

FORMAÇÃO DE GEADA SOBRE SUPERFÍCIES

Jorge Alex Gatica Sánchez

Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad del Bío-Bío
Casilla 5-C – Concepción, Chile
jgatica@ubiobio.cl

Nisio de Carvalho Lobo Brum

Programa de Engenharia Mecânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cx. P. 68503 - 21945-970 – Rio de Janeiro, RJ. Brasil
nisio@serv.com.ufrj.br

Resumo. *Uma condição operacional comum em evaporadores com expansão direta do refrigerante primário, é a formação e depósito de geada na sua superfície externa, em contato com o ar. Esta camada de geada reduz a transferência de calor e aumenta a perda de carga no lado do ar, reduzindo a capacidade de refrigeração e aumentando os custos operacionais.*

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador computacional para a análise de formação e crescimento de geada sobre placas mantidas a baixas temperaturas e submetidas a convecção forçada por uma corrente de ar, uma situação física que auxilia na compreensão da fenomenologia existente na condição prática descrita acima.

O modelo dinâmico sobre o qual o simulador foi desenvolvido é capaz de reproduzir, resultados experimentais obtidos a partir de várias condições psicrométricas.

Os resultados obtidos mostram uma certa dependência nas condições iniciais de formação da geada. Analisa-se também a influência de parâmetros tais como o número de Reynolds, temperatura da placa, e condições psicrométricas do ar incidente sobre o crescimento e densificação da geada.

O programa permite gerar informações relativas a várias propriedades da geada tais como: densidade, condutividade térmica, porosidade, fração volumétrica de gelo, distribuição de temperaturas e as evoluções temporais destas grandezas.

Palavras chave: formação de geada, evaporadores, problemas conjugados.

1. Introdução

É de grande interesse o processo transiente de formação de geada devido ao fato da troca de calor e massa acontecerem em condições de fronteiras móveis.

A formação dos cristais da geada ocorre em regiões preferentes de nucleação e condensação da umidade na superfície. A progressão dos locais de nucleação acelera com o passar do tempo e a formação da geada assume um aspecto quase uniforme sobre a superfície. O congelamento da água depositada por condensação sobre a superfície gera cristais tais como agulhas produzindo uma superfície áspera. A ramificação destes cristais forma estruturas arbóreas que são responsáveis pelo aumento da espessura da geada.

A formação de geada na superfície externa de evaporadores em contato com o ar, no interior de câmaras frigoríficas, é indesejável, entre outras razões, por provocar períodos de suspensão da refrigeração para a remoção da camada de geada excessivamente espessa sobre as aletas de evaporadores, comprometendo significativamente o desempenho de tais equipamentos ou similares.

No desenvolvimento deste trabalho foram revisados os trabalhos analítico-experimentais de O'Neal e Tree (1984), os quais caracterizam os efeitos dos parâmetros: número de Reynolds, umidade e temperatura do ar, temperatura da placa, etc. na formação e crescimento da geada sobre uma placa. Resultados experimentais destes autores assim como de Sahin (1994) foram contemplados na validação deste trabalho. Importante aporte de Tao et al (1993), no relativo à estimação do coeficiente de difusão efetivo foi também considerado. Em 1997, Legall et al, apresentaram uma nova proposta para estimar o coeficiente de difusão efetivo, seguindo a linha de Auracher (1972). Lee et al (1997), desenvolvem um modelo analítico para a formulação de uma camada de geada sobre uma superfície plana fria. Assumem que a troca de calor sensível e latente acontece simultaneamente devido as diferenças de temperatura e umidade entre o ar e a superfície da camada de geada, quando o ar entra em contato com a superfície e que o vapor de água difunde-se somente na direção normal à placa resfriada.

Também Mao et al (1999) apresentam uma investigação experimental de crescimento de geada sobre uma superfície plana, fria submetida a um sub-congelamento turbulento, de fluxo paralelo de ar úmido. As condições de operação são típicas de muitos freezers comerciais. Eles construíram um circuito de teste que permitiu medir altura de geada, concentração de massa e fluxo de calor à superfície fria.

Trabalhos mais recentes, de Yun et al (2002) modelam fisicamente o crescimento da geada e suas propriedades e o de Chen et al (2003), desenvolvem um modelo para a predição do crescimento da geada e mostram uma importante deterioração no rendimento de um conjunto ventilador-serpentina aletada com o aumento da espessura da geada.

2. Formação da geada

Quando uma placa em condições de temperaturas subzero é exposta a um fluxo de ar úmido, podem ser considerados tipicamente três períodos distintos no processo de formação e crescimento de uma camada de geada sobre sua superfície.

- período de crescimento do cristal
- período de crescimento da camada de geada
- período de crescimento intenso da camada de geada

2.1. Período do crescimento do cristal

É o primeiro período e geralmente o mais breve. Se caracteriza pela condensação e posterior congelamento de pequenas gotas de água. Em seguida, cristais de geada são gerados sobre este núcleo de gelo, e cresce em direção vertical a uma taxa aproximadamente constante. Devido a reduzida escala de tempo necessária para a formação desta primeira camada assumiu-se como condição inicial uma reduzida espessura de geada fruto deste primeiro período.

2.2. Período do crescimento da camada de geada

Este período e o seguinte são os mais relevantes na evolução da camada de geada. Durante estes dois períodos, a camada de geada é caracterizada por um aspecto mais uniforme devido as ramificações e interconexões dos cristais de gelo. A camada de geada torna-se um material poroso homogêneo feito de uma matriz de gelo sólido e poros preenchidos de ar úmido. A transferência de massa na camada de geada leva ao crescimento e densificação do depósito poroso.

Um trabalho recente de Tudor et al (2003) mostra resultados interessantes sobre o controle do crescimento e da massa da geada, usando campos elétricos. O efeito do campo elétrico consiste em alterar a forma dos cristais, e por consequência sua taxa de crescimento.

2.3. Período de crescimento intenso da geada

Este surge quando a temperatura superficial chega a ser igual a temperatura do ponto triplo da água devido ao incremento da resistência térmica da geada. Vapor de água condensando no topo da camada de geada forma um filme líquido que satura a camada de geada, e congela-se nas áreas mais próximas da parede fria. Então, um processo cíclico de fusão, congelamento e crescimento irá promovendo de forma acelerada o crescimento da camada de geada.

3. Modelo físico - matemático

Considera-se um modelo unidimensional transiente, baseado nas equações de conservação de massa, energia e espécies aplicadas à geada, mistura ar-vapor e a interface ar-geada.

