

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA SOLIDIFICAÇÃO EM TORNO DE UM TUBO ALETADO
RADIALMENTE COM E SEM PROMOTOR DE TURBULÊNCIA**

Raquel da Cunha Ribeiro da Silva¹
Kamal Abud Radi Ismail²

^{1,2}Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Caixa Postal 6122
13083-970 Campinas SP Brasil .

Resumo: *O armazenamento de calor na forma de calor latente representa uma alternativa de grande potencial em sistemas intermitentes e de conservação. Uma das geometrias menos exploradas na literatura e no campo de aplicação é a geometria cilíndrica com aletas fixadas radialmente ao longo do tubo. As aletas neste caso representam dispositivos para aumentar a taxa de transferência de calor e assim a solidificação do PCM. Com o intuito de aumentar ainda mais a taxa de solidificação do PCM, a inserção de um promotor de turbulência ao longo do tubo, provoca maior agitação e turbulência que por sua vez aumenta o coeficiente de troca de calor e assim a taxa de solidificação do PCM (Phase Change Material). Assim este estudo visa investigar as influências dos parâmetros geométricos e operacionais sobre a velocidade da interface, tempo de solidificação completa e massa total solidificada e conseqüentemente a energia total armazenada. Na investigação experimental foram testados tubos com diversas aletas variando os diâmetros de 40 a 180 mm, várias vazões de fluido secundário e várias temperaturas de operação com e sem promotor de turbulência e com e sem aletas com o objetivo principal de quantificar os efeitos das aletas e promotor de turbulência sobre a taxa de solidificação ou velocidade da interface, tempo de solidificação completa e a massa solidificada total*

Palavras-chave: *tubo aletado, aleta radial, PCM, armazenador de frio, calor latente, promotor de turbulência, solidificação de líquido*

1. INTRODUÇÃO

Com a conscientização do problema energético e com a procura de alternativas para substituir o petróleo, ocorreu uma significativa mudança de conceito nos projetos de unidades armazenadoras de calor e frio. A importância do armazenamento deste tipo de energia está relacionado com a não coincidência da demanda e do fornecimento de energia disponível, e tem como finalidade o nivelamento desta curvas.

Diversos pesquisadores têm estudado e salientam a importância dos problemas de fronteira móvel, destacando-se aqueles que envolvem mudança de fase, em várias aplicações na área da engenharia. No contexto deste trabalho, o termo “mudança de fase” refere-se aos processos relativos à solidificação e fusão.

Segundo Ismail (1998) as fases sólida e líquida são caracterizadas pela presença de forças coesivas mantendo os átomos em contato. No caso de sólido as moléculas vibram em torno de posições de equilíbrio fixas, enquanto no caso de líquido são mais energéticas do que na fase sólida e, portanto, para que a fase sólida mude para a fase líquida é necessária uma energia adicional que vença as forças coesivas. Essa energia é chamada de calor latente ou de calor de fusão, representada como a diferença térmica (entalpia) entre os dois estados; líquido e sólido.

Ainda segundo Ismail (1998) a transição de uma fase para outra, isto é absorção ou liberação de calor latente, acontece numa certa temperatura em função da energia disponível. A região de transição de fase onde o sólido e o líquido coexistem é chamada de interface.

Uma extensa literatura pode ser encontrada sobre a diversidade da aplicação dos processos de mudança de fase, tornando-se relevante a descrição e o estudo da condução de calor com mudança de fase. Entre tais aplicações pode-se destacar a formação de gelo em lagos e rios, o congelamento da água em sistemas de tubulações, sistema de energia térmica, congelamento de alimentos, solidificação de metais, etc. (González, 2006).

Superfícies estendidas têm larga aplicação industrial como aletas instaladas nas paredes de equipamentos de transferência de calor, a fim de aumentar a taxa de aquecimento ou resfriamento (Kreith e Bohn, 2003).

Segundo Lamberg e Sirén (2003) o aumento da transferência de interna de calor é essencial, especialmente em processos de solidificação onde a principal forma de transferência é através da condução. O objetivo do trabalho destes autores foi apresentar um modelo analítico simplificado que possa prever a localização da interface móvel e a distribuição da temperatura na aleta no processo de solidificação com a temperatura da parede constante. Foram comparados resultados analíticos e numéricos. Foi observado que o modelo analítico é o mais adequado para prever a localização da interface e a distribuição da temperatura na aleta. Calculou-se também a fração de massa de PCM (*phase change material*) solidificado. Estes autores concluíram que a simplificação do modelo bidimensional de transferência de calor para unidimensional afeta na precisão dos cálculos.

