

## CRESCIMENTO DA CAMADA DE GELO EM EVAPORADORES

**Jorge Alex Gatica Sánchez**

Programa de Engenharia Mecânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.  
Cx. P. 68503 – 21945 – 970 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
[gatica@lttc.coppe.ufjr.br](mailto:gatica@lttc.coppe.ufjr.br)

**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.ufjr.br](mailto:nisio@serv.com.ufjr.br)

**Resumo.** *A desumidificação do ar úmido em situações de baixas temperaturas é um problema de grande importância na operação de forçadores de ar em câmaras frigoríficas. O tempo de degelo representa um custo e risco operacional cuja redução é de grande importância para a indústria alimentícia. Neste trabalho investigamos a formação e crescimento da camada de gelo na superfície de aqueles trocadores de calor. Os modelos de Le Gall et al (1997) e Ismail e Salinas (1999) são adaptados para o problema acima descrito e soluções numéricas são apresentadas descrevendo a dinâmica do fenômeno. O modelo conjuga as equações de conservação para as duas fases líquida e sólida e o contorno, representado pela condição do ar úmido. Especial atenção é dada a distribuição da fração volumétrica de gelo e o seu acoplamento com o campo de temperaturas ao longo do tempo*

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

### 1. Introdução

A formação da geada é um complexo processo transiente de troca de calor e massa com limites móveis. Os cristais da geada aparecem primeiro nas localizações onde a superfície contém locais preferidos de nucleação e onde a umidade condensa. Neste último aspecto a formação da geada é semelhante à ebulição nucleada sobre uma superfície quente.

O número de locais de nucleação aumenta rapidamente com o passar do tempo e a formação se torna quase uniforme na superfície inteira. O congelamento da água condensada formam cristais como agulhas produzindo uma superfície áspera. Estes cristais se ramificam e formam estruturas arbóreas que são responsáveis pelo aumento da espessura da geada.

A exposição do ar úmido a condições de temperaturas baixas, inferiores a zero graus, é relativamente freqüente na prática da engenharia. Em evaporadores de instalações frigoríficas operando em condições subzero, dá-se a formação de geada na superfície externa em contato com o ar. Esta ocorrência é indesejável porquanto afeta a troca de calor e agrava a perda de carga no lado do ar diminuindo a capacidade de refrigeração. Este fato pode chegar a afetar significativamente o desempenho de serpentinas de resfriamento e placas congeladoras em equipamentos de refrigeração domésticos, comerciais e industriais posto que exige de alguma forma a suspensão da refrigeração para a remoção da camada de geada excessivamente espessa. No relativo a modelos para a formação ou crescimento da geada sobre superfícies frias, podemos citar entre outros O'Neal e Tree (1984) que fazem uma investigação experimental para caracterizar os efeitos do número de Reynolds, umidade do ar, temperatura do ar e temperatura da placa de crescimento da geada e densidade da geada sobre uma placa vertical em uma geometria de fluxo paralela. Eles verificam que aumenta o crescimento da geada com aumentos no número de Reynolds. Lee et al (1997), desenvolvem um modelo analítico para a formulação de uma camada de geada sobre uma superfície plana fria. Eles assumem processos em estado quase permanente, difusão unidimensional do calor, a densidade da geada em qualquer instante é um valor médio da camada, a condutividade térmica da geada é função da densidade, pressões do fluxo de ar externo e interno à geada são uniformes. 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. Assume-se 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 com instrumentos especialmente projetados e calibrados.

Interessantes contribuições são também de Ismail et al (1999), que avalia parâmetros envolvidos na modelagem do processo de formação de geada sobre superfícies planas frias submetidas a fluxo de ar úmido. O modelo contempla uma análise unidimensional transiente baseado na técnica do volume local médio e validam o mesmo comparando-o com dados experimentais disponíveis. A modelação da camada de geada desenvolvida em este trabalho foi baseada principalmente nos procedimentos de cálculo e hipóteses estabelecidos por este autor e Le Gall et al (1997).

O presente trabalho aborda o fenômeno do crescimento da geada sobre uma superfície visando contribuir para a otimização destes trocadores de calor.

## 2. Formação da geada

Aceita-se atualmente considerar três períodos distintos na descrição da evolução de uma camada de geada. Desde o início, quando uma placa limpa e fria é exposta a um fluxo de ar úmido, observa-se;

- 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 e mais curto período, geralmente caracterizado 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 uma direção vertical a aproximadamente a uma taxa constante. Por ser relativamente breve não será considerado no presente estudo ficando sua presença substituída pelo estabelecimento das condições iniciais do segundo período.

### 2.2. Período do crescimento da camada de geada

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

### 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 acontece até que o equilíbrio térmico da camada de geada inteira é alcançado.

## 3. Modelo físico - matemático

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

O sistema a ser analisado, Fig. 1, consiste de duas placas planas horizontais, uma inferior distanciada da superior uma altura  $B$  determinada. Entre elas escoava uma mistura de vapor de água e ar seco (ar úmido). Ambas placas são isotérmicas e sua temperatura é inferior a zero e inferior à temperatura de entrada do escoamento.