O sistema a ser analisado, Fig. 1, consiste de uma placa plana horizontal, sobre a qual escoou uma mistura de vapor de água e ar úmido. A placa é isotérmica, com temperatura subzero e sempre inferior a temperatura do ar úmido.

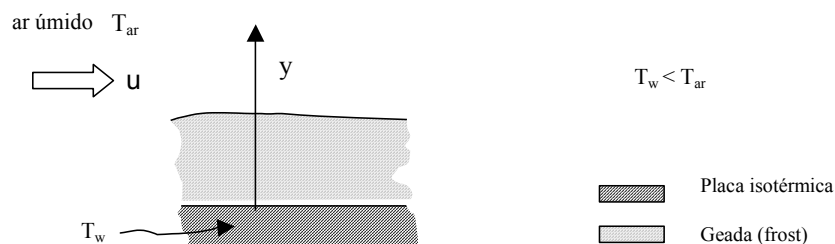


Figura 1. Esquema do sistema em análise.

Nestas condições o vapor d'água em mistura com o ar poderá depositar-se sobre a placa inicialmente na fase líquida (geada por condensação) ou diretamente na forma de cristais de gelo (geada por ablação).

A geada será tratada como um meio poroso. A rigor a fase sólida teria seu volume variável no tempo, devido a solidificação do vapor difundido nos poros, formados pelos espaços deixados pela estrutura arbórea da geada.

Na formulação que apresentaremos abaixo, o volume será considerado quase-estacionário e desta feita o processo de média volumétrica necessário a formulação das equações de conservação para meios porosos será simplificado.

3.1. Formulação do Modelo

A camada de geada é um meio poroso considerado como pseudo-homogêneo, onde a transferência de calor e massa são descritas, respectivamente, pelas leis de Fourier e Fick. Estes dois fenômenos de transporte são acoplados.

Para a modelagem físico-matemática, introduzimos as hipóteses e condições seguintes.

- fluidos incompressíveis
- o ar úmido é forçado sobre a superfície de geada
- propriedades variáveis do ar úmido na camada porosa
- efeitos gravitacionais desprezíveis
- pressão total da fase gasosa constante
- o ar úmido no interior da camada porosa é saturado
- o ar úmido é considerado como uma mistura de gases ideais
- a superfície plana refrigerada é impermeável

Então, a técnica do volume local médio é usada num volume de controle elementar V onde coexistem o volume de gelo V_I e o volume de ar úmido V_g . Assim, as frações volumétricas de ar úmido e gelo (ε_g , ε), seriam;

$$\varepsilon_g = V_g/V \quad \text{e} \quad \varepsilon = V_I/V \quad (1)$$

com

$$\varepsilon + \varepsilon_g = 1 \quad \text{e compatibilidade volumétrica} \quad \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) = - \left(\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} \right) \quad (2)$$

3.1.1. Equações da conservação de energia e massa

Equação da energia

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) - \rho_l I_{ig} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \text{div } k_{\text{eff}} \nabla T \quad (3)$$

onde ρ é a densidade e C_p o calor específico da geada, ρ_l é a densidade do gelo, I_{ig} o calor latente de ablição ou sublimação do vapor de água, k_{eff} é a condutividade térmica efetiva da geada em função da fração volumétrica do gelo e da condutividade térmica do ar e do gelo.

Equação de difusão da fase gás-vapor :

$$\frac{\partial}{\partial t} (1 - \varepsilon) \rho_v + \rho_l \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \text{div} [(1 - \varepsilon) D_{AB} \nabla \rho_v] \quad (4)$$

onde ρ_v representa a densidade do vapor de água, variável avaliada através da equação de estado dos gases e $D_{\text{eff}} = (1 - \varepsilon) D_{AB}$ corresponde ao coeficiente de difusão efetivo.

3.1.2. Equações para as condições de contorno

Fizemos a hipótese de que o vapor estaria saturado em todos os poros da geada. Desta forma, tratando o vapor como um gás ideal a sua densidade ρ_v é somente função da temperatura e a equação da conservação de massa apresentada acima é na verdade uma equação para a fração de gelo ε .

Devido a sua natureza matemática teríamos apenas de fornecer uma condição inicial, porém os dois extremos são analisados de forma distinta dos pontos interiores à geada devido a expressão da conservação do vapor ser alterada nestas localidades. Assim,

a) Junto à placa resfriada, impenetrável, teremos

$$D_{\text{eff}} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (5)$$

b) Na interface geada-ar úmido

$$D_{\text{eff}} \left. \frac{\partial \rho_v}{\partial y} \right|_{y=y_s} = h_m \left(\rho_{v\infty} - \rho_v \Big|_{y=y_s} \right) - \left(\rho \frac{\partial y}{\partial t} \right) \Big|_{y=y_s} \quad (6)$$

onde h_m coeficiente convectivo de troca de massa, $\rho_{v\infty}$ é a densidade do vapor de água no ar não perturbado, y, y_s são a posição vertical e a posição da superfície da geada no eixo vertical, respectivamente, ρ_v densidade do vapor de água sobre o gelo, e finalmente ρ representa a densidade da geada avaliada na superfície.

Para a equação da energia teremos as seguintes condições de contorno e inicial:

a) Junto à placa resfriada,

$$T = T_w \quad (7)$$

b) Na superfície em contato com a corrente de ar úmido

$$h_{cv} \left(T_{\text{ar}} - T \Big|_{y=y_s} \right) = k_{\text{eff}} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y_s} - I_{\text{ig}} \left(\rho \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) \Big|_{y=y_s} \quad (8)$$

h_{cv} coeficiente de troca de calor convectivo, T_{ar} temperatura do ar não-perturbado, e T_w a temperatura da placa.

O sistema de equações diferenciais parciais para ser resolvido necessita para seu fechamento, expressões para as propriedades termofísicas que serão apresentadas abaixo.

3.2. Condição inicial

Como estaremos evitando a fase de cristalização, partiremos de uma reduzida espessura de geada com uma temperatura uniforme igual à da placa fria.