O aumento da transferência de calor graças ao tratamento da superfície pode ser obtido pelo aumento da turbulência ou da área da superfície, da mistura mais eficiente ou de vórtices no escoamento. Esses efeitos resultam quase sempre no aumento da queda da pressão juntamente com o aumento da transferência de calor, (Kreith e Bohn, 2003).

O aumento da transferência de calor é quase sempre superior ao da transferência de calor relativo a uma superfície de transferência de calor lisa de mesma área.

Paixão (2009) utilizou em seu trabalho de solidificação em geometria anular cilíndrico um promotor de turbulência para a intensificação da troca térmica entre o PCM e o refrigerante, o autor utilizou um promotor de turbulência no escoamento do refrigerante através do tubo interno. O promotor de turbulência utilizado foi uma fita de cobre helicoidal.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A bancada experimental foi projetada, montada e testada no Laboratório de Armazenamento Térmico e Tubos de Calor do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos (DETF) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. O objetivo desse trabalho é investigar as influências dos parâmetros geométricos e operacionais sobre a velocidade da interface, tempo de solidificação completa e massa total solidificada e conseqüentemente a energia total.

Para o tubo aletado, foram utilizados quatro tamanhos de aletas, seis vazões do refrigerante secundário (álcool etílico) e quatro temperaturas do fluido refrigerante secundário, -10°C , -15°C , -20°C e -25°C , conforme mostrado na Tab. 1. Os mesmos testes foram repetidos utilizando o promotor de turbulência. Também foram realizados experimentos com tubos sem aletas para efeitos comparativos.

Tabela 1. Parâmetros utilizados como, temperatura, vazão e número de Reynolds.

Diâmetro das Aletas (mm)	Temperatura	Vazão kg/s	Número de Reynolds
40, 60, 120, 180	-10°C , -15°C , -20°C , -25°C	0,031	2168,70
		0,029	2028,78
		0,026	1818,91
		0,022	1539,08
		0,018	1259,24
		0,013	909,45

Os fluidos de transferência de calor utilizados no sistema foram o monoclorodifluormetano (R-22) como refrigerante primário e o álcool etílico com refrigerante secundário.

O esquema geral do sistema proposto, apresentado na Fig 1 é composto por dois circuitos: de refrigeração e circuito de transporte de energia.

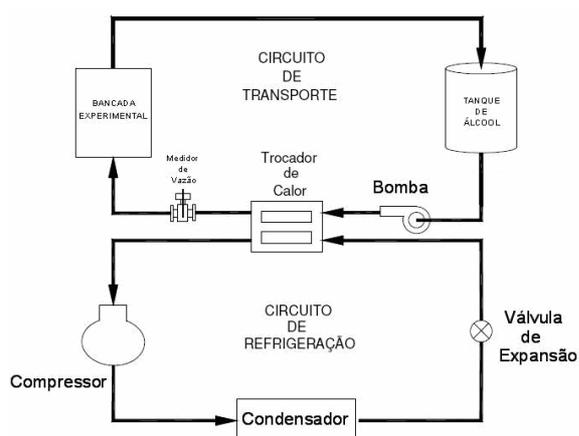


Figura 1. Esquema Experimental.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da posição da interface em função do tempo, que foi obtida através das fotos tiradas durante o experimento, foi possível ter a informação da velocidade de avanço da interface e da quantidade da massa solidificada.

Durante a realização dos testes experimentais foi observado que nos 60 minutos iniciais de cada experimento a solidificação do PCM no tubo ocorre de forma rápida comparando-se com os próximos minutos.

A principal característica de um armazenador de calor latente é a alta quantidade de energia armazenada depois de certo intervalo de tempo. A energia armazenada é diretamente proporcional à massa solidificada.

As Figuras 2 e 3 mostram a posição da interface em função do tempo para uma aleta de 60 mm de diâmetro e temperaturas de -25°C e -15°C . Percebe-se que para um mesmo tamanho de aletas e temperaturas diferentes, têm-se uma frente de solidificação maior para temperaturas menores e vazões maiores.

As Figuras 4 e 5 mostram o movimento da frente de solidificação para uma aleta de 120 mm e 40 mm de diâmetro respectivamente. A temperatura de trabalho no caso da aleta de 120 mm é de -20°C e da aleta de 40 mm diâmetro é de -10°C . Nota-se que com a diminuição da temperatura o tempo de solidificação completa é menor comparado com uma temperatura maior, e o avanço da frente de solidificação é pequeno comparando com outras temperaturas maiores.