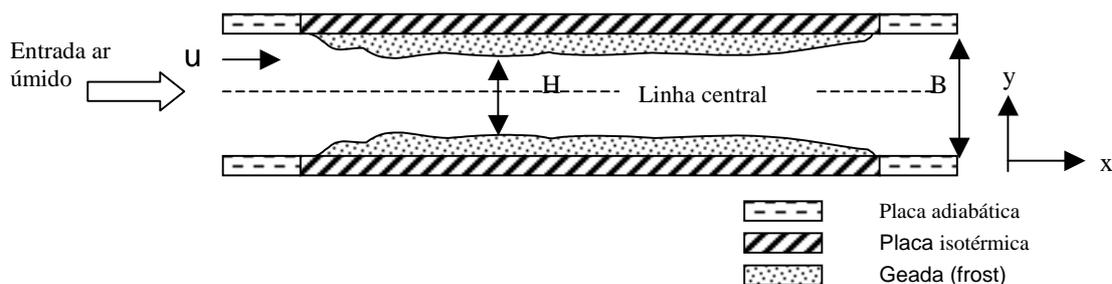


Figura 1: Geometria

Pelas condições de escoamento, espera-se uma condensação do vapor de água do ar sobre a superfície e posterior congelamento, com formação de uma camada de geada. Desprezamos a variação ao longo do eixo  $x$  da espessura da geada.

O processo é considerado transiente.

As forças atuantes sobre a camada de geada são basicamente devido a tensão superficial na interface vapor-mistura e a tensão viscosa entre a superfície da placa e o fluido, as forças de corpo são desprezadas.

As fases sólida e fluida são perfeitamente bem definidas e a interface de ablação é uma superfície matemática de espessura nula.

A modelagem matemática do problema físico analisado procura descrever as variações temporais da camada de geada, da densidade e da condutividade da mesma. Tais resultados serão comparados com resultados obtidos de medições experimentais.

### 3.1. Hipóteses básicas

A camada de geadas é um meio poroso considerado como pseudo-homogêneo, onde a transferência de calor e massa são descritos, respectivamente, pelas leis de Fourier e Fick. Devido as condições prevalentes de equilíbrio termodinâmico através da camada de geadas, estes dois fenômenos de transporte são acoplados.

Com a finalidade de que a modelagem físico-matemática represente na melhor forma possível os fenômenos físicos considerados, através de um modelo matemático de solução analítica ou numérica, introduzimos hipóteses e condições na intenção de aproximar a situação modelada aos fatos reais.

O modelo apresentado é baseado nas seguintes considerações:

Fluido incompressível Newtoniano

Circulação forçada entre as duas placas paralelas

Balances de massa e energia tem que ser satisfeitos na interface

Propriedades variáveis do ar úmido na camada porosa

Efeitos gravitacionais desprezíveis

Simetria em relação ao plano horizontal central na seção

A camada da geadas é porosa

O ar úmido no interior da camada porosa é saturado.

A teoria das misturas é aplicável no ar úmido residente nos poros e no fluxo principal

As resistências interfaciais são desprezíveis

Finalmente, são desprezadas as variações de temperatura do ar úmido.

A solução do modelo tem início num tempo determinado, quando a camada de geadas pode ser considerada como uma camada porosa uniforme de espessura e massa específica média definidas.

Observe-se que a área para o fluxo de ar muda devido ao depósito de geadas sobre as duas placas planas. Isto leva a mudanças na velocidade de fluxo do ar, o número de Reynolds e os coeficientes locais de transferência de calor e massa.

Embora muitos autores prefiram, por simplicidade do cálculo numérico, trabalhar adimensionalmente, neste trabalho prefere-se trabalhar dimensionalmente para garantir resultados numéricos imediatamente coerentes.

### 3.2. Formulação do modelo

Nesse caso, a técnica do volume local médio pode ser usada e consiste em considerar um volume de controle elementar  $V$  onde coexistem o volume de gelo  $V_I$  e volume de ar úmido  $V_g$ . Isto permite determinar as frações volumétricas de ar úmido e gelo ( $\epsilon_g, \epsilon_I$ ), como;

$$\epsilon_I = V_I/V \quad \text{e} \quad \epsilon_g = V_g/V \quad (1)$$

com

$$\epsilon_I + \epsilon_g = 1 \quad \text{e} \quad \left( \frac{\partial \epsilon_I}{\partial t} \right) = - \left( \frac{\partial \epsilon_g}{\partial t} \right) \quad (2)$$

Equação da energia

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + I_{ig} \dot{m} = \nabla [k_c(\epsilon_I, T) \nabla T] \quad (3)$$

onde  $\rho$  é a massa específica da geadas,  $C_p$  o calor específico,  $I_{ig}$  o calor latente de ablação ou sublimação do vapor de água,  $\dot{m}$  a taxa volumétrica de mudança de fase,  $k_c$  a condutividade térmica da geadas em função da fração volumétrica do gelo e da temperatura  $T$ .

Equação de continuidade para a fase sólida da geadas:

$$\frac{\partial \epsilon_I}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{\rho_I} = 0 \quad (4)$$

onde  $\rho_I$  é a massa específica do gelo.

Equação de difusão da fase gás-vapor :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_g \cdot \rho_v) - \dot{m} = \nabla \cdot [D_{\text{eff}} \nabla \rho_v] = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{\text{eff}} \frac{\partial \rho_v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

onde  $\rho_v$  representa a massa específica do vapor de água, variável avaliada através da equação de estado dos gases e  $D_{\text{eff}}$  corresponde ao coeficiente de difusão efetivo.

### 3.3. Equações para as condições de contorno

Na camada de geada, a conservação de massa requer que a taxa de transferência de massa da corrente de ar livre para dita camada seja igual a taxa de massa difundida no seu interior mais a taxa de crescimento da camada. Assim,

$$h_m [\rho_{v\infty} - \rho_{vsi}(T_s)] = D_{\text{eff}} \frac{\partial \rho_v(y = y_s, t)}{\partial y} + \rho_{fs} \frac{\partial y_s}{\partial t} \quad (6)$$

onde  $h_m$  é o coeficiente convectivo de transferência de massa,  $\rho_{v\infty}$  representa a massa específica do vapor de água no ar não perturbado,  $y, y_s$  representam a posição no eixo vertical e a posição da superfície da geada neste eixo respectivamente,  $\rho_{vsi}$  massa específica do vapor de água saturado sobre o gelo,  $T_s$  temperatura na superfície da geada e finalmente  $\rho_{fs}$  representa a massa específica da geada na superfície.

