

ESTUDO DE SOLIDIFICAÇÃO EM TORNO DE UM TUBO VERTICAL USANDO PCM PARA SISTEMAS
DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA

Cláudia Rosa do Espírito Santo Nóbrega – claudiarosa@fem.unicamp.br
Kamal Abdel Radi Ismail– kamal@fem.unicamp.br
Universidade Estadual de Campinas, www.unicamp.br

F1 Princípios – Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor

Resumo. *Sistemas eficientes, sistemas termicamente projetados para conservação e utilização eficiente de energia e sistemas não renováveis intermitentes utilizam conceitos de armazenamento para melhor aproveitamento de energia disponível. Das técnicas disponíveis de armazenamento em sistemas térmicos o armazenamento em calor latente é a mais preferida por ter maior capacidade de armazenamento e menor queda na temperatura durante os processos de carregamento e descarregamento. Estas características tornam esse conceito adequado para acoplamento com sistemas de refrigeração e ar condicionado domésticos e comerciais por ser eficientes e de volume reduzido. O presente estudo tem como objetivo principal investigar numericamente e experimentalmente o processo de formação de gelo em torno de tubos lisos verticais para aplicação em sistemas de geometria vertical para de armazenamento de calor latente. Tendo em vista aplicação com unidades residenciais e comerciais, a água será utilizada como material de mudança de fase por motivos de custo, disponibilidade, e segurança. Neste estudo foi desenvolvido um modelo matemático de armazenador de calor latente, com formulação uni dimensional de problema de condução pura com mudança de fase considerando a temperatura constante ao longo do tubo liso. A solução numérica foi baseado no método de volumes finitos. A investigação experimental foi realizada no tubo liso axial variando-se as temperaturas do fluido de trabalho em -10 e -5, foram analisados a posição de interface e massa solidificada. Os resultados numéricos comparados aos resultados experimentais apresentaram uma boa concordância para os parâmetros analisados.*

Palavras-chave: *Armacenador de calor latente, Material de mudança de fase, Massa solidificada, Tempo de solidificação completa.*

1. INTRODUÇÃO

Os últimos anos os transtornos causados pelo racionamento de energia em determinados períodos do ano, devido a alta demanda de energia requerida nos horários de picos e a baixa disponibilidade de energia. O armazenamento de energia é um processo que está tornando-se cada vez mais importante e indispensável nas aplicações de sistemas térmicos, pois essa forma de tecnologia realiza o aproveitamento da energia disponível por um determinado período de tempo que pode ser posteriormente usada em um período que não coincida com a alta demanda de energia. Existem diversas técnicas de armazenamento, mas neste estudo serão abordados estudos de armazenamento em sistemas térmicos.

Gonçalves (1996) desenvolveu um modelo numérico para prever o comportamento do sistema de armazenamento avaliando a solidificação e fusão de um armazenador de calor/frio com geometria anular e aletas verticais alternadas. Analisou o desempenho da unidade armazenadora verificando a efetividade, número de unidades de transferência além de avaliar os efeitos da variação da geometria do armazenador, como o número de aletas, comprimento da unidade, comprimento das aletas, e razão de diâmetro do armazenador, parâmetros operacionais como o fluxo de massa, número de Reynolds, número de Stefan, número de Biot, temperatura de trabalho. Em seu trabalho foi realizado o modelamento matemático de armazenadores de calor latente envolvendo o problema de mudança de fase, por ser um fenômeno de difusão e de continuidade a solução deste problema é muito difícil, pois a interface entre as fases sólida e líquida se move à medida que o calor latente é absorvido ou liberado.

Rösler e Brüggemann (2011) realizaram um estudo numérico e comparação com experimentos em armazenador de energia de calor latente tipo casco-tubo, onde a parafina fica em um casco. O sistema é analisado por meio de simulação numérica e medidas Karthikeyan e Velraj (2012) apresentaram os resultados de uma investigação numérica da unidade de armazenamento de leito fixo preenchida com PCM encapsulado em recipientes esféricos e comparados os resultados com diferentes modelos matemáticos. Os autores apresentaram um estudo comparativo de três diferentes modelos matemáticos para sistema de armazenamento de calor latente de leito fixo, composto por um tanque de armazenamento cilíndrico preenchido por parafina encapsulado em recipientes esféricos

Reid et al. (2013) apresentaram uma avaliação computacional de um sistema de armazenamento de energia de calor latente. Um sistema capaz de receber, absorver e converter a energia solar, foi projetado para uso em satélite. A conversão da energia térmica para elétrica é obtida por células thermophotovoltaicas que, em seguida, fornecem energia elétrica para vários componentes de satélite.

