

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA SOLIDIFICAÇÃO DA ÁGUA AO REDOR DE UM TUBO HORIZONTAL

Edna S. Benta – edna@fem.unicamp.br

Antônio B. de Jesus – antonio@fem.unicamp.br

Luis Felipe M. de Moura - felipe@fem.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos Cx. P. 6122 - Campinas, SP, Brasil

***Resumo.** A solidificação de material de mudança de fase (MMF) ao redor de um tubo horizontal de cobre resfriado por um fluido secundário foi estudada experimental e numericamente. O material de mudança de fase utilizado foi a água e o fluido secundário, etanol. O aparato experimental consiste basicamente em um tanque de acrílico cheio de água com o tubo cruzando horizontalmente no ponto médio do tanque. O tubo foi conectado a um sistema de refrigeração, que bombeava, no interior deste, o etanol resfriado. A espessura da camada de gelo formada ao redor do tubo foi determinada ópticamente usando uma câmara de vídeo digital. Termopares foram posicionados em alguns pontos de interesse. Foram investigados os efeitos de diferentes temperaturas de entrada do fluido secundário, temperaturas iniciais do MMF e número de Reynolds sobre a espessura da camada de gelo formada. Com fins comparativos, os resultados experimentais foram comparados com um modelo numérico de condução pura baseado na técnica de imobilização de fronteira. Foi observado que para valores de temperatura inicial do MMF abaixo de 4 °C o modelo numérico apresentou bons resultados, mesmo não considerando efeitos convectivos.*

Palavras de chave: Solidificação em geometria cilíndrica, Formação de Gelo, Armazenador de calor latente, Material de mudança de fase, Transferência de calor por condução.

1. INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos vem sendo realizadas muitas pesquisas sobre a importância e aplicações práticas de sistemas de armazenamento de calor latente devido à necessidade de obter e armazenar grandes quantidades de energia.

Uma aplicação importante destes sistemas consiste no uso de sistemas de armazenamento de gelo para ar condicionado, devido à crescente necessidade de redução do uso de energia durante os picos.

De acordo com Jekel et al (1993), muitas companhias oferecem, freqüentemente, taxas variáveis que encorajam o uso da energia durante os períodos fora de pico. Neste caso, sistemas de armazenamento de gelo podem levar vantagem neste sentido.

Saborio et al (1994) realizaram um trabalho experimental a fim de analisar os efeitos de solidificação e fusão em sistemas de armazenamento de calor latente. Eles concluíram que o aumento da transferência de calor dentro da unidade contribuiu para melhorar o desempenho do sistema.

Os problemas que envolvem mudança de fase, chamados de problemas de Stefan, apresentam uma não linearidade inerente, devido à existência de uma interface móvel, cuja posição não é conhecida e é dependente do tempo. Por conseguinte, há poucas soluções analíticas, sendo necessário desenvolver-se técnicas numéricas para a resolução de tais problemas.

De acordo com Hall e Viskanta (1980), alguns métodos de solução são utilizados na análise da condução de calor envolvendo problemas de Stefan, como método exato, integral, variacional, perturbação, puramente numérico e outros.

Miranda (1982) investigou a transferência de calor em um problema de mudança de fase. Dois métodos diferentes de investigação do problema de solidificação ao redor de um tubo cilíndrico foram analisados, sendo que os resultados teóricos foram validados através de uma análise experimental, utilizando parafina como material de mudança de fase.

Cao e Faghri (1991) simularam numericamente o comportamento de um armazenador de calor latente. Eles resolveram, simultaneamente, a mudança de fase bidimensional para o MMF e para a convecção forçada na região de entrada para o fluido de transferência de calor, a baixos números de Prandtl. O modelamento matemático foi feito para a parede do tubo, para o MMF e fluido secundário, através das equações da continuidade, quantidade de movimento e energia. Os autores usaram a aproximação por volume de controle descrita por Patankar (1980) e resolveram os campos de velocidade e pressão.