Por outro lado o balanço de energia requer também que a taxa de calor removida por convecção da camada de geada ao ar livre seja igual a taxa de calor conduzida através da camada de geada mais a taxa de calor latente liberado por a camada de geada. A equação representativa seria,

$$h_c (T_{\text{ar}} - T_s) = k_c \nabla T_s + I_{ig} \rho \left( y_s \right) \left( \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) \quad (7)$$

onde reconhecemos o coeficiente de transferência de calor convectivo  $h_c$ , e a temperatura do ar no perturbado  $T_{\text{ar}}$ .

Finalmente, a fração volumétrica de gelo da geada formada, é igual a fração volumétrica de gelo da camada já estabelecida sobre a superfície e pode ser expressa como:

$$\frac{\partial \epsilon_I(y = y_s, t)}{\partial y} = 0 \quad \text{e na superfície da placa,} \quad \begin{cases} T(y = 0, t) = T_w \\ \frac{\partial \epsilon_I(y = 0, t)}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Esta última equação implica que a fração volumétrica de gelo das camadas de geada perto da superfície é invariante.

Da equação da continuidade, Eq. (4), é possível determinar a taxa volumétrica de mudança de fase  $\dot{m}$ , em função da variação da fração volumétrica de gelo da geada  $\epsilon_I$  e da densidade do gelo  $\rho_I$ . Onde valores positivos de  $\dot{m}$  correspondem a processo de sublimação da matriz de gelo, enquanto que valores negativos relacionam-se com processo de condensação de vapor de água em gelo (ablinação).

Na equação de balanço de massa na interface Eq. (6), o fluxo de massa total entregue por convecção na superfície da geada é função da temperatura superficial da geada  $h_m [\rho_{v\infty} - \rho_{vsi}(T_s)]$ . Por outra parte, o fluxo em massa de vapor de água que difunde através da superfície da geada é dado por  $D_{\text{eff}} \frac{\partial \rho_v(y = y_s, t)}{\partial y}$ . No caso de crescimento da geada, a primeira expressão excede a segunda, de maneira que alguma água condensará no topo, contribuindo ao subsequente crescimento da camada de geada na forma  $\rho_{fs} \frac{\partial y_s}{\partial t}$ , termo que na realidade corresponde e pode ser calculado como a diferença entre os dois anteriores.

### 3.4. Resolução de tempo inicial

A resolução começa no tempo  $t^0$ , para o qual a camada de geada é considerada como uma camada porosa uniforme de espessura  $y_s^0 = 0.1 \text{ mm}$  e densidade média  $\bar{\rho}^0 = 25 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ . Estes valores foram recomendados por Le Gall et al (1997), para a contabilização do período de crescimento do cristal.

#### 4. Determinação das propriedades termofísicas

Com o propósito de simular posteriormente o processo de formação de geada é necessário determinar as propriedades termofísicas das diferentes fases e os coeficientes de transferência usando correlações empíricas e/ou experimentais disponíveis na literatura. Principalmente consideraremos correlações disponíveis em Ismail et al (1999) e em Le Gall et al (1997). Assim,

##### As propriedades térmicas do ar seco e do vapor d'água

A condutividade térmica do ar, para  $180 \leq T \leq 600$  [K]

$$k_{ar} = -3.381E-08 \cdot T^2 + 9.814E-05 \cdot T - 1.308E-04 \quad [W/m \cdot K] \quad (9)$$

O coeficiente de difusão efetiva é estimado como

$$D_{eff} = \epsilon_g \cdot D_{AB}(1+F) \quad \text{e na superfície} \quad D_{eff} = \epsilon_g \cdot D_{AB}(1+F_s) \quad [m^2/s] \quad (10)$$

onde F e  $F_s$  são como dados por Tao et al (1993). Para ambos casos,

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

O coeficiente convectivo de transferência de calor é estimado usando expressões devidas a O'Neal e Tree (1985) referidas por Le Gall et al (1997). Onde Dh é o diâmetro hidráulico, Nu representa o número de Nusselt, Re o número de Reynolds e Pr, o número de Prandtl.

$$Nu = 0.038 \cdot Re^{0.75} \cdot Pr^{0.33} \quad (12)$$

$$h_{cv} = k_{ar} \cdot Nu/Dh \quad (13)$$

Da relação de Lewis para a mistura ar-água

$$h_m = h_{cv}/(\rho_\infty \cdot C_{p_a}) \quad (14)$$

onde  $\rho_\infty$  é a massa específica do ar em zona não perturbada

##### Propriedades térmicas do gelo e da geada

Condutividade térmica do gelo, valida para  $100 \leq T \leq 273$  [K]

$$k_I = \frac{630}{T} \quad [W/m \cdot K] \quad (15)$$

Calor específico do gelo

$$C_{p_I} = 2109 + 3.66(T - 273.15) \quad [J/kg \cdot ^\circ C] \quad (16)$$

Massa específica do gelo

$$\rho_I = \frac{1}{0.0010907 + 1.4635E-07T} \quad [kg/m^3] \quad (17)$$

Calor latente de sublimação

$$I_{ig} = (-0.04667(1.8(T - 273.15) + 32) + 1220.1) \cdot 2322 \quad [J/kg] \quad (18)$$

A massa específica da camada de geada

$$\rho_f = \varepsilon_I \cdot \rho_I + \varepsilon_g (\rho_a + \rho_v) \quad (19)$$

onde  $\rho_a$  e  $\rho_v$  são as massas específicas do ar e do vapor d'água do ar nos poros da geada.