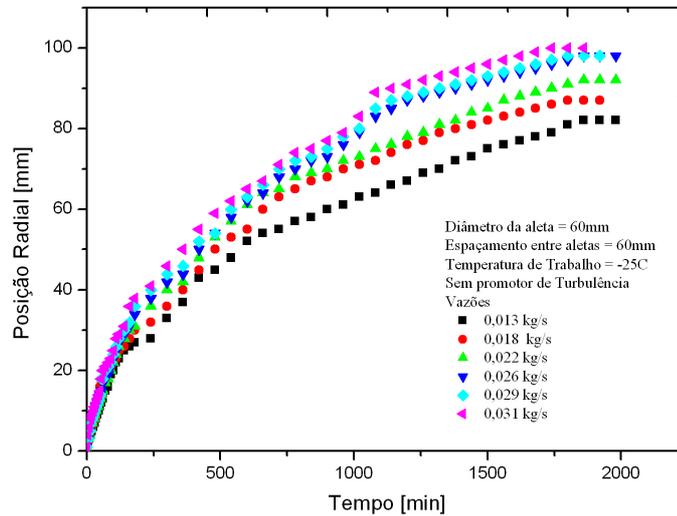


Figura 2 - Variação da posição da interface em função do tempo para uma temperatura de -25°C e uma aleta de 60 mm.

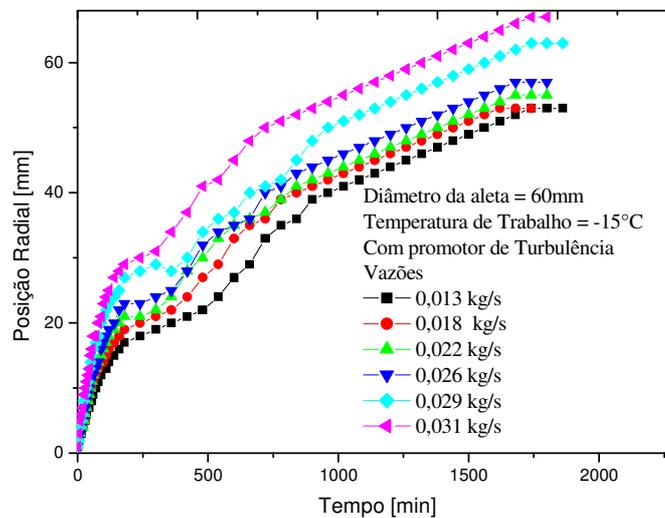


Figura 3-Variação da posição da interface em função do tempo para uma temperatura de -15°C e uma aleta de 60 mm.

Através do registro das imagens periódicas obteve-se a posição da interface com o tempo.

A temperatura de trabalho é a temperatura do fluido secundário que passa no interior do tubo do trocador de calor em estudo.

No efeito da temperatura sobre a posição da interface observou-se que à medida que a temperatura de trabalho diminui a troca térmica é maior, devido a um maior gradiente de temperatura entre a superfície do cilindro e o material de mudança de fase, portanto é possível observar uma posição da interface maior para uma menor temperatura.

Para o mesmo intervalo de tempo a solidificação ocorre de forma mais rápida e atinge posições radiais maiores para temperaturas mais baixas.

As Figuras 6 à 12 mostram graficamente este efeito da temperatura do fluido de trabalho sobre a posição da interface de solidificação

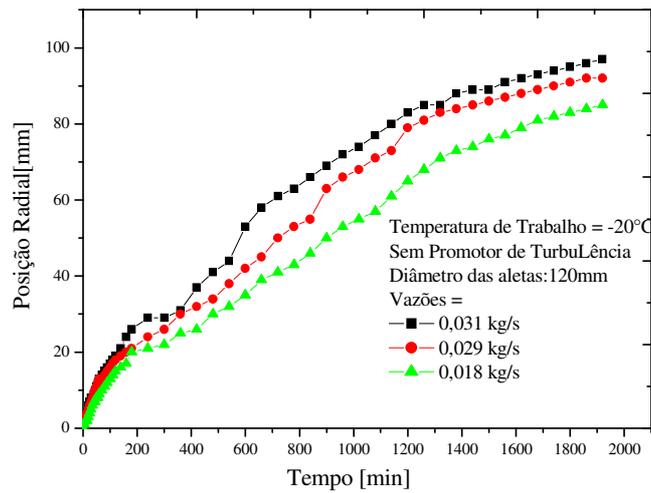


Figura 4-Variação da posição da interface em função do tempo para uma temperatura de -20°C e uma aleta de 120 mm.

