

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

GUSTAVO SILVA RODRIGUES

**MÉTODOS DE MINIMIZAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GELO POROSO
EM EVAPORADORES ATRAVÉS DE DIFERENTES
REVESTIMENTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2016

GUSTAVO SILVA RODRIGUES

**MÉTODOS DE MINIMIZAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GELO POROSO
EM EVAPORADORES ATRAVÉS DE DIFERENTES
REVESTIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica (COEME) da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná.

Orientador: Profa. Dra. Raquel da Cunha
Ribeiro da Silva

GUARAPUAVA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava
Diretoria de Graduação
Coordenação de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

MÉTODOS DE MINIMIZAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GELO POROSO EM EVAPORADORES ATRÁVES DE REVESTIMENTOS

por

GUSTAVO SILVA RODRIGUES

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 2 de dezembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva
Profa. Orientadora

MSc. Paul Adrian Delgado Maldonado
Membro titular

MSc. Henrique Ajuz Holzmann
Membro titular

Dedico este trabalho à minha mãe Eliane e aos meus Irmãos Rodrigo e Karine por todo incentivo e apoio que me concederam ao longo da vida.

AGRADECIMENTOS

Á Deus, pois sem ele nada eu seria.

Á minha mãe Eliane, pela determinação e luta durante a criação minha e dos meus irmãos.

Aos meus irmãos Rodrigo e Karine que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Á Marina por ser minha eterna companheira e pela compreensão e apoio em todos os momentos difíceis durante essa jornada.

Aos meus cunhados Helbert e Daniela, pelo carinho e apoio.

Aos meus amigos e colegas de curso, pela cumplicidade, ajuda e amizade.

Agradeço aos meus familiares que me ajudaram de forma direta ou indireta na conclusão deste trabalho.

Á minha orientadora Dra. Raquel pelo conhecimento transmitido, pelos seus conselhos, pela oportunidade, pela confiança depositada em mim e pela orientação do presente trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela disposição em avaliar o presente trabalho.

RESUMO

RODRIGUES, Gustavo. Métodos de minimização da formação de gelo poroso em evaporadores através de diferentes revestimentos. 2016. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2016.

A presença de gelo poroso nos mais diversos sistemas de refrigeração é um problema de alta relevância para a refrigeração comercial. A camada de gelo que se forma sobre a superfície fria cresce ao longo do tempo, se tornando cada vez mais densa, provocando uma redução no desempenho do sistema devido ao aumento da resistência térmica da camada. O processo de formação dos cristais de gelo é muito complexo de ser avaliado devido aos diversos parâmetros ambientais envolvidos nesse fenômeno, onde os processos de transferência de calor e massa ocorrem simultaneamente. Através de simulações numéricas foi possível determinar a espessura da camada porosa de gelo e a temperatura da superfície da camada porosa, diferentes tipos de revestimentos para a superfície do evaporador foram testados numericamente. Além de apresentar uma análise sobre os fatores que influenciam esse fenômeno, o presente trabalho também proporciona uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes tipos de revestimentos propostos. Dados experimentais e numéricos disponíveis foram utilizados para validar o modelo numérico utilizado. Este trabalho é um estudo numérico do fenômeno de formação de gelo poroso e tem como objetivo encontrar métodos eficazes na contenção do crescimento das camadas de gelo sobre superfícies frias.

Palavras-chave: Gelo Poroso. Evaporadores. Eficiência. Camadas de Gelo. Simulação.

ABSTRACT

RODRIGUES, Gustavo. Minimization methods of frost formation in evaporators through different coatings. 2016. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2016.

The presence of frost in the various cooling systems is a problem of high relevance to the commercial refrigeration. The layer of ice that forms on the cold surface grows over time, becoming more and more dense, causing a reduction in system performance due to the increase of the thermal resistance of the layer. The process of the formation of ice crystals is very complex to be evaluated due to the different environmental parameters involved in this phenomenon, where the transfer processes of heat and mass occurs simultaneously. Through numerical simulations it was possible to determine the thickness of the porous layer of ice and the temperature of the surface of the porous layer, different types of coatings for the evaporator surface were tested numerically. In addition to presenting an analysis about the factors that influence this phenomenon, the present work also provides a comparison between the results obtained for the different types of coatings proposed. Available experimental and numerical data were used to validate the numerical model used. This work is a numerical study of the phenomenon of porous ice formation and aims to find effective methods in the growth contention of the layers of ice on cold surfaces.