4. Determinação das propriedades termofísicas

De correlações empíricas e/ou experimentais disponíveis na literatura. temos,

4.1. As propriedades térmicas do ar seco e do vapor d'água

A condutividade térmica do ar, referida por Le Gall et al (1997), com $180 \leq T \leq 600$ [K]

$$k_a = -3.381E-08 \cdot T^2 + 9.814E-05 \cdot T - 1.308E-04 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right] \quad (9)$$

O coeficiente de difusão efetiva, Tao et al (1993), tem a forma

$$D_{\text{eff}} = (1-\varepsilon) D_{AB} (1+F) \quad \text{e na superfície} \quad D_{\text{eff}} = (1-\varepsilon) D_{AB} (1+F_s) \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (10)$$

Para ambos os casos, segundo Le Gall et al (1997)

$$D_{AB} = 1.451E-04 \frac{T^{1.72}}{p_{\text{atm}}} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (11)$$

A umidade absoluta, é calculada com base na Lei de Dalton, por

$$w = 0.6218 \frac{p_{vs}}{p_{\text{atm}} - p_{vs}} \quad (12)$$

onde a pressão de saturação é estimada usando a seguinte correlação, ver ASHRAE (1997).

Entre -100°C e 0°C

$$\ln(p_{vs}) = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7\ln(T) \quad (13)$$

Entre 0°C e 200°C

$$\ln(p_{vs}) = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13}\ln(T) \quad (14)$$

onde:

$$\begin{aligned} C_1 &= -5.6743590\text{E}+03 & C_4 &= 6.2215701\text{E}-07 & C_7 &= 4.1635019\text{E}+00 & C_{10} &= -4.8640239\text{E}-02 \\ C_2 &= 6.3925240\text{E}+00 & C_5 &= 2.0747825\text{E}-09 & C_8 &= -5.8002206\text{E}+03 & C_{11} &= 4.1764768\text{E}-05 \\ C_3 &= -9.6778430\text{E}-03 & C_6 &= -9.4840240\text{E}-13 & C_9 &= 1.3914993\text{E}+00 & C_{12} &= -1.4452093\text{E}-08 \\ & & & & & & C_{13} &= 6.5459673\text{E}+00 \end{aligned} \quad (15)$$

O coeficiente convectivo de transferência de calor é estimado usando expressões devidas a O'Neal e Tree (1985)

$$\text{Nu} = 0.038 \cdot \text{Re}^{0.75} \cdot \text{Pr}^{0.33} \quad (16)$$

$$h_{cv} = k_a \cdot \text{Nu} / Dh \quad (17)$$

O coeficiente convectivo de transferência de massa é obtido através da relação de Lewis para a mistura ar-água.

$$h_m = h_{cv} / (\rho_{a\infty} \cdot C_{p_a}) \quad (18)$$

4.2. As propriedades térmicas do gelo e da geada

A condutividade térmica do gelo, Dietenberger (1983), válida para $100 \leq T \leq 273$ [K]

$$k_l = 630/T \text{ [W/mK]} \quad (19)$$

O calor específico do gelo, Le Gall et al (1997)

$$C_{p_l} = 2109 + 3.66(T - 273.15) \text{ [J/kg}^{\circ}\text{C]} \quad (20)$$

A densidade do gelo, Ismail e Salinas (1999)

$$\rho_l = 1 / (0.0010907 + 1.4635\text{E} - 07T) \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (21)$$

O calor latente de sublimação

$$I_{ig} = (-0.04667(1.8(T-273.15)+32)+1220.1) \cdot 2322 \text{ [J/kg]} \quad (22)$$

A densidade da camada de geada, Le Gall et al (1997).

$$\rho = \varepsilon \cdot \rho_l + (\varepsilon_g)(\rho_a + \rho_v) \quad \text{ou bem} \quad \rho = \varepsilon \cdot \rho_l + (1 - \varepsilon)(\rho_a + \rho_v) \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (23)$$

O calor específico da geada

$$C_p = (\varepsilon_l \cdot \rho_l \cdot C_{p_l}(T) + (1 - \varepsilon_l)(\rho_a \cdot C_{p_a} + \rho_v \cdot C_{p_v})) / \rho \text{ [J/kg}^{\circ}\text{C]} \quad (24)$$

A condutividade térmica efetiva da geada é calculada, como

$$k_{\text{eff}} = \varepsilon \cdot k_l + (1 - \varepsilon)k_a \quad [\text{W/mK}] \quad (25)$$

A porosidade da geada é calculada segundo Luer e Beer (2000)

$$\sigma = \frac{\rho_l - \rho}{\rho_l - \rho_p} \quad \text{com} \quad \rho_p = \rho_v + \rho_a \quad (26)$$

5. Solução numérica

As equações diferenciais parciais descritas anteriormente, juntamente com as condições de contorno, e as equações constitutivas apresentadas no capítulo anterior formam um sistema não linear acoplado pela fração volumétrica de gelo, ε , a qual é determinada iterativamente pela equação da conservação da quantidade de vapor difundida na geada.

Esta última equação diferencial é de primeira ordem o que provoca uma sensível rigidez por ocasião da obtenção da solução numérica.

A discretização parte de equações diferenciais na sua forma conservativa e gera aproximações por diferenças finitas também com a mesma propriedade.

Foi utilizado um esquema implícito para as duas equações principais, sendo que o sistema de equações algébricas gerado pela discretização da equação da energia gerou uma matriz tridiagonal com uma aproximação de primeira ordem no tempo e segunda ordem no espaço (a exceção do contorno onde também uma aproximação de primeira ordem no espaço foi empregada). Para a fração volumétrica o sistema gerado é não-linear e para sua solução usamos a subrotina do pacote IMSL, DNEQNF.

As não-linearidades devido a dependência das propriedades na temperatura foram tratadas por um atraso no seu cálculo com posterior correção iterativa até que uma tolerância especificada fosse atendida.

Uma sub-relaxação foi empregada para garantir uma melhor estabilidade na obtenção da solução.

Este problema sofre expansão em seu domínio a cada passo no tempo devido ao crescimento da espessura da geada. Este aumento gerava uma redefinição da malha, a cada passo no tempo, obtendo-se os valores das propriedades nos novos nós por interpolação com os valores obtidos anteriormente.

A inicialização parte da arbitragem de uma espessura inicial de geada com uma dada fração volumétrica e temperatura, ambas uniformes.

6. Resultados e discussão

6.1. Fator de resistência a difusão

Se consideramos um poro, formado no interior da estrutura arbórea de gelo, próximo a superfície resfriada, veremos que com o tempo ficará deficiente de vapor d'água, pela sua transformação em gelo na superfície da estrutura mencionada acima. Desta forma o vapor d'água em maior concentração nas camadas superiores da geada e principalmente na superfície difunde-se para suprir o desequilíbrio provocado pela ablimação.

A difusividade molecular do vapor no ar, D_{AB} , é bem conhecida e a literatura apresenta diversos resultados. No caso presente esta propriedade não governa o processo difusivo uma vez que o gelo oferece uma resistência a difusão.