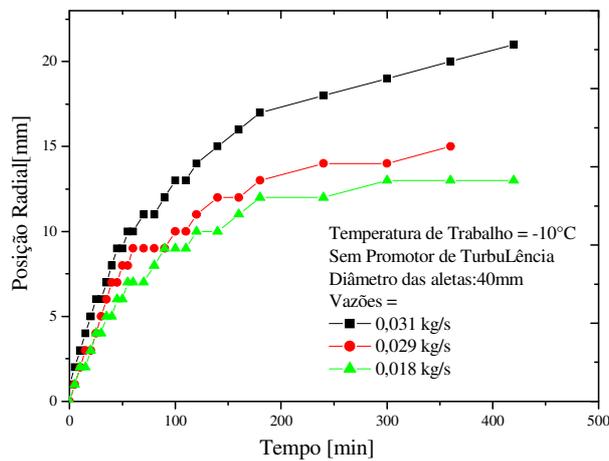


Figura 5-Variação da posição da interface em função do tempo para uma temperatura de -10°C e uma aleta de 40 mm.

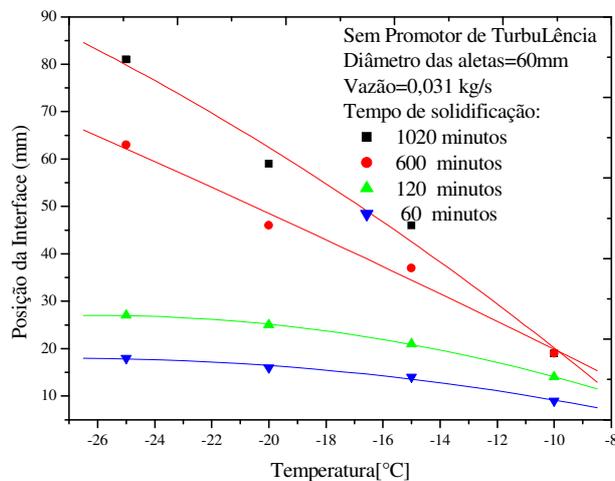


Figura 6-Efeito da temperatura sobre a posição da interface para uma vazão 0,031 kg/s e uma aleta de 60 mm.

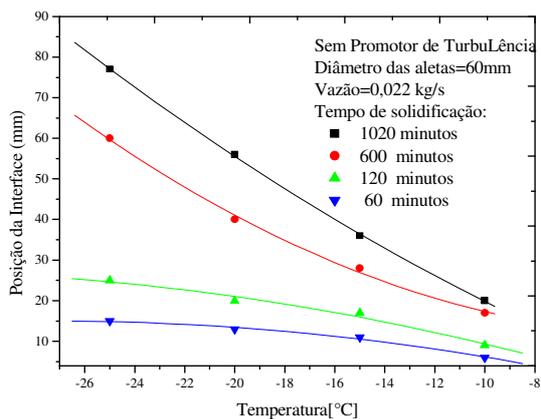


Figura 7-Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a posição da interface para uma vazão 0,022 kg/s e uma aleta de 60 mm.

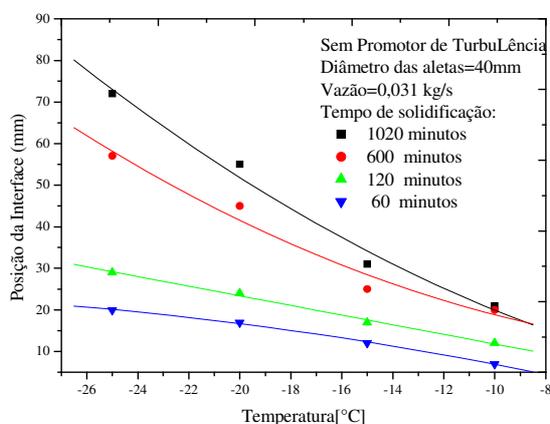


Figura 8-Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a posição da interface para uma vazão 0,031 kg/s e uma aleta de 40 mm.