Jekel et al (1993) desenvolveram um modelo de um tanque para armazenamento de gelo para ambos os períodos de carregamento e descarregamento, utilizando água como material de mudança de fase.

M Neto e Krarti (1997), que validaram experimentalmente um modelo numérico para um sistema de armazenamento térmico, realizaram um trabalho semelhante ao de Jekel et al (1993). Eles estudaram o ciclo de carregamento e descarregamento para validar um modelo numérico, desenvolvido para analisar sistemas de armazenamento de gelo sobre serpentinas.

Jesus (1998) desenvolveu uma solução numérica para estudar o processo de solidificação da água na região anular ao redor de um tubo vertical resfriado. O tubo era resfriado por um fluido que consistia em uma solução de etileno-glicol e água. A técnica numérica empregada para resolver o problema foi a de imobilização de fronteira, que consiste em uma transformação de coordenadas. Neste caso, o sistema novo, antes com fronteira irregular e móvel, agora apresenta fronteira e paralela às demais e fixa.

O objetivo deste trabalho é investigar experimentalmente e comparar com dados numéricos, a solidificação de água ao redor de um tubo resfriado. Além disso, analisar a influência de diferentes temperaturas de entrada do fluido secundário, diferentes temperaturas iniciais do MMF e diferentes números de Reynolds sobre a espessura da camada de gelo formada.

2. ANÁLISE EXPERIMENTAL

2.1. Aparato experimental

Um esquema do aparato experimental é apresentado na Figura 1. A seção de testes, onde foi acondicionado o material de mudança de fase (água), consistiu em um tanque de $0,125 \text{ m}^3$ construído em acrílico transparente. O tanque foi totalmente isolado com isopor de 2 cm de espessura e todo o sistema de tubulação isolado com polietileno. O tubo de cobre, de 10,6 mm de diâmetro interno, foi colocado no ponto médio do tanque. As setas na figura indicam a direção do fluxo da corrente fluida. Um pequeno orifício foi feito na parte frontal do isolamento a fim de permitir a visualização e as fotografias da interface sólido-líquido. Um pedaço de isopor foi encaixado neste orifício. À medida que as imagens da camada de gelo

eram capturadas, o pedaço de isolamento era removido o mais rapidamente possível, a fim de prevenir ou minimizar perdas de calor .