O calor específico da geada

$$C_{p_f} = (\varepsilon_I \cdot \rho_I \cdot C_{p_a}(T) + (1 - \varepsilon_I)(\rho_a \cdot C_{p_a} + \rho_v \cdot C_{p_v})) / \rho_f \quad (20)$$

A condutividade da geada

$$k_f = \varepsilon_I \cdot k_I + (1 - \varepsilon_I) \cdot k_{ar} \quad (21)$$

Para avaliar a condutividade térmica da geada usaremos o modelo de Auracher tal como referido por Le Gall et al (1997).

$$1/k_c = CC_1/k_H + (1 - CC_1)/k_A \quad (22)$$

sendo  $k_H$  e  $k_A$  pesos para as principais condutividades, do gelo e do ar.

$$1/k_H = (1 - \varepsilon_I)/k_{ar} + \varepsilon_I/k_I \quad (23)$$

$$1/k_A = (1 - \varepsilon_I) \cdot k_g + \varepsilon_I \cdot k_I \quad (24)$$

com

$$CC_1 = 0.42(0.1 + 0.995^{\rho_f}) \quad (25)$$

## 5. Resolução numérica

As equações, na sua forma conservativa, foram resolvidas numericamente de forma segregada através de um método de diferenças finitas implícito

O cálculo da distribuição de temperatura na geada utilizou o algoritmo TDMA usando relaxação segundo o método SOR.

Abaixo esboça-se o roteiro da solução segregada empregada;

- Para o cálculo da fração volumétrica de gelo, utiliza-se a Eq. (4) da continuidade, que discretizada, escreve-se,

$$\varepsilon_j = \varepsilon_j^0 - \frac{\dot{m}}{\rho_I} \cdot \Delta t \quad (26)$$

- Proceder-se a uma iteração até a diferença nos valores da temperatura entre duas sucessivas iterações seja menor que uma determinada tolerância.
- Atualização das temperaturas, propriedades do ar, do gelo, e da geada (além das condutividades e coeficientes de difusão).
- Cálculo do fluxo de massa total por convecção na superfície, fluxo de vapor efetivamente difundido através da geada e o crescimento da camada de geada. Uso da Eq. (6).
- Recálculo do espaço livre entre as camadas de geada, cálculo da nova velocidade e do novo Reynolds, número de Nusselt e os coeficientes de transferência de calor e massa de acordo com equações (12) a (14).
- Cálculo de novo incremento para a geração de malha.
- Interpolação das propriedades na nova posição da interface.

## 6. Resultados e discussão

### 6.1. Fator de resistência a difusão

Embora Le Gall et al (1997), tenham feito uma profunda discussão em relação ao fator de resistência a difusão, preferiu-se aqui utilizar uma expressão mais simples proposta por Tao et al (1993).

## 6.2. Geração de Resultados

As figuras apresentadas são o resultado do programa da simulação através de um código escrito em FORTRAN, operando nas condições indicadas em cada quadro das figuras.

Uma predição para a formação da geada entre placas horizontais em convecção forçada, é mostrada na Fig. 2a seguinte. Num lapso de 6 horas a camada de geada alcança uma altura de quase 3.5 mm. Comportamento parecido, em condições de operação similares, obtido por O'Neal e Tree (1984), é referido por Padki et al (1989).

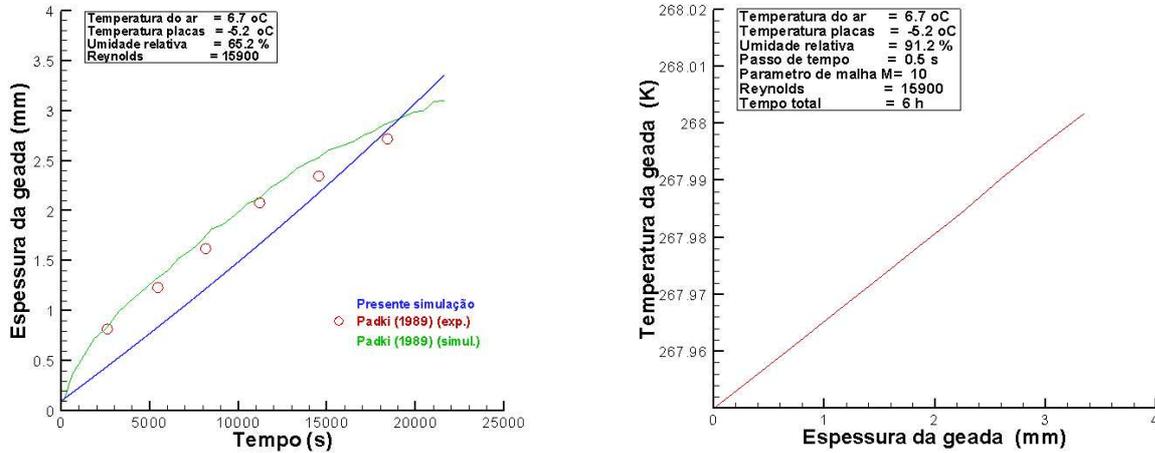


Figura 2: (a) Comparação da variação da espessura da geada no tempo (b) Distribuição da temperatura da geada

A distribuição de temperaturas ao longo da espessura da camada de geada pode ser vista na Fig. 2b. O comportamento é praticamente linear se bem tende a ser assintótico perto da superfície da geada.