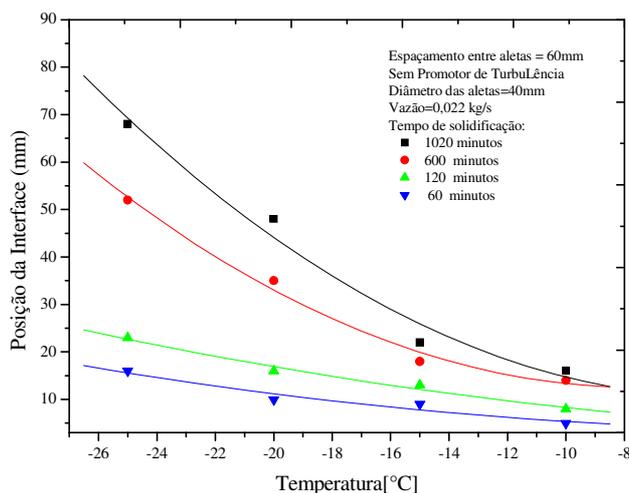


Figura 9-Efeito da temperatura sobre a posição da interface para uma vazão 0,022 kg/s e uma aleta de 40 mm.

As Figuras 13 a 16 mostram o efeito da temperatura de trabalho sobre o tempo de solidificação completa. O tempo de solidificação completa é representado pelo último ponto de cada gráfico. Considerou-se o tempo completo de solidificação a terceira hora consecutiva sem avanço da frente de solidificação significativo.

Cada figura mostra graficamente o efeito da temperatura de trabalho sobre o tempo de solidificação completa, para quatro temperaturas do fluido secundário.

Percebe-se que para o mesmo tempo, quanto menor a temperatura, maior a posição radial. O tempo de solidificação completa e a posição final da interface são maiores para as temperaturas de -25 e -20°C.

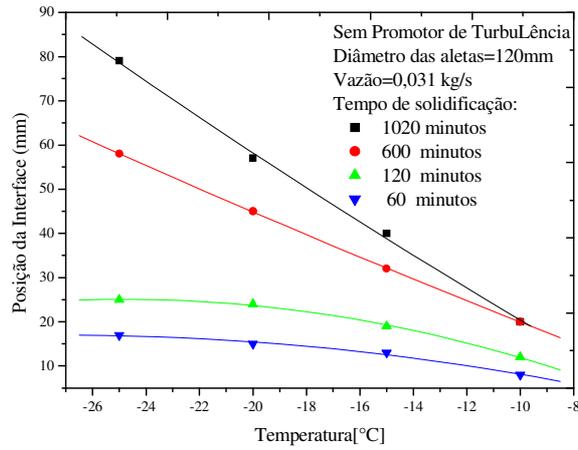


Figura 10-Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a posição da interface para uma vazão 0,031 kg/s e uma aleta de 120 mm.

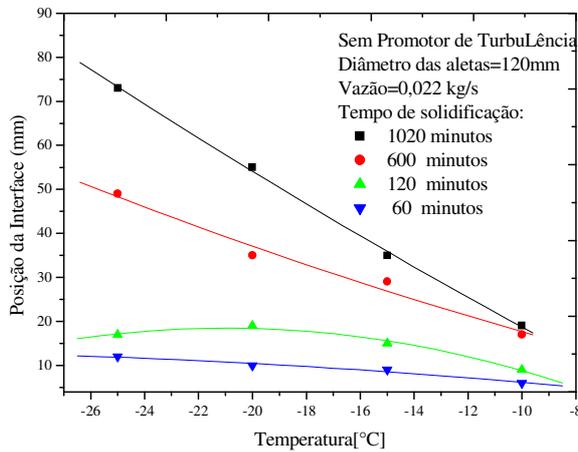


Figura 11-Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a posição da interface para uma vazão 0,022 kg/s e uma aleta de 120 mm.

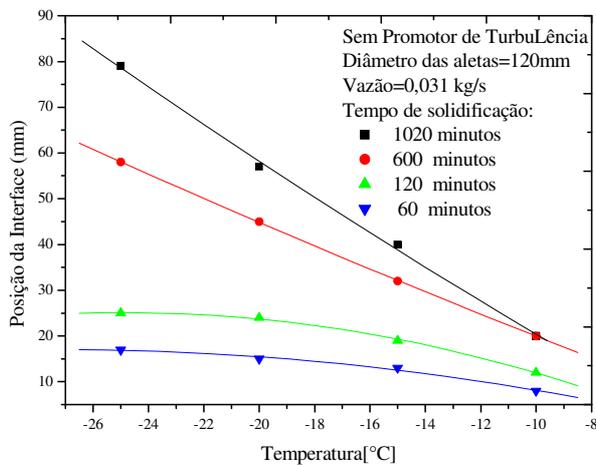


Figura 12-Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a posição da interface para uma vazão 0,031 kg/s e uma aleta de 120 mm.