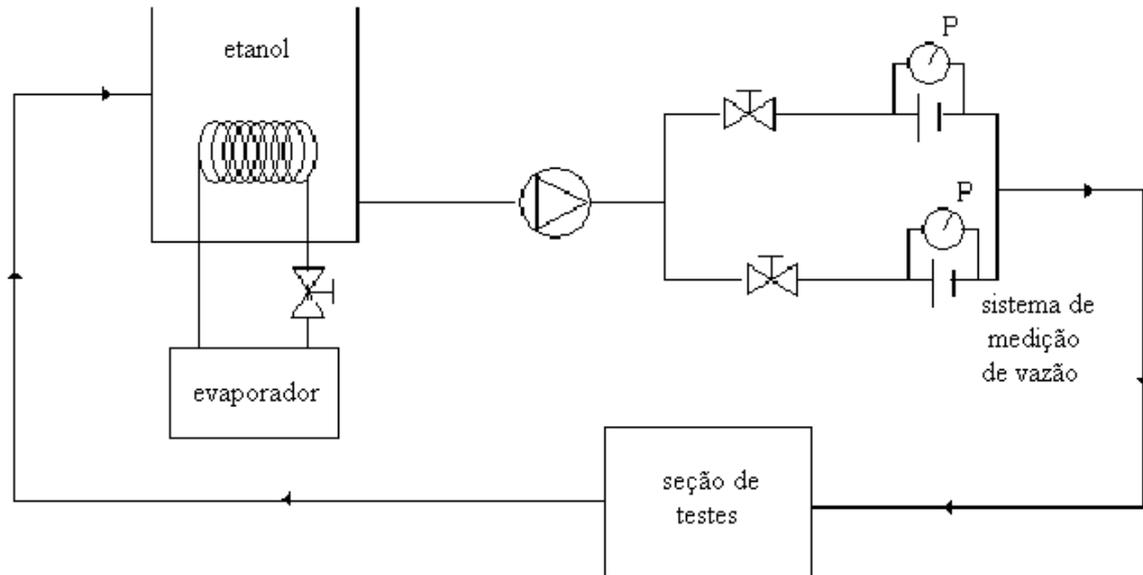


Figura 1. Esquema do aparato experimental.

A vazão volumétrica do fluido secundário foi obtida através de placas de orifício conectadas em transdutores de pressão previamente calibrados e conectados a um sistema aquisitor de dados.

Um total de cinco termopares do tipo T foram utilizados com o objetivo de fazer as medidas de temperaturas de entrada e saída do fluido secundário, entrada e saída na parede do tubo e temperatura inicial do material de mudança de fase.

2.2. Procedimento experimental

As experiências de solidificação foram regidas pelo ciclo descrito a seguir: o fluido secundário resfriado é bombeado do sistema de refrigeração (composto por um compressor de R-22 e um trocador de calor de casco e tubo) para o sistema de tubulação cilíndrico. Ao atravessar a seção de testes o fluido secundário retira calor da água que envolve o tubo. Retornando ao sistema de refrigeração, a corrente fluida tem sua temperatura abaixada novamente e volta à seção de testes. À medida que o processo avança, gelo vai-se formando ao redor do tubo e a espessura da camada de gelo vai aumentando. Como era esperado, a espessura aumenta rapidamente no início do processo, tendo a velocidade de crescimento diminuída com o passar do tempo.

As medidas da espessura da camada solidificada, no lado superior e inferior do tubo, foram feitas usando um método óptico, i.e., empregando uma câmara de vídeo digital com *zoom* de 320x. Uma escala foi acoplada no ponto médio do tubo, no sentido axial, e fotografias (imagens) da camada de gelo eram capturadas em intervalos constantes de tempo. No início, em intervalos menores e posteriormente, devido à própria cinética do processo, tais intervalos eram gradualmente espaçados. Ao final da solidificação, as imagens eram digitalizadas a fim de obter as medidas reais.

Quanto ao MMF, foram realizadas algumas experiências à temperatura de mudança de fase e com temperaturas acima deste valor. Além disso, também foram medidas as camadas de gelo formadas na parte inferior do tubo, para analisar a simetria da camada nos dois pontos.

Algumas propriedades termofísicas da água são listadas na Tabela 1:

Tabela 1. Propriedades de água a 0 °C

Propriedade	líquido	Sólido
k, condutividade térmica (W/m° C)	2,25	0,56
cp, calor específico (kJ/kg °C)	2,04	4,22
L, calor latente (kJ/kg)	334	
r, densidade (kg/m ³)	917	999

No trabalho presente, foi estudada a influência de três variáveis sobre a espessura da camada de gelo: (a) a temperatura de entrada do fluido secundário (T_i); (b) a temperatura inicial do MMF e (c) o número de Reynolds (Re). Os efeitos destas variáveis foram investigados variando a temperatura de entrada do fluido secundário de -5 a -15 °C, a temperatura do MMF de 0 a 7 °C e o número de Reynolds de 899 a 2067.

3. ANÁLISE NUMÉRICA

O algoritmo computacional usado para comparar os resultados experimentais é baseado na técnica de imobilização de fronteira desenvolvida por Jesus (1998). Nesta técnica, a fronteira móvel é fixada por meio de transformação de coordenadas. As equações do modelo matemático foram discretizadas através de metodologia de volume finito e além disso a condução de calor no MMF é acoplada com a condução na parede interna do tubo e com a convecção no fluido secundário. Para obter maiores detalhes, ver também Ismail e Jesus (1999). Nesta análise numérica são adotadas as seguintes hipóteses:

- MMF na fase líquida e a temperatura de mudança de fase
- geometria bidimensional e axisimétrica
- fluxo hidrodinamicamente desenvolvido na entrada
- propriedades termofísicas da fase líquida e sólida constantes
- mecanismo de transferência de calor apenas por condução no material de mudança de fase.