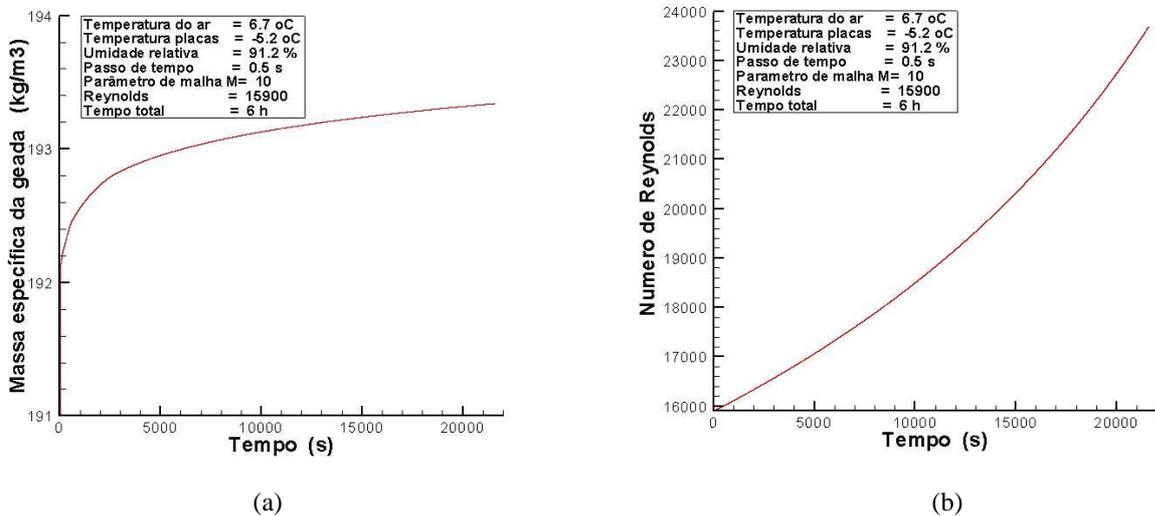


Figura 3: (a) Variação da massa específica da geada no tempo (b) Variação do Reynolds no tempo

Pode apreciar-se da Fig. 3a que a massa específica da geada experimenta um leve incremento ao longo do tempo. Nesse caso o tempo de simulação foi de 6 horas o qual concorda com o comportamento da massa específica da geada apresentado na literatura por outros autores tais como Ismail e Salinas (1999), Chen et al (1999). No entanto, as variações de massa específica nesses casos são mais significativas que as obtidas na simulação, seguramente devido a que foram consideradas outras condições de operação. Resulta conveniente observar a Figura 4a nas condições de operação que se indicam. Cabe mencionar que não existe muita informação na literatura relativa a variação das propriedades da geada formada entre placas paralelas a baixa temperatura.

Embora seja previsível as mudanças que ocorrem no número de Reynolds para o fluxo de ar entre as placas frias paralelas por causa do estrangulamento do ar, gerado pelo depósito de geada nas paredes, a Fig. 3b mostra com clareza tal comportamento.

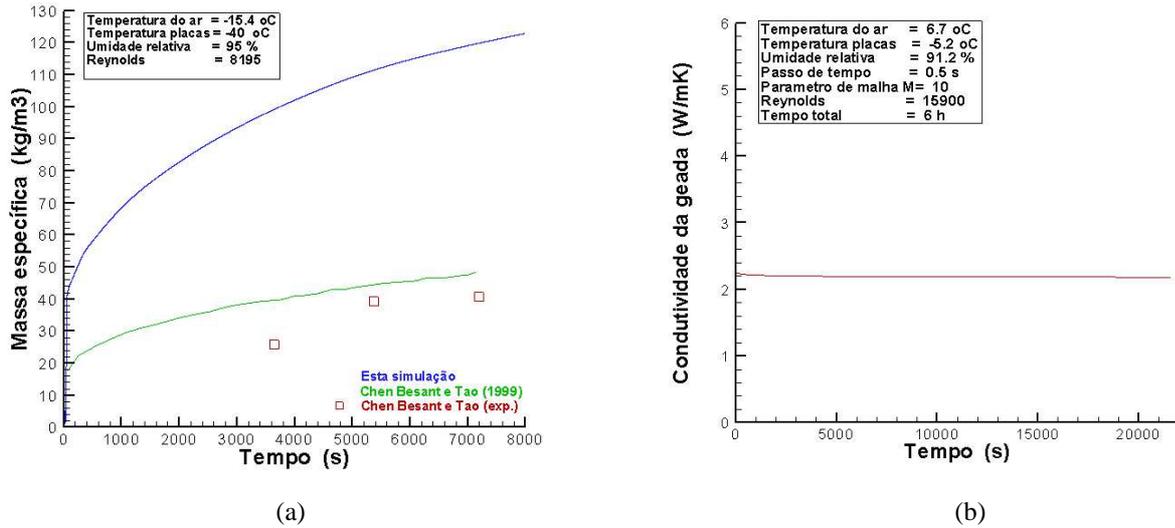


Figura 4: (a) Comparação variação da massa específica da geada (b) Variação da condutividade da geada no tempo

Um comportamento similar é observado na distribuição da massa específica da geada, Fig. 4a, quando comparado com valores experimentais e simulados por Chen et al (1999) para fluxo de ar úmido sobre uma placa plana fria. Com respeito a distribuição da condutividade no tempo, pode ser observado na Fig. 4b, que esta praticamente não varia, permanecendo quase constante ao longo do tempo.

As figuras a seguir diferem das anteriores principalmente no que diz respeito as condições de operação.