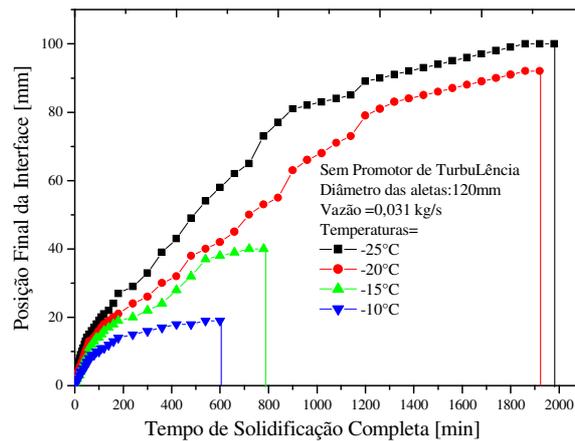


Figura 13-Efeito da temperatura de trabalho sobre a posição final da interface para uma vazão de 0,031 kg/s e aleta de 120 mm.

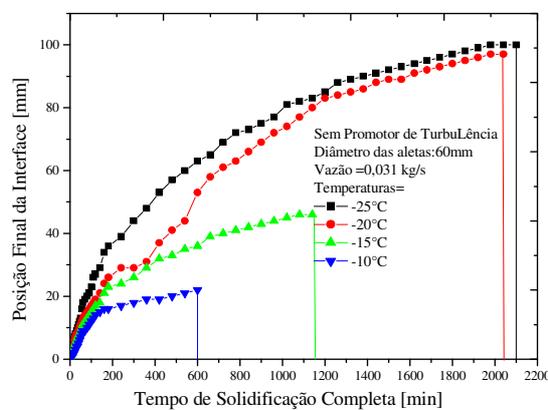


Figura 14-Efeito da temperatura de trabalho sobre a posição final da interface para uma vazão de 0,031 kg/s e aleta de 60 mm.

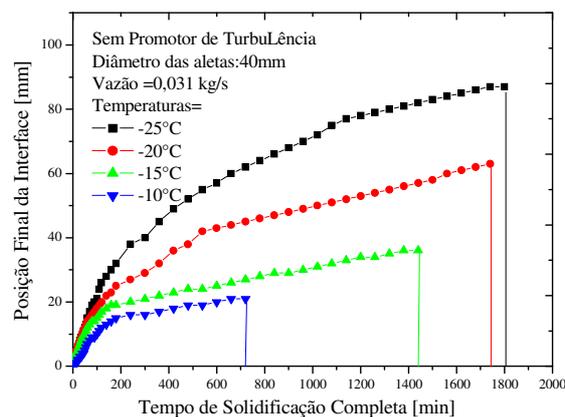


Figura 15-Efeito da temperatura de trabalho sobre a posição final da interface para uma vazão de 0,031 kg/s e aleta de 40 mm.

A aplicação de superfície estendida serve para aumentar a transferência de calor entre uma superfície e o fluido.

As Figuras 17 e 18 mostram o efeito do diâmetro da aleta sobre a posição radial da interface, para temperaturas de -10, -20 e -25°C.

Percebe-se em todos os gráficos, que a aleta de 60 mm, é a aleta com a maior posição de solidificação para os mesmos parâmetros comparando com as aletas maiores de 120 mm e 180 mm. Verifica-se ainda que a aleta de 120 mm solidifica mais do que a aleta de 180 mm para o mesmo intervalo de tempo.

Isto pode ser explicado devido às condições física que dependem da condição física da aleta. Duas condições de contorno seriam que quando a aleta é muito longa a temperatura na extremidade se aproxima a temperatura do fluido e, portanto quase não forma gelo, e outra que a ponta perde calor por convecção.

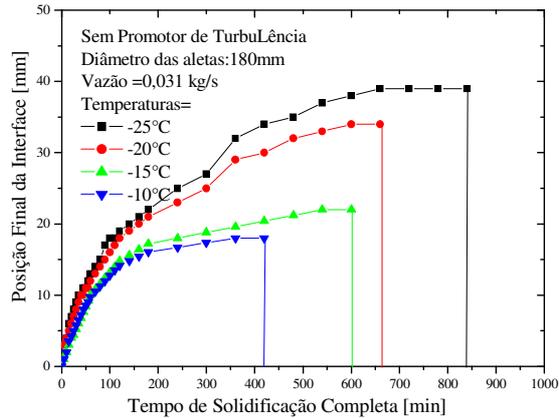


Figura 16-Efeito da temperatura de trabalho sobre a posição final da interface para uma vazão de 0,031 kg/s e aleta de 180 mm.