O esquema do modelo físico do problema é apresentado na Figura 2, onde $s(t)$ é a posição da interface.

Todos os resultados foram apresentados graficamente como quantidades adimensionais:

r_w , - raio interno e externo do tubo
 r_e - raio interno e externo do tubo
 Fo - número de Fourier, $\alpha t/r_i^2$
 α - difusividade térmica, $k / \rho c_p$
 t - tempo de solidificação
 ρ - densidade

Fo Ste – tempo adimensional
 c_p - calor específico
 Ste - número de Stefan, $(T_i - T_m) c_p / L$
 T_i - temperatura de entrada do etanol
 T_m - temperatura inicial do MMF
 L - calor latente de fusão da água

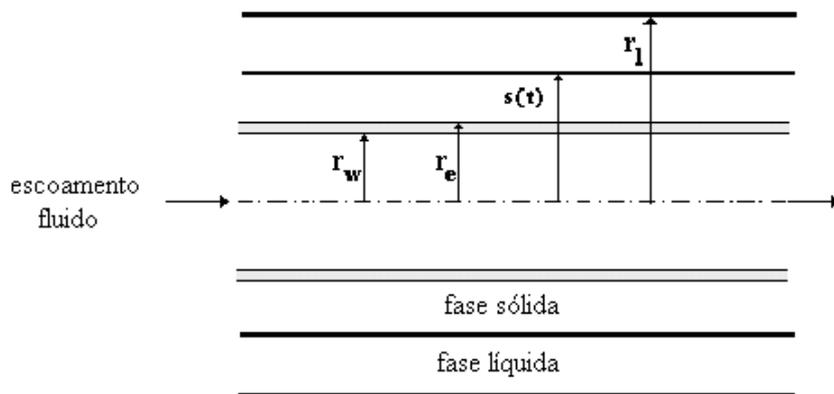


Figura 2. Modelo físico do problema da solidificação.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Efeito da temperatura de entrada do fluido secundário

A Figura 3 apresenta os resultados experimentais para diferentes temperaturas de entrada do fluido secundário.

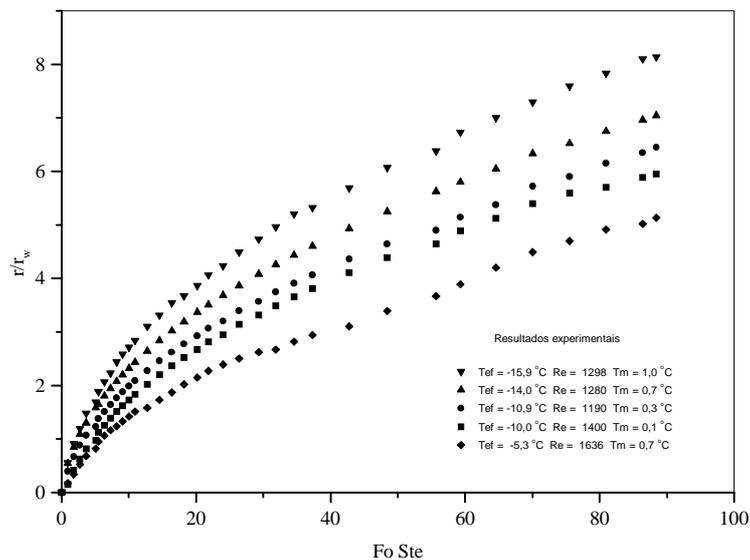


Figura 3. Efeito da temperatura de entrada do fluido secundário sobre a espessura da camada de gelo.