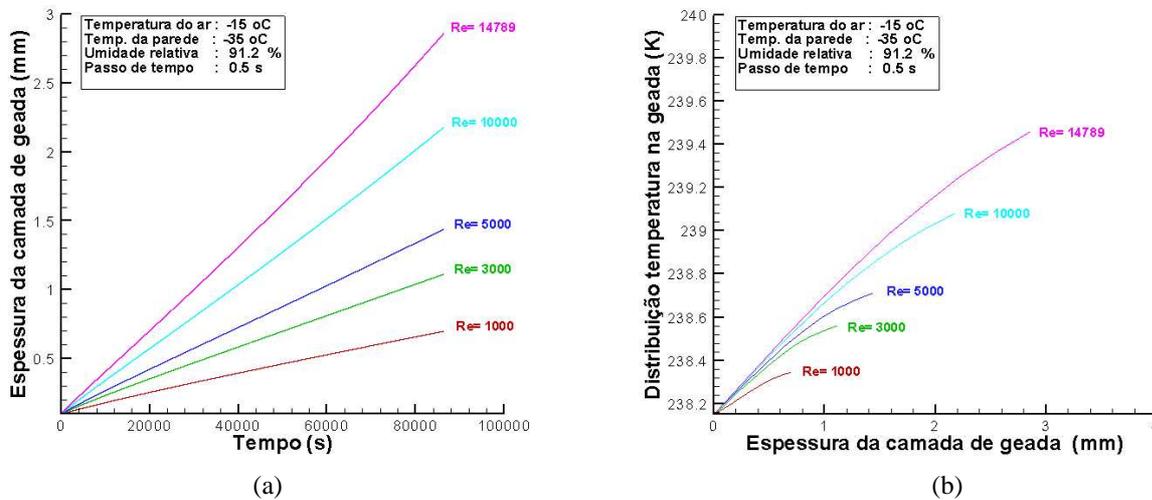


Figura 5: (a) Crescimento da camada de geada no tempo para distintos Reynolds (b) Distribuição de temperatura na camada de geada para distintos Reynolds

Na Figura 5a, pode ser observada a variação na espessura da camada de geada ao longo de um prolongado tempo, 24 horas. Nota-se que para baixos valores de Reynolds o crescimento da mesma é muito pequeno e incrementando na medida que cresce o número de Reynolds. Confirma-se então as observações de O'Neal e Tree (1984).

Observando a Figura 5b, podemos notar de novo que as espessuras são maiores para altos Reynolds. Coincidentemente, tratando-se de espessuras reduzidas e menores Reynolds, as temperaturas superficiais alcançadas são também menores.

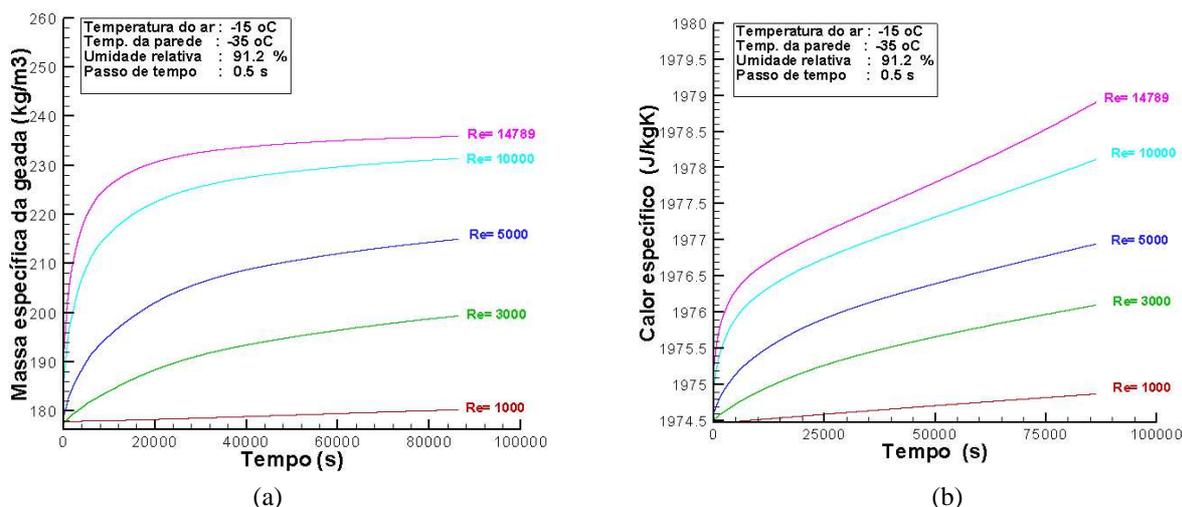


Figura 6: (a) Variação da massa específica da geada no tempo para distintos Reynolds  
(b) Calor específico da geada no tempo para distintos Reynolds

O comportamento da massa específica da geada ao longo do tempo, 24 horas, pode ser visualizado na Fig. 6a. Para as condições de operação indicadas, observa-se que a massa específica aumenta significativamente até aproximadamente 10000 s (3 horas) para o máximo Reynolds considerado. No caso do menor Reynolds o crescimento da densidade no tempo é muito menor e contrariamente não está presente só nos tempos iniciais e sim ao longo das 24 horas de simulação. A medida que o Reynolds vai se incrementando torna-se mais visível a zona ou período de tempo inicial de maior crescimento. Em resumo, observa-se que para maiores números de Reynolds se verifica um crescimento maior da massa específica no tempo e em períodos de tempo cada vez menores.