Uma discussão mais detalhada é feita em Gatica (2003) com relação ao fator de resistência a difusão resultando na adoção dos parâmetros, F para o interior da geada e F_s para a superfície da camada de geada, como proposto no trabalho de Tao et al (1993). Uma forte dependência no valor de ditos parâmetros, foi verificada no trabalho de Gatica, gerando diversas espessuras finais e provocando saltos na densidade, se bem fisicamente possíveis, não coerentes com as possibilidades do modelo físico matemático estudado.

Foi necessário então buscar valores de F_s que não produzam saltos na densidade, sendo que sua validade seria avaliada pelos resultados de evolução da espessura que produzissem.

6.2. Fração volumétrica de gelo na geada

Nos resultados apresentados previamente na literatura, pouca importância é dada sobre a influência da condição inicial para a fração volumétrica de gelo. É certo que a maioria por não descrever a fase de cristalização da geada são obrigados a prescrever um valor inicial para a fração volumétrica.

Por inspeção visual sabemos, através de experimentos de laboratório, que a fase de cristalização é muito curta, frações de segundo. Levando-se em conta tempos de simulação na faixa de horas, concluiu-se que a escala de tempo de formação desta primeira camada é muito reduzida em relação ao tempo de observação desejado neste trabalho.

Os dois gráficos da Fig. 2 foram obtidos para tempos de simulação de 2 hrs. Os resultados foram gerados no tempo final e para a evolução da espessura da geada. Examinando as figuras, temos que a espessura e temperatura finais se comportam inversamente ao sentido das mudanças na fração volumétrica inicial.

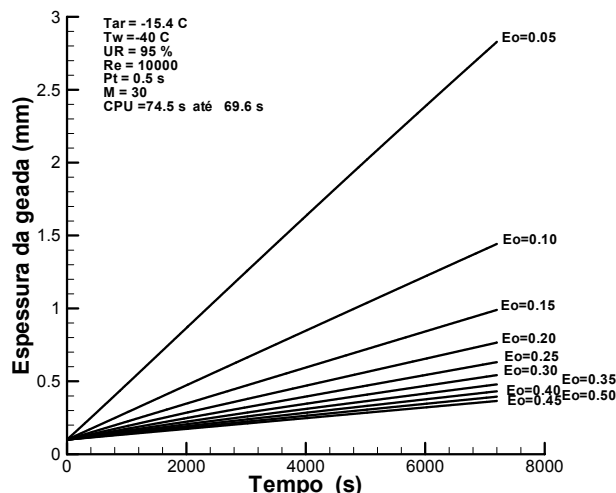
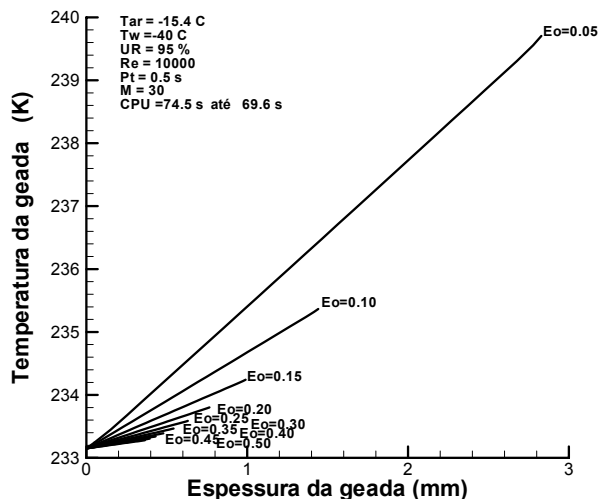


Figura 2: (a) Efeito de E_0 na temperatura da geada

(b) Efeito de E_0 na espessura da geada

6.3. Definição da malha

Buscou-se a otimização da malha no espaço e no tempo utilizada na simulação numérica. O parâmetro de interesse para este estudo foi a variação da espessura da camada de geada durante um tempo de simulação de 2 horas, com diversos tamanhos de malha. A insensibilidade na evolução da espessura aliada ao custo computacional variação do passo no tempo nos valores da espessura para uma dada malha fez com que fossem utilizados incrementos de tempo de 0.5 s e trinta subdivisões espaciais. Maiores detalhes em Gatica (2003).

6.4. Validação do programa de simulação

Com a finalidade de validar o programa de simulação reproduziu-se alguns resultados experimentais, disponíveis na literatura. Os resultados desta comparação são os seguintes:

Os gráficos abaixo, Figura 3, apresentam uma comparação entre os resultados obtidos através do programa de simulação desenvolvido, e os resultados experimentais de Sahin (1994).

As condições de operação são apresentadas na interior do gráfico. Pode-se verificar uma boa concordância entre os valores da simulação e os valores experimentais. O tempo considerado para ambas as comparações foi de 2 horas. Note-se maiores espessuras na camada de geada com a redução na temperatura da placa fria.

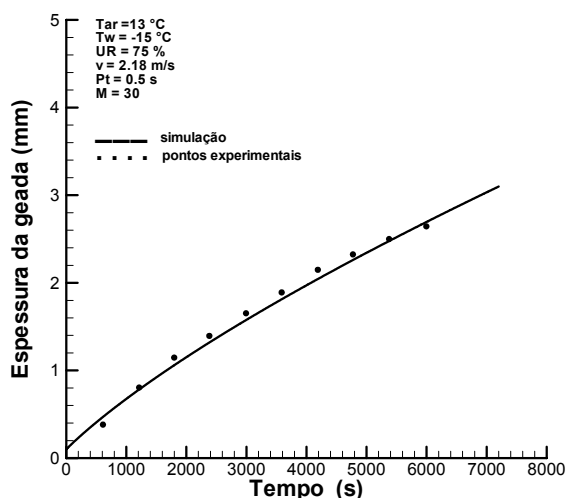
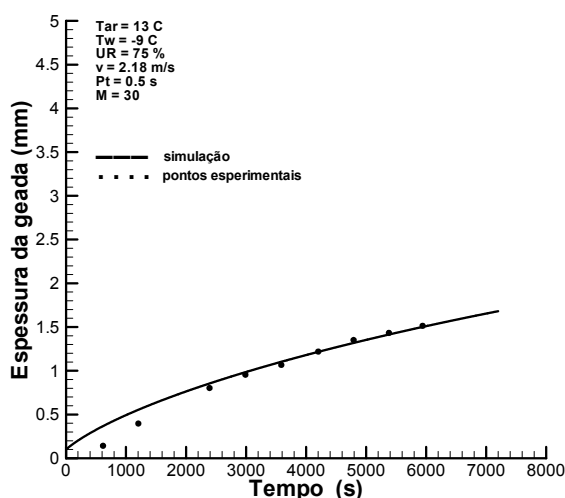


Figura 3: Ambos gráficos apresentam uma comparação com valores experimentais de Sahin (1994)

Nos gráficos da Figura 4, utilizou-se os dados experimentais obtidos por O'Neal e Tree (1984). O tempo de simulação é de 6 horas. No primeiro destes gráficos, pode-se observar uma boa concordância entre os valores da

simulação e os valores experimentais para as mesmas condições. A espessura alcançada foi bastante reduzida, mesmo para tempos altos. Possivelmente este comportamento seja devido ao número de Reynolds e/ou a umidade do ar.

