir o direito de publicar todo o conteúdo aqui disponível.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P. and Smyth, M. 2010. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615-628.
- Ansys Fluent. 2013. Theory Guide.
- 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.
- Dincer, I. 2002. On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and Buildings*, 34(4), 377-388
- Dutil, Y., Rousse, D. R., Salah, N. B., Lassue, S. and Zalewski, L. 2011. A review on phase-change materials: mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 112-130.
- Fadl, M. and Eames, P. C. 2019. Numerical investigation of the influence of mushy zone parameter  $Amush$  on heat transfer characteristics in vertically and horizontally oriented thermal energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*, 151, 90-99.
- Kamkari, B. and Amlashi, H. J. 2017. Numerical simulation and experimental verification of melting of phase change material in rectangular enclosures. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 211-219.
- Kozak, Y. and Ziskind, G. 2017. Novel enthalpy method for modeling of PCM melting accompanied by sinking of the solid phase. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112, 568-586.
- Pielichowska, K. and Pielichowski, K. 2014. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67-123.
- Regin, A. F., Solanki, S. C. and Saini, J. S. 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438-2458.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. and Buddhi, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
- Shmueli, H., Ziskind, G. and Letan, R. 2010. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comparison with experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(19-20), 4082-4091.
- Shokouhmand, H. and 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.
- Valeri, D. and Meirelles, A. J. 1997. Viscosities of fatty acids, triglycerides, and their binary mixtures. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 74(10), 1221-1226.
- Verma, P. and Singal, S. K. 2008. Review of mathematical modeling on latent heat thermal energy storage systems using phase-change material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 999-1031.

- Vogel, J., Felbinger, J. and Johnson, M. 2016. Natural convection in high temperature flat plate latent heat thermal energy storage systems. *Applied Energy*, 184, 184-196.
- Voller, V. R. and 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.
- Yadav, A. and Samir, S. 2019. Experimental and numerical investigation of spatiotemporal characteristics of thermal energy storage system in a rectangular enclosure. *Journal of Energy Storage*, 21, 405-417.
- Yuan, Y., Zhang, N., Tao, W., Cao, X. and He, Y. 2014. Fatty acids as phase change materials: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 482-498.

### **MUSHY ZONE CONSTANT ADJUSTMENT FOR THE IMPLEMENTATION OF THE ENTHALPY-POROSITY METHOD IN THE NUMERICAL STUDY OF THE MELTING PROCESS OF A PCM**

**Abstract.** *The development of systems for thermal energy storage is extremely important for several areas. Basically, there are two forms of storage: through sensible and/or latent heat. Systems based on latent heat have an advantage over those that operate with sensitive heat, since they are more compact and operate at practically constant temperatures. Several techniques can be used for the study of these systems, the numerical approach by computational fluid dynamics through the enthalpy-porosity method being one of the most popular. For the implementation of such a method, a special attention are necessary in determining one of the main parameters that compose it: the constant C (mushy zone constant). Therefore, the objective of this work is to determine the most adequate value of this constant in the computational study of the lauric acid melting process in a finned rectangular cavity. In the present work, transient numerical simulations were solved for different C values ( $10^4$  to  $10^{12}$ ) using the commercial software ANSYS Fluent 19.2. Results obtained suggest that C values below  $1 \times 10^7$  are inappropriate for the numerical reproduction of the lauric acid melting process, while values above  $5 \times 10^7$  are unable to influence the process. Thus, it can be concluded that values between  $1 \times 10^7$  and  $5 \times 10^7$  are the most suitable for adjusting the constant C, especially the first one, which differed only 3.7% from the experimental results in the literature.*

**Keywords:** *Mushy Zone Constant, Melting Process, Lauric Acid, PCM, Thermal Storage.*