Nota-se que reduzindo a temperatura de entrada do fluido fortemente são reduzidas as espessuras da camada de gelo no tempo considerado. Além disso, uma pequena diminuição de 0,9 °C, por exemplo, (veja legenda) produz um aumento razoável sobre a camada de gelo.

Efeito da temperatura inicial do MMF

A Figura 4 mostra a espessura da camada de gelo para diferentes temperaturas do material de mudança de fase.

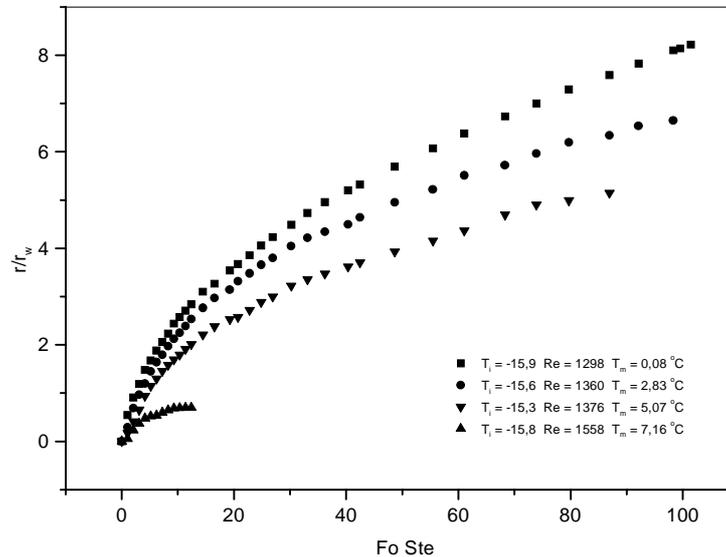


Figura 4. Efeito da temperatura do MMF sobre a espessura da camada de gelo.

Neste caso, pode-se observar que o efeito da temperatura do MMF também exerce evidente influência sobre a espessura da camada de gelo formada. Além disso, também pode-se observar que com o aumento da temperatura inicial do MMF, as espessuras da camada de gelo tornam-se menores. Pode-se justificar o comportamento supracitado pelas diferenças entre as temperaturas da camada de gelo e do líquido, que geram correntes convectivas. Além disso, é conhecido o fato de que a convecção natural representa um papel importante no processo de solidificação (e não apenas na fusão), provocando um retardamento no processo.

Efeito do número de Reynolds

A Figura 5 mostra a espessura da camada de gelo para diferentes números de Reynolds. Pode ser observado que um aumento em Reynolds conduz a um aumento nas espessuras de gelo. Porém entre, 1300 e 1500, não houve variação na espessura de gelo, e neste caso, em regime laminar, o efeito de número de Reynolds pode ser negligenciado. Consequentemente, para analisar o efeito do número de Reynolds deveria ser necessário providenciar grandes diferenças entre Reynolds, ou até mesmo realizar as experiências em regime turbulento.

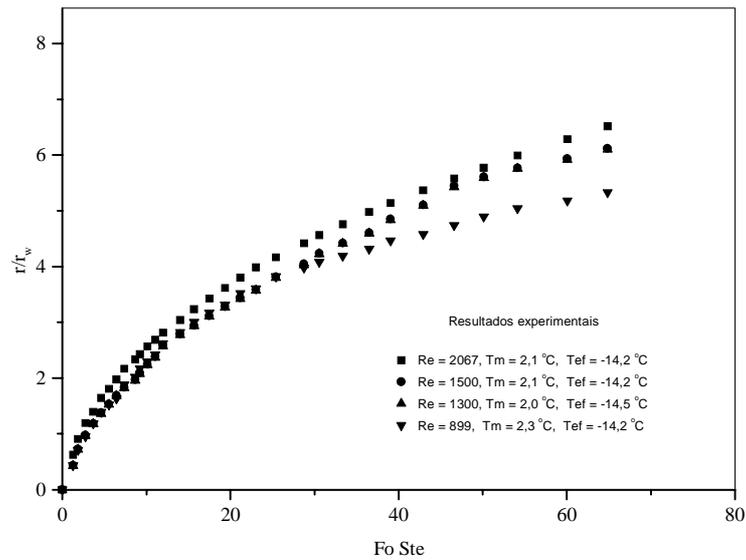


Figura 5. Efeito do número de Reynolds sobre a espessura da camada de gelo.