Ismail et al.(2015) apresentou os resultados de um estudo numérico de um tubo armazenador de calor latente com geometria anular alternada . Esse arranjo foi investigado com o objetivo de aumentar a taxa de transferência de calor,

reduzindo o tempo para a completa mudança de fase e permitindo processos simultâneos de carregamento e descarregamento. O modelo proposto foi baseado em pura condução e sua validade foi estabelecida por comparação com os dados disponíveis. Em outro trabalho, Ismail et al (2016) apresentaram os resultados de uma investigação em tubos axialmente aletados para aprimorar os processos de carregamento e descarregamento de unidades de armazenamento térmico. O modelo proposto foi baseado na condução pura nas fases sólida e líquida. A abordagem de entalpia e o método de volumes finitos foram utilizados no tratamento numérico. As previsões numéricas foram comparadas com resultados experimentais e foi observada uma concordância relativamente boa.

Este trabalho tem por objetivo a investigação de um tubo vertical com temperatura constante ao longo do tubo submerso em um PCM líquido com temperatura próxima a temperatura de mudança de fase. Para obtenção das equações governantes é usado o modelo de condução pura, o modelamento foi feito uma abordagem de volumes finitos para discretização das equações e condições de contorno. Foi desenvolvido um código computacional em matlab e otimizado para verificar e validar com os resultados obtidos experimentalmente. Os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância comparados aos resultados experimentais.

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

O modelo matemático consiste no tratamento de solidificação de PCM entorno de um tubo vertical. A investigação consiste no estudo do processo de mudança de fase entorno do tubo, no interior do tubo o fluido secundário circula absorvendo o calor do PCM que inicialmente encontra-se no estado líquido. A Figura 1 mostra um corte transversal do armazenador com o detalhe da região de simetria do estudo de caso.

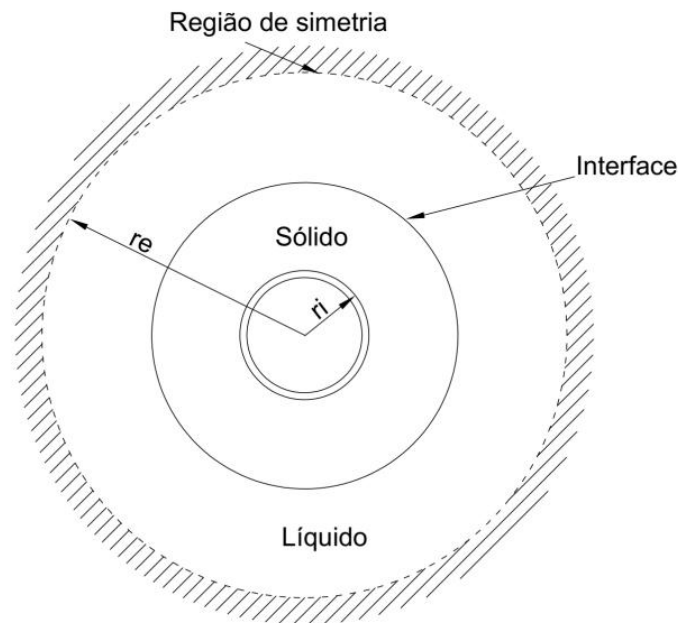


Figura 1 Região de simetria

Considerando que o problema estudado trata-se de um processo de transferência de calor por condução pura uni dimensional, e que não há influencia da convecção natural durante o processo de solidificação, a equação da energia pode ser escrita da seguinte forma para os estados sólido e líquido do PCM. A equação de energia para a fase líquida do PCM é:

$$\rho_l c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) \quad (1)$$

A equação de energia para fase sólida é dada:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \quad (2)$$

As condição de contorno da interface líquido/sólido é representada pela equação abaixo:

$$\left[k_s \frac{\partial T_s}{\partial t} - k_l \frac{\partial T_l}{\partial t} \right] = \rho_s L \frac{\partial r_s}{\partial t} \quad (3)$$