Nas condições de operação apresentadas, verifica-se na Fig. 6b, similar a anterior, que diante de incrementos do número de Reynolds o calor específico responde em forma também diretamente proporcional. Novamente, o incremento do calor específico prolonga-se, para o caso de Reynolds baixo, durante todo o tempo de simulação a taxa quase constante. Ao máximo Reynolds apresentado, observa-se um breve período de tempo, de crescimento acelerado do calor específico, para logo continuar a taxa mais baixa. Repete-se isto para cada Reynolds, sendo cada vez maior o período de tempo de crescimento acelerado (que também decresce) na medida que o Reynolds decresce.

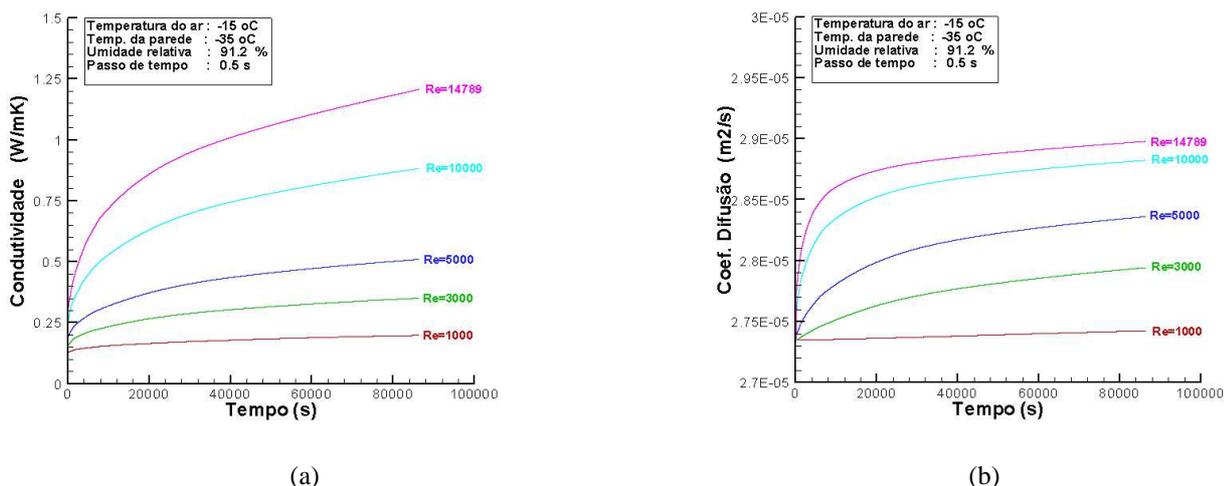


Figura 7: (a) Variação da condutividade da geada no tempo para distintos Reynolds  
(b) Variação do coeficiente de difusão no tempo para distintos Reynolds

Repete-se, para a Fig. 7a, o comportamento já explicado nos casos anteriores. A maiores Reynolds observa-se também maiores valores na condutividade da geada alcançada. Uma diferença que poderia mencionar-se nesse caso é que a condutividade varia em forma bastante similar para Reynolds baixos. A taxa de crescimento é leve nesses casos.

Com relação ao coeficiente de difusão, uma idéia de seu comportamento no tempo e frente a vários números de Reynolds, pode ser observado na Fig. 7b. Novamente temos incremento do coeficiente na medida que o número de

Reynolds cresce. Sua taxa de crescimento para número de Reynolds baixos apresenta um comportamento praticamente constante.

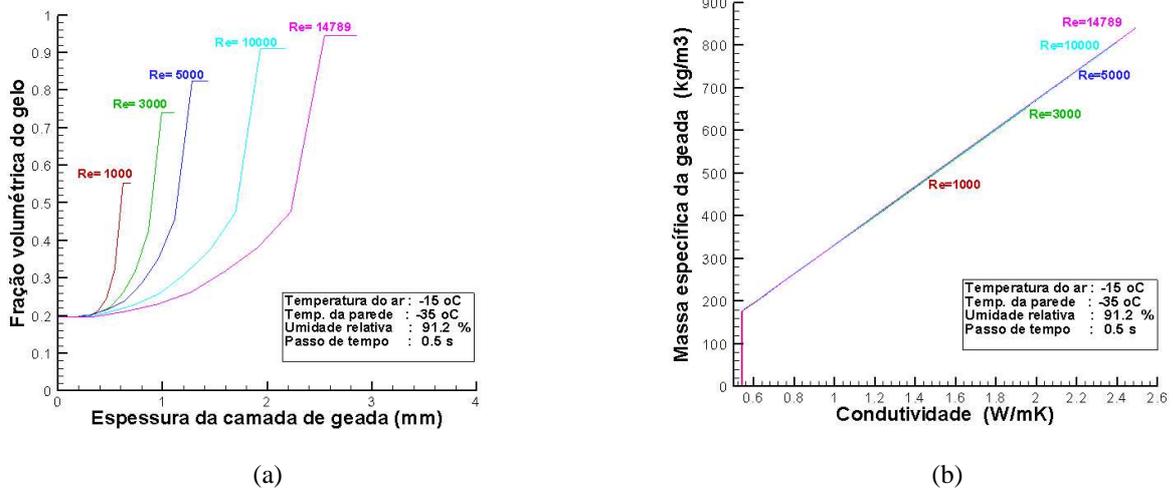


Figura 8: (a) Variação da fração volumétrica de gelo da geada para distintos Reynolds  
 (b) Relação massa específica-condutividade da geada para distintos Reynolds

Uma interessante análise pode ser feita no caso da fração volumétrica de gelo na camada da geada ao longo de sua espessura, Fig. 8a. Para todos os Reynolds observa-se que a fração volumétrica de gelo cresce e em forma bastante acelerada até alcançar um valor máximo.