Uma comparação entre resultados experimentais e numéricos é mostrado na Figura 6.

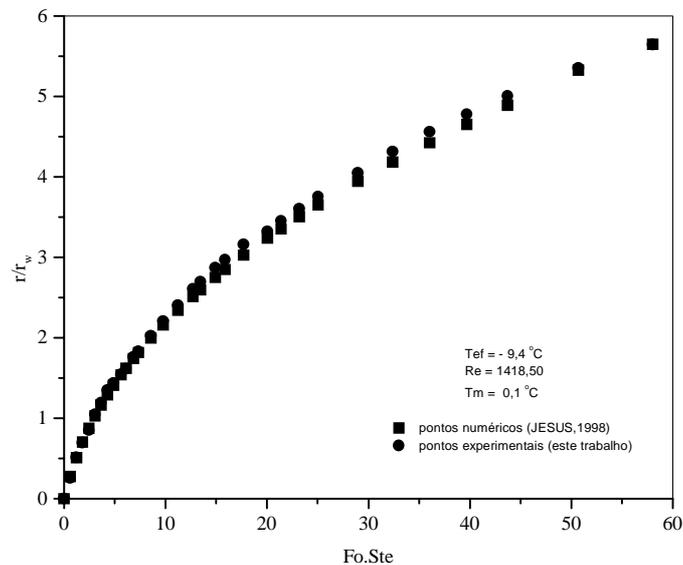


Figura 6. Comparação entre resultados numéricos e experimentais das espessura da camada de gelo com MMF à temperatura de mudança de fase.

Nota-se que esta experiência foi realizada com MMF próximo à temperatura de mudança de fase. Os resultados experimentais obtidos apresentaram concordância razoável com numérico. É importante salientar que uma das hipóteses do modelo numérico era de que o MMF estava à temperatura de mudança de fase. Além disso, nenhum efeito de convectivo foi considerado.

Os resultados da camada solidificada na parte superior e inferior do tubo estão mostrados na Figura 7. Como pode-se notar, os resultados numéricos apresentaram valores maiores que as medidas experimentais na parte superior. Além disso, as medidas de espessura de gelo neste ponto apresentaram valores mais altos que na parte inferior do tubo, isto é, a camada de gelo superior alongou-se tornando-se mais espessa que a inferior. Consequentemente, isto prova que na ausência de um fluido superaquecido, o mecanismo de transferência de calor pode ser predito através de condução pura.