Observa-se que o Reynolds considerado desta vez foi maior, ainda que a umidade tenha sido levemente menor. Tampouco podem ser desconsideradas as diferenças nas temperaturas da parede e do ar. Em conclusão, tanto o Reynolds assim como a baixa temperatura da placa parecem ter forte influência no crescimento da geada.

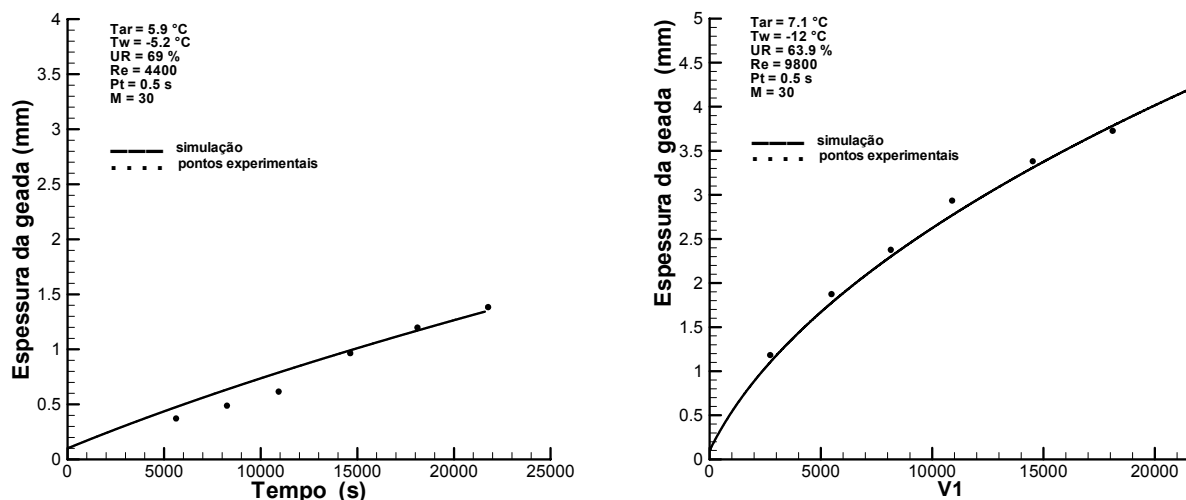


Figura 4: Comparação com resultados experimentais de O’Neal e Tree (1984)

6.5. Resultados

Nos gráficos apresentados a seguir alguns resultados do programa de simulação foram selecionados, as condições da simulação são indicadas nas próprias figuras.

Na Figura 5 (a), pode ser observada a variação da espessura da camada de geada para um tempo de simulação de 6 horas. Convém notar que na medida que o número de Reynolds aumenta, seus efeitos sobre a espessura vão tornando-se menos importantes. Isto, em parte corrobora com os comentários de O’Neal e Tree (1984).

Observando a Fig. 5 (b), verifica-se um comportamento fisicamente coerente; para maiores Reynolds teremos maior difusão de vapor d’água com consequente aumento na temperatura da superfície pela maior resistência térmica.

Posteriormente, na Fig. 6 (a), para as condições indicadas, observa-se que inicialmente a densidade na interface diminui para baixos Reynolds, invertendo a tendência para valores mais elevados (tempo de simulação 6 horas).

Na Figura 6 (b), a densidade da geada tem um decréscimo da ordem de 20 (kg/m³) perto da parede fria, estabilizando-se a seguir para finalmente ter comportamento variável perto da superfície da geada.

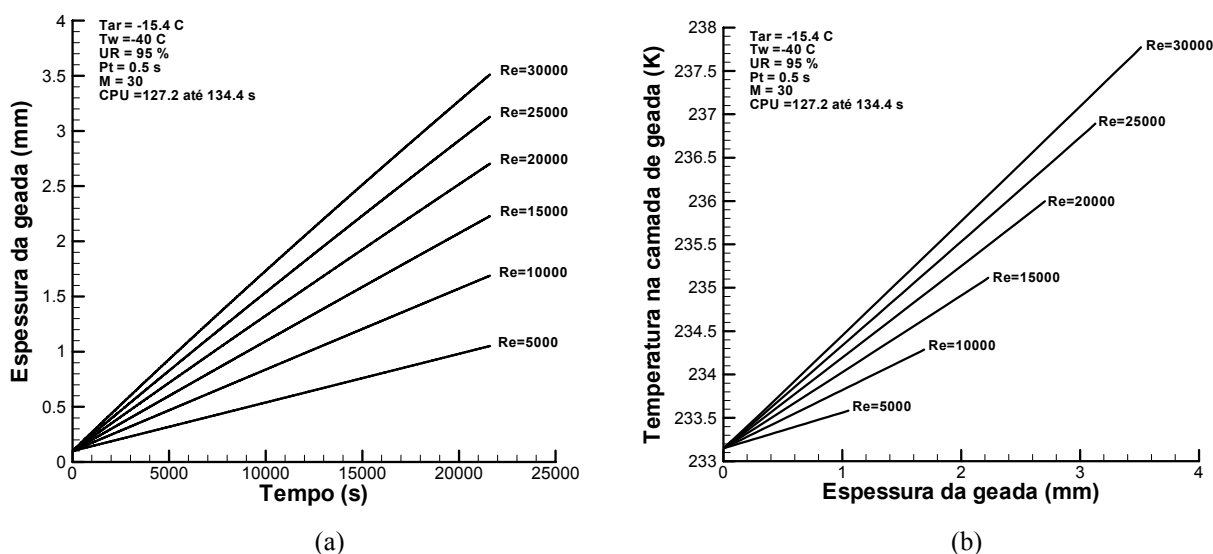


Figura 5: (a) Crescimento da camada de geada no tempo para distintos Reynolds
(b) Distribuição de temperatura na camada de geada para distintos Reynolds