Interessante observar na Fig. 8b, a relação que obtemos entre a massa específica e a condutividade térmica. Muitos trabalhos experimentais e/ou analíticos tem permitido a determinados pesquisadores, Lee et al (1997), Tao et al (1993), utilizar relações de segundo grau entre massa específica e condutividade do gelo. Este estudo indica uma relação linear entre ambas propriedades.

Observando a Fig. 9a, seguinte, podemos verificar de novo que também a temperatura tem uma maior variação para Reynolds elevados. Surpreende que os incrementos de temperatura, inclusive para o caso de elevado Reynolds, são só de décimos de grau. A variação não alcança 1 grau.

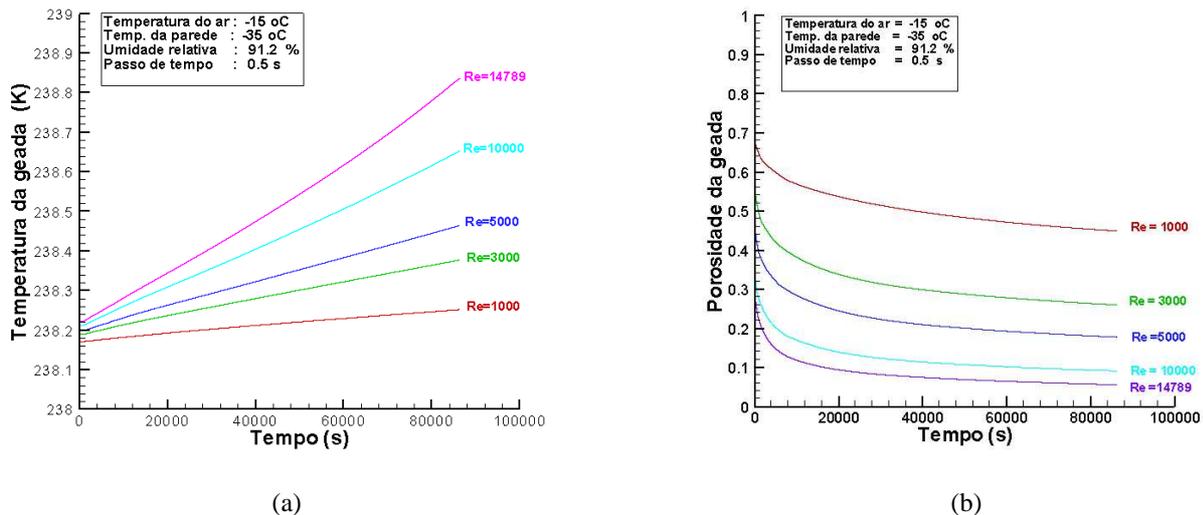


Figura 9: (a) Comportamento da temperatura da geada no tempo para distintos Reynolds  
 (b) Comportamento da porosidade da geada no tempo para distintos Reynolds.

A Figura 9b mostra que a porosidade da geada  $\gamma = (\rho_l - \rho_f) / (\rho_l - \rho_p)$ , com  $\rho_p = \rho_v - \rho_a$ , decresce rapidamente nas 3 a 4 primeiras horas, depois tende a estabilizar-se. Na literatura não é fácil encontrar informação experimental e/ou teórica relativa a esta propriedade da geada.

## 7. Conclusões

Um modelo físico completo relativo ao crescimento da camada de geada e sua densificação foi apresentado. Pode observar-se, para determinadas condições, que o fluxo de vapor de água é pequeno sobretudo quando se trabalha em condições de temperatura bastante baixas tanto para o ar como para a placa ou placas frias. A distribuição da fração volumétrica de gelo ao longo da camada resulta bastante irregular, supomos por isto que algum fator desconhecido esteja influenciando neste comportamento. Não foi encontrada na literatura informação a respeito da distribuição desta propriedade no interior da camada. Adicionalmente obtemos a distribuição da porosidade da geada ao longo do tempo, resultando num incremento bastante aceitável.

## 8. Agradecimentos

O primeiro autor agradece a Universidad del Bío-Bío/Chile e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq/Brasil, pelo suporte financeiro, e o segundo autor reconhece o suporte de CNPq no projeto n°

## 9. Referências

- Chen, H., Besant, R.W. and Tao, Y.X., 1999, "Frost Characteristics and Heat Transfer on a Flat Plate under Freezer Operating Conditions: Part II, Numerical Mod. and Comparison with Data", ASHRAE Trans., Vol. 105, part. 2. , pp. 252-259.
- 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.
- 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.
- Padki, M.M. and Sherif, S.A., 1989, "A Simple Method for Modeling the Frost Formation Phenomenon in Different Geometries", ASHRAE Transactions, Vol.95, part. 2, pp. 1127-1137.
- 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

## THE FROST LAYER GROWTH ON EVAPORATORS

### Jorge Alex Gatica Sánchez

Programa de Engenharia Mecânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.  
Cx. P. 68503 – 21945 – 970 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
[gatica@lhc.coppe.ufrj.br](mailto:gatica@lhc.coppe.ufrj.br)

### 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](mailto:nisio@serv.com.ufrj.br)

**Abstract.** *The dehumidification of the air in situations of low temperatures is a problem of great importance in the operation of fan coils in refrigerated warehouses. The defrost time represents an important operational cost and risk whose reduction is of great importance for the food industry. In this work we have investigated the formation and growth of the frost layer on a cold surface in order to simulate the practical problem described above. The models of Le Gall et al (1997) and Ismail and Salinas (1999) are merged for the solution of the mathematical equations linked to this transient physical problem. The resulting model conjugates the conservation equations for the liquid, the frost and the interface. Special attention is given to the ice fraction distribution and its relation with the temperature profile*

**Keywords.** *frost formation, evaporators, conjugated problems*