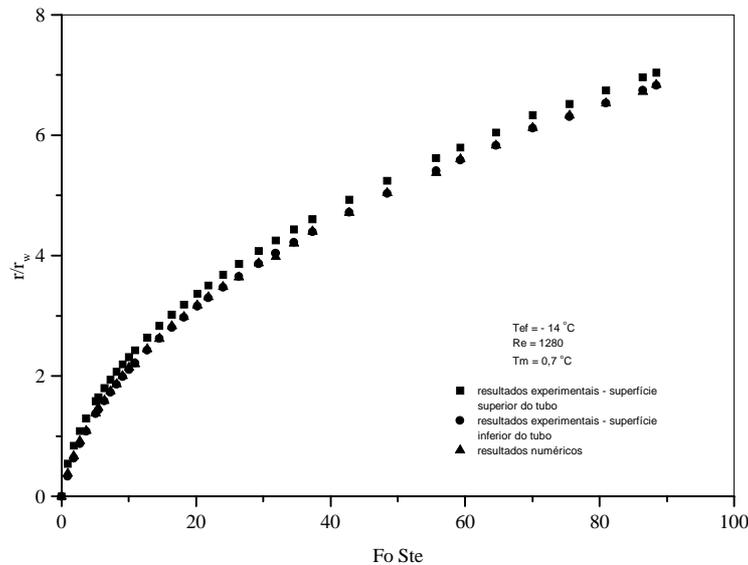


Figura 7. Comparação entre as medidas na parte superior e inferior do tubo - resultados numéricos e experimentais obtidos para a camada de gelo.

5. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais apresentados demonstraram forte influência da temperatura de entrada do fluido secundário sobre a camada de gelo. Além disso, a temperatura do MMF também influenciou a formação da camada de gelo devido ao efeito da convecção natural quando em presença do líquido superaquecido. Consequentemente, estes efeitos impedem ou retardam o processo de solidificação tornando-se indesejáveis.

Por outro lado, como é de se esperar, o número de Reynolds não teve praticamente nenhuma influência significativa, e entre 1300 e 1500 (no escoamento laminar), a espessura solidificada permanece praticamente a mesma. As medidas da espessura de gelo na parte superior do tubo apresentaram valores mais altos que na inferior.

6. REFERÊNCIAS

Cao, Y. & Faghri, A, 1991, Performance characteristics of a thermal energy storage module: a Transient PCM/forced convection conjugate analysis, International Journal of Heat and Mass Transfer, v.34.

Carslaw, H & Jaeger, J., 1959, Conduction of Heat in Solids, Clarendon Press, Oxford.

- Hall, N. W. & Viskanta, R., 1980, Solid liquid phase change heat transfer and interface motion in materials cooled or heated from above or below, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.23, pp. 283-292.
- Ismail, K.A.R. & Jesus, A B.,1999, Modeling and solution of the solidification problem of PCM around a cold cylinder, *Numerical Heat Transfer – Part A*, vol.36, n.1, pp. 95-114
- Jekel, T.B.; Mitchell, J.W.; Klein, S.A, 1993, Modeling of ice-storage tanks, *ASHRAE Transactions: Symposia*, v. 99, part 01, pp.1016-1048.
- Jesus, A B., 1998, Numeric study in annular geometry solidification, M Sc. Thesis, Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas - UNICAMP, Campinas. (In Portuguese).
- London, A. L. & Seban, R.A., 1943, Rate of ice formation, *Transactions of the ASME*, vol. 65, pp. 771-778.
- Lunardini, V.J., 1991, *Heat Transfer with Freezing and Thawing*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- M. Neto, J.H.& Krarti, M., 1997, Experimental validation of a numerical model for an internal melt ice-on-coil thermal storage, *ASHRAE Transactions: Research*, v.103, n.1.
- Miranda, R.F. Theoretical and experimental study of outward cylindrical freezing and melting in thermal storage, M Sc. Thesis, Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas - UNICAMP, Campinas. (In Portuguese)
- Ozisik, M. M., 1980, *Heat Conduction*, John Wiley & Sons, New York.
- Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Co.
- Perekis, C.L.& Slichter, L.B., 1939, Problem of the ice formation, *Journal of Physics Applied*, vol. 10, pp. 135-137.
- Saborio, S. A., 1994, Nakamura, H. e Reistad, G. M., The effect of freezing and melting on the efficiency of latent heat storage systems, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.27, n.6.
- Viskanta, 1980, Natural convection in melting and solidification, in *Natural Convection – Fundamentals and Applications*, Advanced Study Institute Book, Edited by Kakaç, S. & Viskanta, R., Hemisphere Publishing Co.
- Yeoh, G.H., Behnia, M., de Vahl Davis, G. & Leonardi, E., 1990, A numerical study of three-dimensional natural convection during freezing of water, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v.30, pp. 899-914.