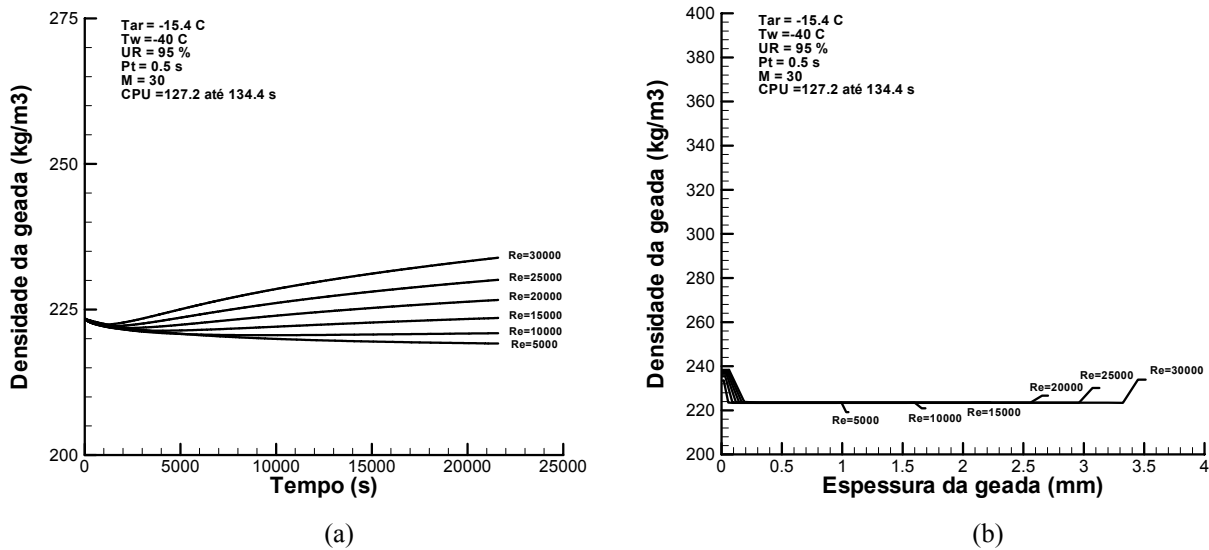


Figura 6: (a) Variação da densidade da geada no tempo para Reynolds distintos
(b) Variação da densidade da geada na espessura para Reynolds distintos

Observa-se, na Figura 7 (a), que para Reynolds entre 5000 e 30000 a condutividade da geada tem um comportamento similar ao da densidade. Este fato confirma a proporcionalidade direta entre a condutividade térmica e a densidade.

Observando a Fig. 7 (b), podemos verificar que também a maior variação no campo de temperaturas com valores maiores de Reynolds.

Para todos os Reynolds, Fig. 8 (a), observa-se que a fração volumétrica de gelo na geada comporta-se de modo similar a densidade. Verifica-se uma influência quase nula do número de Reynolds na fração volumétrica da zona interior da camada de geada, notando-se, que as espessuras correspondentes em cada caso são diferentes. Já na superfície da geada sua influência é notada.

A porosidade da geada na Fig. 8 (b), apresenta um comportamento coerente, oposto ao comportamento da fração volumétrica de gelo. Na literatura não é fácil encontrar informação experimental ou teórica relativa a esta propriedade da geada. Um trabalho de Luer e Beer (2000) apresenta uma distribuição de porosidade assumida na superfície da geada, para um Reynolds de 1500, de aproximadamente 95 %. Verificou-se no presente trabalho alta porosidade perto da parede fria, ao redor de 70%.

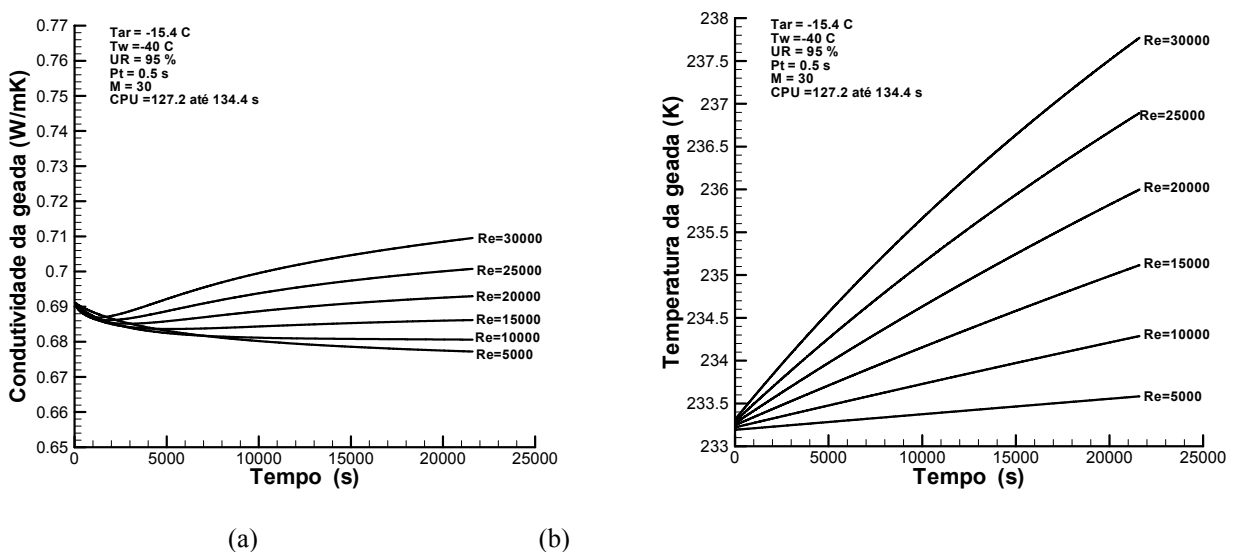
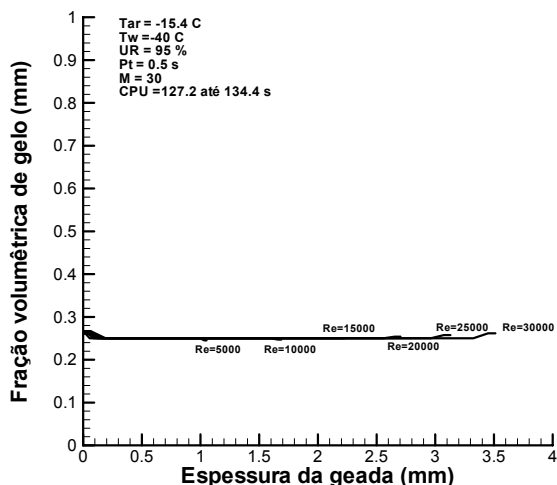
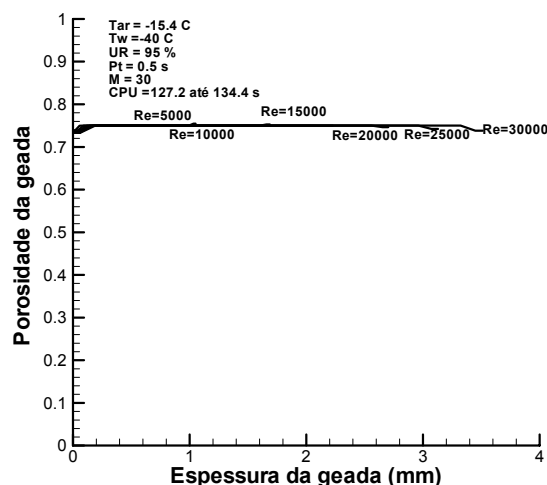