As condições iniciais e finais são dadas conforme apresentado abaixo :

$$T(r, t = 0) \geq T_m^+ + \Delta T \quad (4)$$

$$T(r, t = t_f) \leq T_m^- - \Delta T \quad (5)$$

Os valores do calor latente e calor específico por unidade de volume são considerados para a água no estado líquido e no estado sólido(gelo), conforme constantes apresentadas abaixo:

$$C_S = \rho_S c_S \quad (6)$$

$$C_L = \rho_L c_L \quad (7)$$

$$\lambda = \rho_S L \quad (8)$$

Para os cálculos numéricos foram usadas as formas adimensionais das condições iniciais e finais das condições de contorno com o objetivo de facilitar os cálculos das Eqs. (1,2), as novas variáveis são apresentadas abaixo :

$$\theta = \frac{T_m - T}{T_m - T_w} ; R = \frac{r}{r_i} ; Fo = \frac{k_s t}{C_s r_i^2} ; \tilde{C} = \frac{\bar{C}}{C_s} ; \tilde{K} = \frac{\bar{k}}{k_s} ; \xi = \frac{\Delta T}{T_m - T_w} \quad (9)$$

Segundo Bonacina et al. (1973) a equação governamental, as condições de contorno, condições iniciais e finais são reescritas conforme as Eqs. (10,11) expressa nos termos das novas variáveis.

$$\tilde{C}(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \tilde{k}(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) \quad (10)$$

$$\theta = -\xi \quad \text{for } Fo = 0; \quad \theta = \xi \quad \text{for } Fo = Fo_f \quad (11)$$

As condições de contorno considerando a temperatura constante ao longo do tubo os termos das novas variáveis dadas por:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{R=1} = 1 \quad (12)$$

Região de simetria:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{R=\frac{r_e}{r_i}} = 0 \quad (13)$$

As equações apresentadas foram implementadas um código numérico para prever os resultados independente da tamanho da malha. Os pontos radiais do tubo foram de 1000 com um passo de tempo de 10⁻⁶s. Estes valores foram usados para as simulações numéricas proposta.

3. ANALISE EXPERIMENTAL

Foi construída uma bancada de teste experimental conforme apresentada na Fig 2 para a realização dos experimentos da solidificação do PCM (água) entorno do tubo vertical. A bancada é composta por um sistema de refrigeração por compressão a vapor, um circuito de fluido secundário e por uma seção de teste. O fluido secundário (Etanol) é resfriado pelo fluido refrigerante que circula pelo trocador de calor. O controle da temperatura foi realizado por um termostato interligado ao tanque do fluido secundário. A vazão da seção de teste foi controlada por uma placa de orifício conectada paralela ao manômetro antes do tanque da seção de testes. Este tem formato cilíndrico de 300 mm de diâmetro, 300 mm de altura e 20 mm de espessura, contem um tubo vertical de cobre de 27 mm de diâmetro por onde passa o fluido secundário. Foi usada uma camera digital de alta resolução para fotografar o gelo formado ao longo do tempo, fixando-se uma escala de referencia. Termopares tipo T foram fixados na entrada, no meio, na saída do tubo do tanque da seção de teste e no interior do tanque de fluido secundário.

Os termopares foram calibrados apresentando uma faixa de erro de $\pm 0,5$ °C, a precisão de conversão das imagens foi de $\pm 0,5$ mm e a vazão mássica do fluido secundário (Etanol) foi calibrada apresentando um erro de $\pm 10^{-4}$ kg/s.