O uso da mola helicoidal como dispositivo de aumento de turbulência no interior do tubo do trocador de calor aumenta a rugosidade da parede interna, aumenta dessa forma o coeficiente de transferência de calor por convecção através da indução do turbilhonamento do escoamento do fluido secundário.

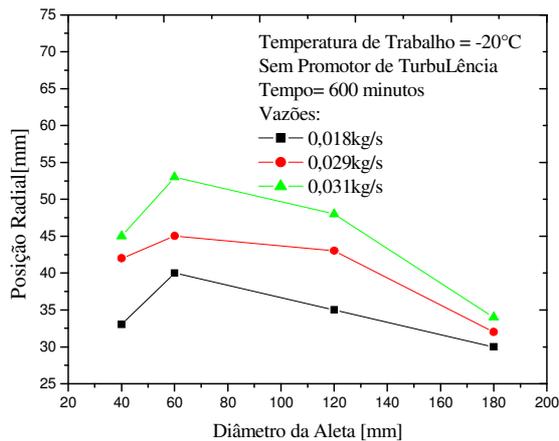


Figura 17 - Efeito do diâmetro da aleta sobre a posição da interface para uma temperatura de -20°C e um tempo de 600 minutos.

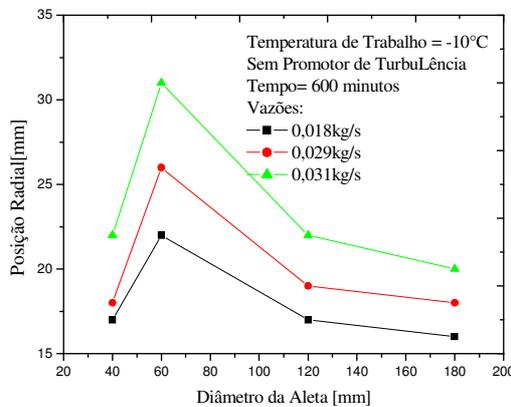


Figura 18-Efeito do diâmetro da aleta sobre a posição da interface para uma temperatura de -10°C e um tempo de 600 minutos.

As Figuras 19 a 21 mostram o efeito do promotor de turbulência sobre a posição da interface para temperaturas de -10, -15 e -25°C.

É possível perceber nas Figuras que para temperatura mais baixa com promotor de turbulência, -10°C, mostrou uma diferença de espessura da camada solidificada maior em relação às temperaturas maiores. Pode-se perceber que a diferença de espessura solidificada utilizando o promotor de turbulência para a temperatura de -25°C foi menor comparando com a temperatura de -15 e -10°C.

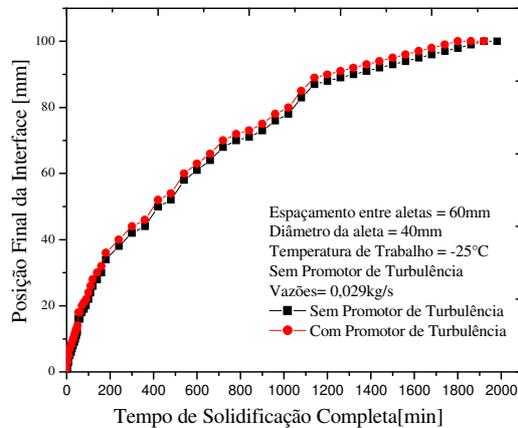


Figura 19-Efeito do promotor de turbulência sobre a posição radial da interface para uma temperatura de -25°C e uma aleta de 40 mm.

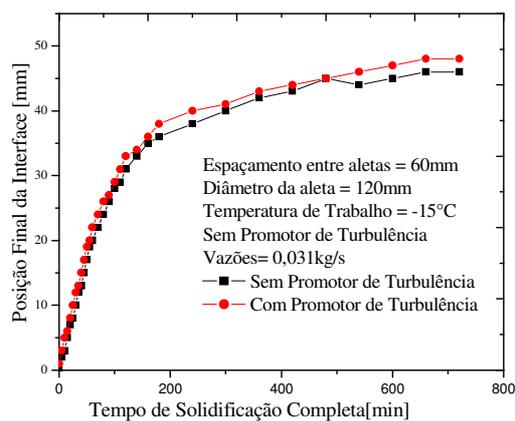


Figura 20-Efeito do promotor de turbulência sobre a posição radial da interface para uma temperatura de -15°C e uma aleta de 120 mm.