Figura 7: (a) Variação da condutividade da geada no tempo para Reynolds distintos
(b) Comportamento da temperatura da geada no tempo para Reynolds distintos



(a)



(b)

Figura 8: (a) Variação da fração volumétrica de gelo na geada para Reynolds distintos
(b) Comportamento da porosidade da geada para Reynolds distintos

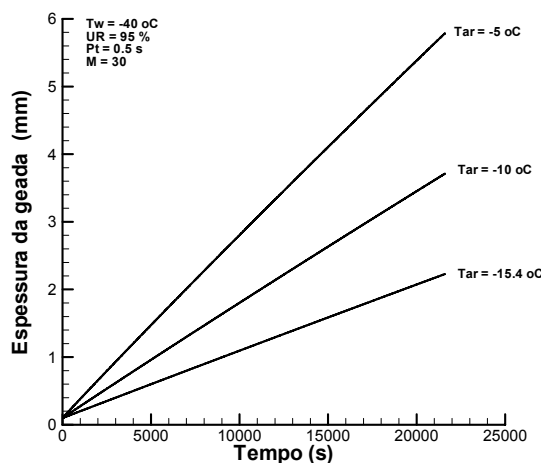
Nas figuras que são apresentadas a seguir será possível determinar os efeitos provocados pela temperatura do ar úmido em diferentes propriedades da geada, ou no processo de formação da geada.

No primeiro gráfico, Fig.9 (a) pode ser observado que a temperatura do ar, na medida que é aumentada provoca um significativo incremento na espessura da camada de geada obtida.

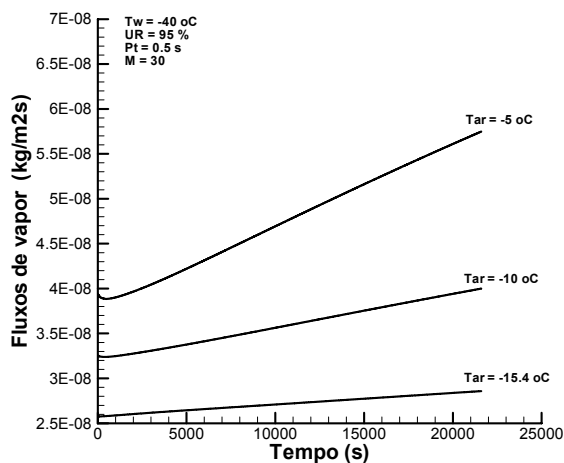
Na Figura 9 (b), pode-se observar uma relação direta entre a temperatura do ar e o fluxo de vapor difundido na geada e responsável por incrementar a densidade da geada e sua espessura.

A Figura 10 (a), apresenta um comportamento diverso do que foi visto nas figuras anteriores. Desta vez, o comportamento se inverte, tem-se que a relação é inversa entre o ar e a porosidade da geada. Ou seja, a maiores temperaturas do ar úmido a porosidade da geada alcançada decresce mais rápido no tempo chegando a valores menores.

Com o último gráfico, Fig. 10 (b), fecha-se a seqüência de efeitos da temperatura do ar úmido. Verifica-se uma vez mais que a distribuição de temperatura da geada, desta vez ao longo da espessura da camada, responde de forma direta às mudanças, na temperatura considerada do ar úmido.



(a)



(b)

Figura 9: (a) Espessura da geada em função da temperatura do ar
(b) Efeito da temperatura do ar no fluxo de vapor de água do ar que difunde através da geada

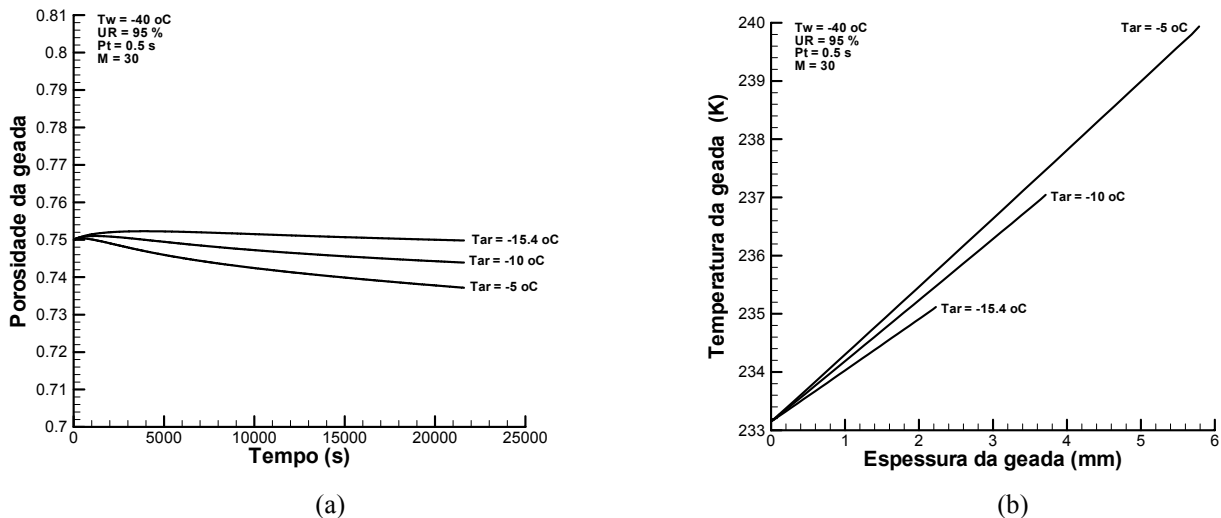


Figura 10: (a) Efeito da temperatura do ar na porosidade da geada
(b) Efeito da temperatura do ar na temperatura da geada na espessura

7. Conclusões

Foi apresentado um modelo físico para simular o crescimento e densificação da camada de geada que é formada por depósito de vapor d'água procedente do ar úmido quando submetido a um processo de transferência de calor e massa por contato com uma superfície plana suficientemente fria.