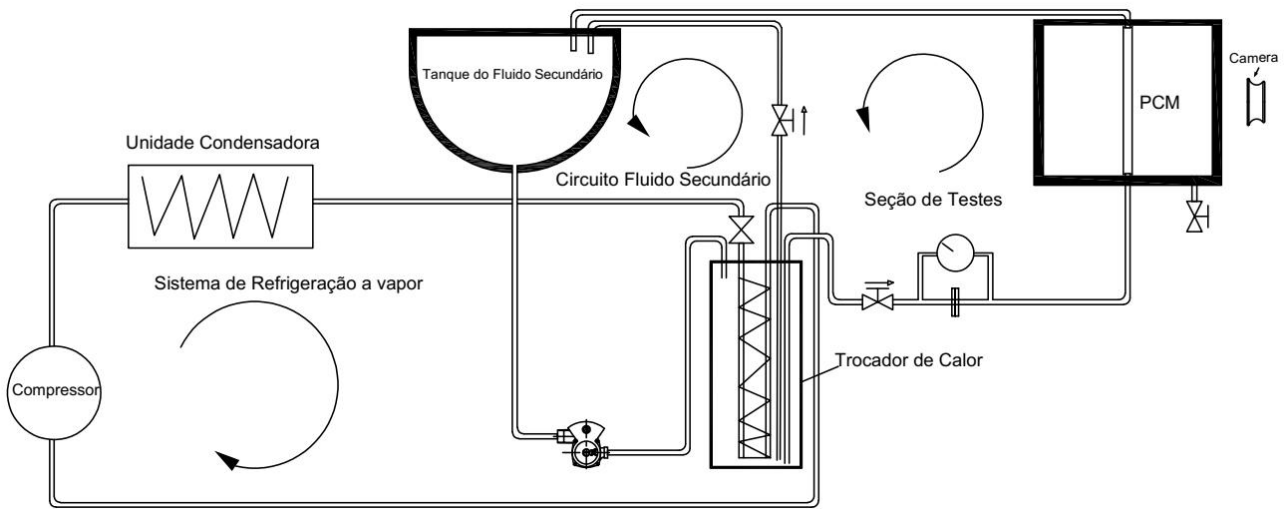


Figura 2 Esquema da bancada de teste

Os teste foram realizados variando-se as condições iniciais: temperatura inicial de trabalho, que varia entre -5°C e 10°C ; e a vazão de trabalho, que varia conforme os testes. Ao atingir as condições desejadas o teste foi iniciado imediatamente. Durante as duas primeiras horas são realizadas medições no intervalo de 5 minutos. Após isso, o intervalo passou a ser de 30 minutos. Decorridas cinco horas, o intervalo passou para 50 minutos até finalizar a seção de testes. O teste é considerado terminado quando não há mais variações significativas da posição de interface em três intervalos de tempos consecutivos. Uma fotografia típica do tubo vertical é mostrada na Fig. 3, onde a posição da interface é rastreada e convertida em dimensão real usando o programa Tracker.