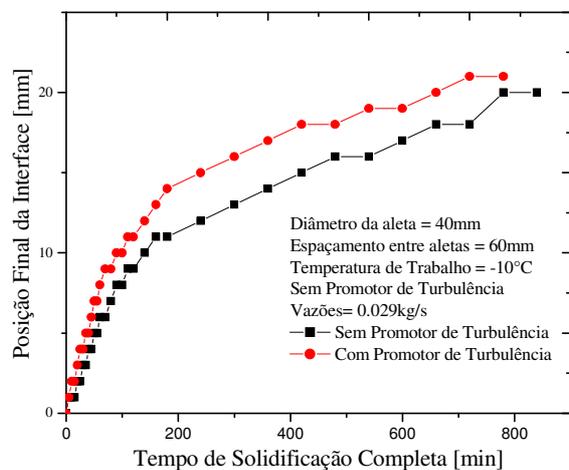


Figura 21-Efeito do promotor de turbulência sobre a posição radial da interface para uma temperatura de -10°C e uma aleta de 60 mm.

3. AGRADECIMENTOS

À CAPES

4. REFERÊNCIAS

- Gonçalves, M. “Armazenadores de Calor Latente de Geometria Anular Com Aletas Alternadas!”, Tese de Doutorado, Faculdade De Engenharia Mecânica, Universidade Estadual De Campinas – Unicamp, Campinas, 1996.
- Ismail, K.A.R. “Banco de Gelo-Fundamentos E Modelagem”, Campinas, 1998.
- Lamberg P, “Approximate Analytical Model For Two Phase Solidification Problem In A Finned Phase Change Material Storage”. Applied Energy, V.77, Pp 131-152, 2004.
- Lunardi, J.V.’ Heat Transfer With Freezing And Thawing, Elsevier Science, New York, 1991.
- Sousa, Lourival Filho, Estudo Numérico-Experimental De Mudança De Fase Em Torno De Tubo Curvo”, Campinas: Faculdade De Engenharia Mecânica, Universidade Estadual De Campinas, 2009.
- Paixão, Lourival Coelho, “Estudo Numérico-Experimental Da Solidificação Em Torno De Um Cilindro Horizontal Reto”, Campinas: Faculdade De Engenharia Mecânica, Universidade Estadual De Campinas, 2009.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigada a solidificação em torno de um tubo horizontal radialmente aletado e submerso num PCM na sua fase líquida. O tubo foi mantido a baixa temperatura (abaixo da temperatura de mudança de fase), pela circulação de um fluido secundário. Além disto, foi investigado o aumento de troca de calor pela introdução de um promotor de turbulência dentro do tubo.

EXPERIMENTAL STUDY ON SOLIDIFICATION AROUND A FINNED TUBE WITH AND WITHOUT RADIALES PROMOTER OF TURBULENCE

Raquel da Cunha Ribeiro da Silva¹

Kamal Abud Radi Ismail²

^{1,2}Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Caixa Postal 6122 13083-970 Campinas SP Brasil .

Abstract: *The heat storage in the form of latent heat represents an alternative of great potential in intermittent systems and conservation. One of the geometries less explored in literature and in the field of application is the cylindrical geometry with radial fins fixed along the tube. The fins in this case represent devices to increase the rate of heat transfer and thus the solidification of the PCM. In order to further increase the rate of solidification of PCM, the insertion of a promoter of turbulence along the tube, causing further unrest and turmoil, which in turn increases the coefficient of heat exchange and thus the rate of solidification of PCM . So this study aims to investigate the influences of geometric and operational parameters on the interface speed, time to complete solidification and the total mass solidified and therefore the total energy stored. In the experimental investigation were tested with several tubes fins varying diameters from 40 to 180 mm, number of secondary fluid flow rates and various operating temperatures with and without turbulence promoter and with or without flaps with the main objective to quantify the effect of fins and promoter of turbulence on the solidification rate or interface speed, time to complete solidification and the mass solidified total*

Keywords: *Finned tube, fin radial, PCM, container of cold, heat, latent promoter of turbulence, solidification of liquid*