O simulador apresentado permite observar as variações temporais, essencialmente da espessura da geada como também de outras propriedades da mesma, tais como; densidade e calor específico da geada, condutividade térmica efetiva, fração volumétrica de gelo e da porosidade da geada.

As conclusões sobre o comportamento da geada alcançadas neste estudo podem ser resumidas como segue:

- Verifica-se que a espessura da geada varia no mesmo sentido que o número de Reynolds. Porém, para altos números de Reynolds o crescimento da espessura torna-se insensível a sua variação.
- É desprezível a influência do número de Reynolds na fração volumétrica de gelo no interior da camada de geada. Dada a extrema dificuldade de se medir esta distribuição e sua importância prática, este resultado do simulador é de grande relevância para posteriores estudos de adesão da geada e mesmo sua remoção.
- O número de Reynolds exerce fraca influência na densidade superficial.
- Quando analisamos as propriedades densidade, fração volumétrica e porosidade da geada, encontramos uma grande influência do chamado fator de resistência a difusão. Existe uma influência das condições operacionais externas no valor assumido pelo fator quando queremos reproduzir a principal, senão a única, grandeza medida com exatidão na geada sobre uma superfície, sua espessura.
- Outro parâmetro de grande importância é a fração volumétrica inicial considerada. Ela tem influência inversa em propriedades tais como espessura e temperatura, e direta sobre a densidade da geada.

8. Agradecimentos

O primeiro autor agradece a Universidad del Bío-Bío/Chile, pelo suporte financeiro, e o segundo autor reconhece o suporte de CNPq no projeto nº 350194/93-9

9. Referências

- ASHRAE, 1997, "Psychrometrics". *Fundamentals Handbook*, Cap. 6.
- Auracher, H., 1972, "Water Vapor Diffusion and Frost Formation in Capillaries". Annex 1972-1. In. *Bulletin of the International Institute of Refrigeration*. Communications B1, B2, and E1, Freudenstadt, pp. 477-488
- Chen, H., Thomas, L., and Besant, R., 2000, "Modeling Frost Characteristics on Heat Exchanger Fins: Part II, Model Validation and Limitations", *ASHRAE Transactions*, v. 106, part. 2, pp. 1-9
- Dietenberger, M., 1983, "Generalized Correlation of the Water Frost Thermal Conductivity", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 26, N° 4, pp. 607-619
- Gatica Sánchez, J.A., 2003, "Um modelo para crescimento da geada". Tese de doutorado. PEM/COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil
- Ismail, K.A.R. and Salinas, C.S., 1999, "Modeling of Frost Formation over Parallel Cold Plates", *International Journal of Refrigeration*, Vol.22, pp. 425-441.

Lee, K.S., Kim, W.S. and Lee, T.H., 1997, "A One-Dimensional Model for Frost Formation on a Cold Flat Surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.40, No. 18, pp. 4359-4365.

Le Gall, R., Grillot, J.M. and Jallut, C., 1997, "Modeling of Frost Growth and Densification", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.40, No. 13, pp. 3177-3187.

Luer, A., and Beer, H., 2000, "Frost Deposition in a Parallel Plate Channel under Laminar Flow Conditions", *Int. Journal Thermal Science*, v. 39, pp. 85-95.

Mao, Y., Besant, R.W. and Chen, H., 1999, "Frost Characteristic and Heat Transfer on a Flat Plate under Freezer Operating Conditions: Part I, Experimentation and Correlations", *ASHRAE Transactions*, Vol.99, No.1, pp.739-745.

O'Neal, D.L. and Tree, D.R., 1984, "Measurement of Frost Growth and Density in a Parallel Plate Geometry", *ASHRAE Transactions*, Vol.90, part. 2, pp. 278-290.

O'Neal, D.L. and Tree, D.R., 1985, "A Review of Frost Formation in Simple Geometries", *ASHRAE Transactions*, Vol.91, part. 2A, pp. 267-281.

Sahin, A. Z., 1994, "An Experimental Study on the Initiation and Growth of Frost Formation on a Horizontal Plate", *Experimental Heat Transfer*, v. 7, pp. 101-119

Tao, Y.X., Besant, R.W., and Rezkallah, K.S., 1993, "A Mathematical Model for Predicting the Densification and Growth of Frost on a Flat Plate", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 2, pp. 353-363

Tudor, V., M.M., Ohadi., and F.H.R, França., 2003. "An Experimental Investigation on Frost Control Using DC and AC Electric Fields on Horizontal, Down Ward –Facing Plate ". *HVAC&R Research*, v. 9, Part. 2, pp. 203-213

Yun, R., Kim, Y., and Min, M., 2002. "Modeling of Frost Growth and Frost Properties with Airflow over a Flat Plate ". *Int. Journal of Refrigeration*, v. 25, pp. 362-371

10. Direitos autorais

FROST FORMATION ON COLD SURFACES

Jorge Alex Gatica Sánchez

Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad del Bío-Bío
Casilla 5-C – Concepción, Chile
jgatica@ubiobio.cl

Nisio de Carvalho Lobo Brum

Programa de Engenharia Mecânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
Cx. P. 68503 – 21945 – 970 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil
nisio@serv.com.ufrj.br

Abstract. *A common operational condition in evaporators used in low temperature warehouses is the frost formation on its external surface, due the contact with the humid air. This deposit affects the heat transfer reducing the refrigeration capacity. This paper presents the development of a computational simulator for the analysis of the frost layer and its growth on low temperature plates.*

The simulator was able to reproduce experimental results obtained in the literature for several psychrometric conditions of the humid air flowing over the frost layer surface.

The influence of parameters such as; the air psychrometric state, the air Reynolds number, the plate temperature, on the growth and densification of the deposit are presented and discussed.

Using the results generated by the program an exploratory study was conducted and some explanations was obtained in regard the behavior of the porosity and temperature fields field under a great number of operational conditions.

Keywords. *Frost formation, evaporators, conjugated problems*