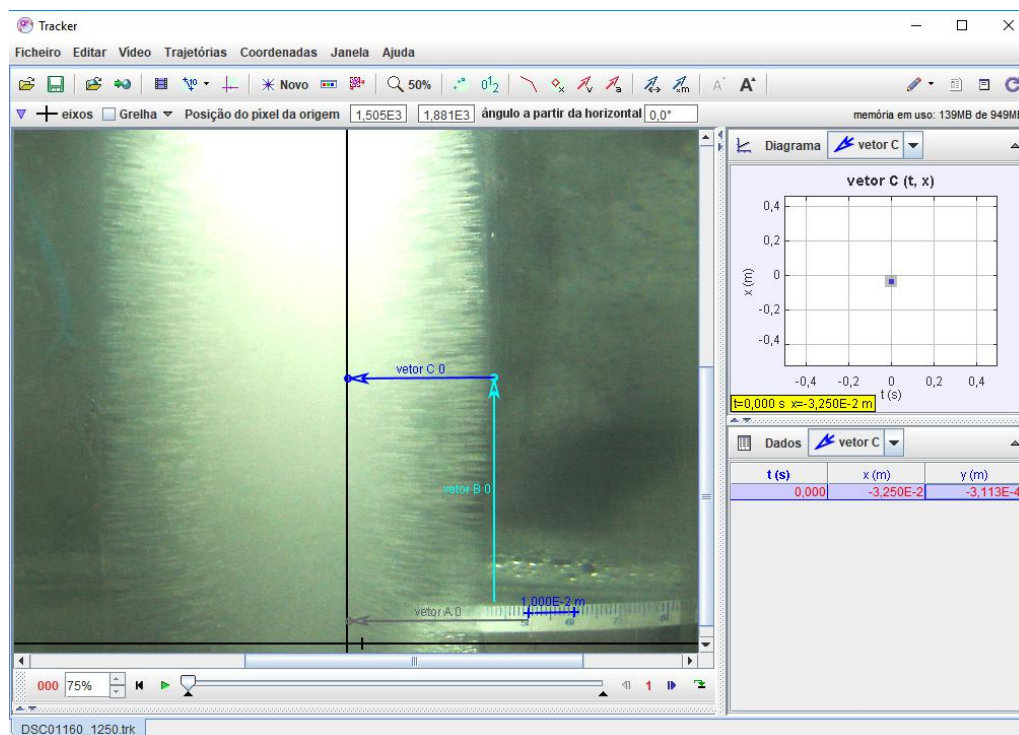


Figura 3 Programa Tracker usado para tratar as fotos digitalizadas

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são discutidos o avanço da posição da interface do gelo formado no tubo vertical e a massa solidificada durante o processo de solidificação. Os resultados apresentados são para as faixas de temperaturas de -10° e -5°C .

Figura 4 Mostra a variação de posição da interface em função do tempo. Como pode ser verificado a variação nos primeiras horas é muito significativo devido a baixa resistência térmica da camada de gelo. Com o aumento do tempo a camada de gelo formada cresce aumentando assim a resistência térmica e consequentemente reduzindo a taxa de transferência de calor.

A redução da temperatura aumenta a gradiente térmico entre a superfície do tubo e o PCM, assim aumentando a taxa de transferência de calor como pode ser visto na Fig. 5

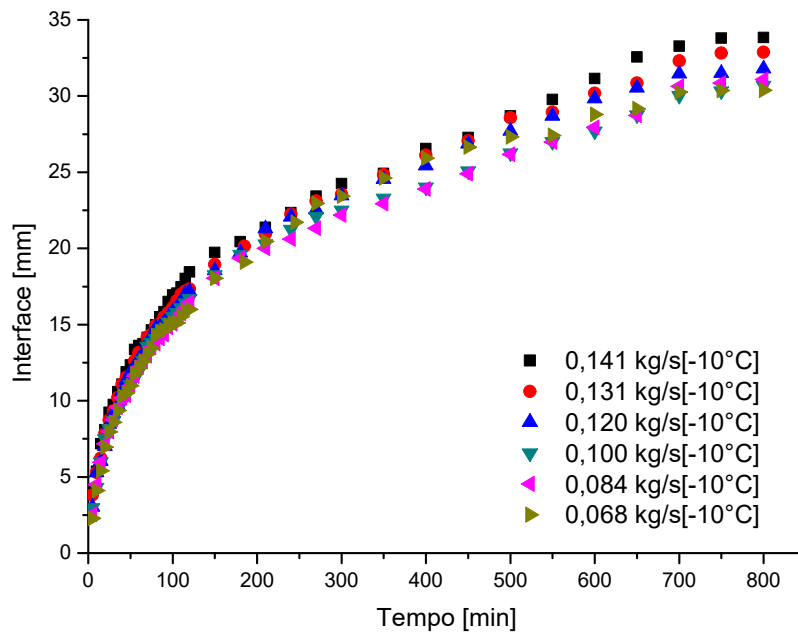


Figura 4 Interface em função do tempo à temperatura de -10°C

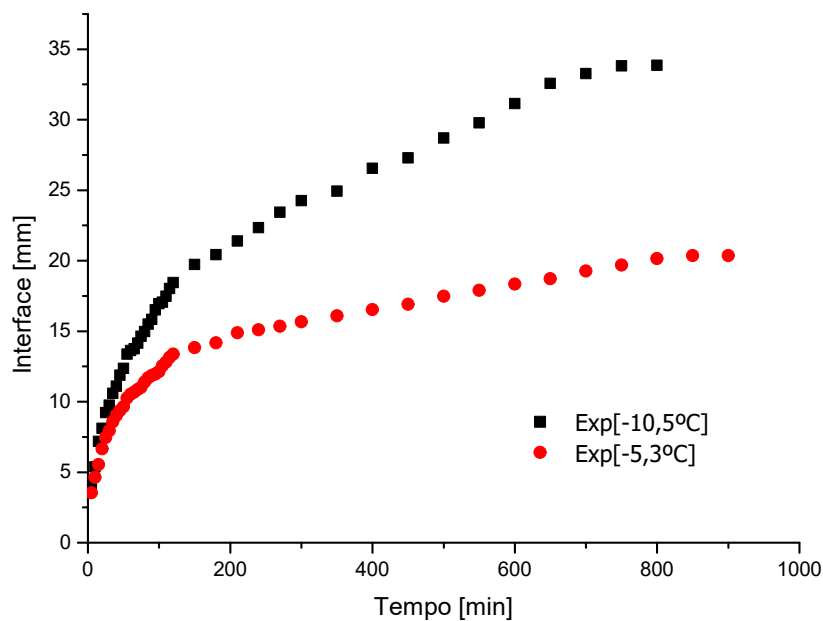


Figura 5 Interface em função do tempo

A massa solidificada para temperatura de $-10,5^{\circ}\text{C}$ apresentou, no final do experimento, um aumento de 115% de massa solidificada total comparada ao teste realizado para temperatura de $-5,3^{\circ}\text{C}$, ou seja, a massa solidificada à temperatura de $-5,3^{\circ}\text{C}$ foi de 0,72kg enquanto que a massa solidificada à temperatura de $-10,5^{\circ}\text{C}$ foi de 1,56kg. Observa-se que o tempo de solidificação completa do PCM foi reduzido por cerca de 16% como pode ser observado na Fig 6.

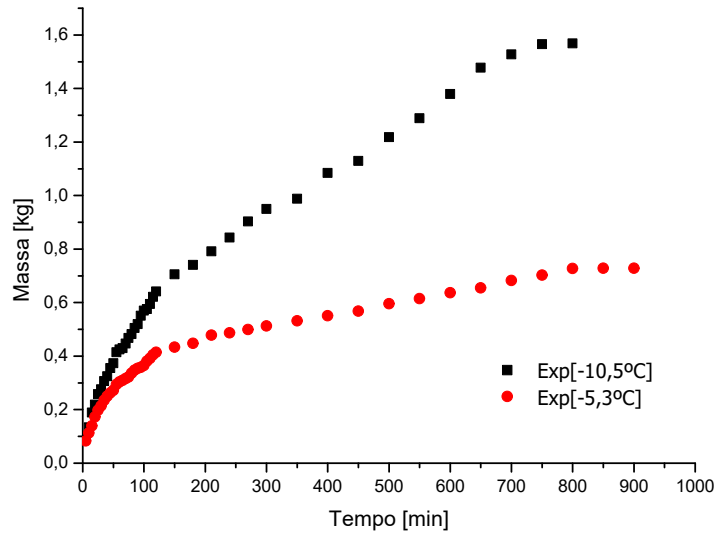


Figura 6 Massa em função do tempo

Para validar os resultados obtidos numericamente, comparou-se os resultados experimentais para o caso de temperatura constante ao longo do tubo. As Figs. 7 e 8 apresentam a posição de interface e massa solidificada respectivamente variando em função do tempo adimensional onde os resultados numéricos e experimentais, para o caso de temperatura constante de -10°C , são apresentados. Observa-se que as curvas têm o mesmo comportamento.

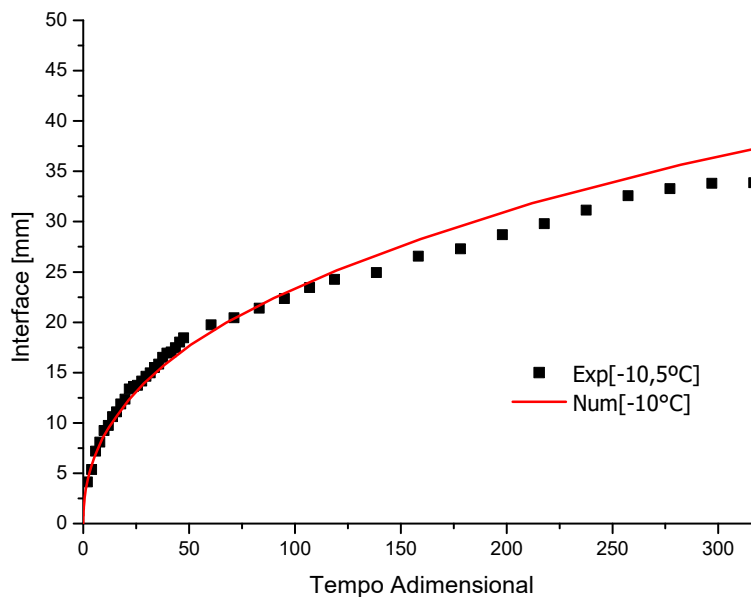


Figura 7 Comparação numérica e experimental da interface em função do tempo adimensional à temperatura de $-10,5^{\circ}\text{C}$

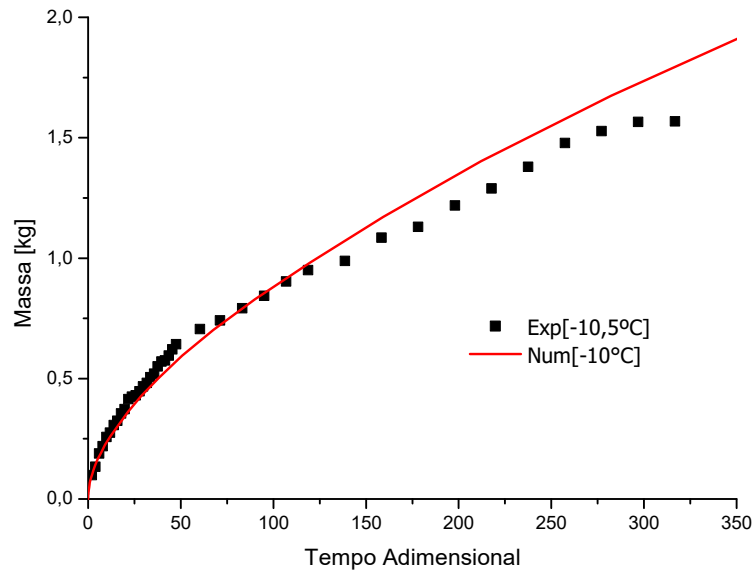


Figura 8 Comparação numérica e experimental da massa em função do tempo adimensional à temperatura de -10,5°C

Nas figuras 9 e 10 apresentam respectivamente a posição de interface para o caso de temperatura constante de -5°C e massa solidificada, numérica e experimental em função do tempo adimensional. Observa-se que as curvas apresentaram uma boa concordância com os resultados obtidos para a temperatura de -5°C.

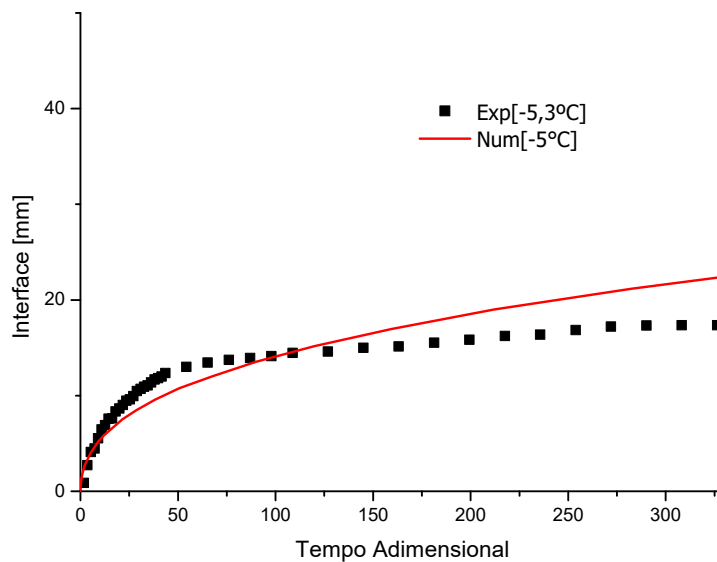


Figura 9 Comparação numérica e experimental da interface em função do tempo adimensional à temperatura de -5,3°C

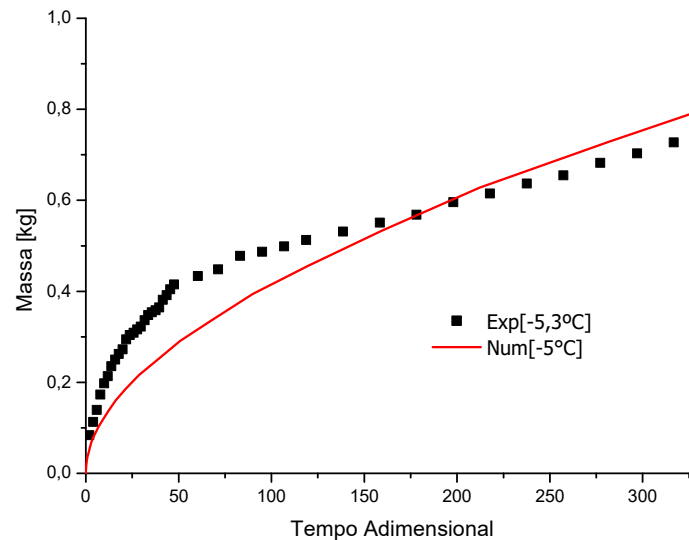


Figura 10 Comparação numérica e experimental da massa em função do tempo adimensional à temperatura de $-5,3^{\circ}\text{C}$

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo para solidificação em torno de um tubo vertical submerso no PCM (água), considerando temperatura constante ao longo do tubo. Foram realizados testes experimentais para as faixas de temperatura de -10°C e -5°C e usados para validar o modelo numérico. Foi verificado que a redução da temperatura do fluido de trabalho promove um aumento significativo da massa de gelo formado e consequentemente da energia armazenada. Também, a redução da temperatura resulta na redução de tempo de solidificação completa, o que é benéfico na implantação prática do sistema de armazenamento.

6. AUTORIZAÇÕES / RECONHECIMENTO

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluso neste artigo.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece a FAPEMA pela bolsa de estudos e o segundo autor agradece ao CNPQ pela bolsa de pesquisa PQ.

7. REFERÊNCIAS

- Bonacina, C., G. Comini, A. Fasano, e M. Primicerio. 1973. Numerical Solution of Phase-change Problems. *International Journal Heat Mass Transfer*.16:1825-1832.
- Gonçalves, M. 1996. Armazenadores de Calor Latente de Geometria Anular com Aletas Alternadas, tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP.
- Ismail, K. A. R., M. Gonçalves e F. A. M. Lino. 2015. "A parametric study of solidification of PCM in an annulus with alternating fins". *Int. Journal of Research in Engineering and Advanced Technology*. 3 (4):188-202.
- Ismail, K. A. R. M.Gonçalves e F. A. M. Lino, 2016. "Solidification of PCM around a finned tube: modeling and experimental validation". *Journal of Basic and Applied Research International*.12 (2):115-128.
- Karthikeyan S., R. Velraj. 2012. Numerical investigation of packed bed storage unit filled with PCM encapsulated spherical containers - A comparison between various mathematical models. *International Journal of Thermal Sciences*. 60:153-160.
- Reid, R.M., B.D. Schrefe, e N.R.Webb.2013. Computational evaluation of a latent heat energy storage system. *Solar Energy*. 95:99-10.
- Rösler, F., D. Brüggermann. 2011. Shell-and-tube type latent heat thermal energy storage: numerical analysis and comparison with experiments. *Heat Mass Transfer*.47:1027-103.

FORMAT INSTRUCTIONS FOR PAPERS SUBMITTED TO MERCOFRIO 2018

Abstract. *Efficient systems, thermally designed systems for energy conservation and efficient use, and intermittent non-renewable systems use storage concepts to better utilize available energy. From the available techniques of storage in thermal systems the storage in latent heat is the most preferred to have greater capacity of storage and smaller fall in the temperature during the processes of loading and unloading. These characteristics make this concept suitable for coupling with systems of refrigeration and air conditioning systems because they are efficient and of reduced volume. The present study has as main objective to investigate numerically and experimentally the process of ice formation around vertical smooth tubes for application in systems of vertical geometry for storage of latent heat. For application with residential and commercial units, water will be used as phase change material for reasons of cost, availability, and safety. In this study a mathematical model of latent heat storage was developed, with a uni dimensional formulation of pure conduction problem with phase change considering the constant temperature along the smooth tube. The numerical solution was based on the finite volume method. The experimental investigation was performed on the vertical tube varying the working fluid temperatures at -10 and -5, the interface position and solidified mass were analyzed. The numerical results compared to the experimental results showed a good agreement for the analyzed parameters.*

Keywords: Latent heat storage, Phase change material, Solidified mass, Complete solidification time