Keywords: Frost. Evaporators. Efficiency. Frost layers. Simulation.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras Latinas

A	Área de contato dos embriões com a superfície
Bi	Número de Biot
Bim	Número de Biot para transferência de massa
cp	Calor específico a pressão constante
D	Coefficiente de difusão do vapor d'água no ar
F	Fator de Difusão
Fo	Número de Fourier
h_c	Coefficiente convectivo de transferência de calor
h_m	Coefficiente convectivo de transferência de massa
h_{sg}	Entalpia de sublimação
k	Condutividade Térmica
ℓ	Comprimento de escala da área de nucleação
\dot{m}	Taxa de mudança de fase do vapor de água
Nu	Número de Nusselt
P	Pressão
Q	Fluxo de calor
R_a	Constante dos gases para o ar
Re_x	Número de Reynolds
R_v	Constante dos gases para o vapor
T	Temperatura
t	Tempo

v, u	Velocidade do ar
w	Umidade relativa do ar
\varnothing	Umidade absoluta do ar

Letras Gregas

β	Fase Sólida
γ	Fase Gás
δ	Espessura do gelo poroso
ε	Fração Volumétrica
θ	Ângulo de contato de superfície
φ	Termo Fonte
ρ	Massa Específica
μ	Viscosidade Dinâmica
ν	Viscosidade Cinemática
∂	Derivada parcial
σ	Energia Interfacial

Subscritos

a	Ar
c	Frio
f	<i>Frost</i>
S	Superfície da camada de gelo poroso
tp	Ponto triplo
tr	Tempo de transição

0 Referencial inicial

∞ Ambiente

Superescritos

' Taxa

* Dimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVOS GERAIS	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	JUSTIFICATIVA	15
4	REVISÃO DA LITERATURA	16
4.1	DIFERENÇA ENTRE GELO E GELO POROSO	16
4.2	ESTÁGIOS DE FORMAÇÃO DO GELO POROSO	18
4.2.1	Período de Crescimento de Cristais	19
4.2.2	Período De Crescimento Da Camada De Gelo Poroso	19
4.2.3	Período De Crescimento Intenso Da Camada De Gelo Poroso	20
4.3	TIPOS DE CRISTAIS DE GELO.....	20
4.4	PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DO GELO POROSO	22
5	METODOLOGIA	25
6	MÉTODOS DE MINIMIZAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GELO POROSO	26
7	MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO	30
7.1	MODELAGEM DO PRIMEIRO ESTÁGIO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO	33
7.1.1	Equações Governantes	33
7.1.1.1	Condições de Contorno	35
7.1.1.2	Equações Governantes Adimensionais	36
7.1.2	Equações de Acoplamento Entre os Dois Estágios	38
7.2	MODELAGEM DO SEGUNDO ESTÁGIO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO	39
7.2.1	Equações Governantes	40
7.2.2	Equações Governantes Dimensionais.....	40

7.2.2.1 Condições de Contorno	41
7.2.3 Equações Governantes Adimensionais.....	42
7.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES	45
7.4 ANÁLISE NUMÉRICA	50
7.4.1 Análise Numérica do Primeiro Estágio	50
7.4.1.1 Discretização das Equações Governantes do Primeiro Estágio	51
7.4.2 Análise Numérica do Segundo Estágio	51
7.4.2.1 Discretização das Equações Governantes do Segundo Estágio	52
7.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO	55
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
8.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS	56
8.1.1 Simulação para Superfícies revestidas	57
8.1.1.1 Superfície revestida com cera	57
8.1.1.2 Superfície revestida com Sílica	62
8.1.2 Simulação para Superfícies Usuais	64
8.1.3 Comparativo dos Resultados	66
8.2 CONVALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	69
9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	70
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O gelo poroso (frost) é um fenômeno físico que ocorre quando o fluxo da mistura formada por ar e vapor d'água entra em contato com superfícies que apresentam temperaturas abaixo de 0°C. Tal fenômeno é comumente encontrado nas mais diversas aplicações sejam estas industriais, comerciais ou até mesmo residenciais.

O estudo do processo de formação do gelo poroso apresenta várias complexidades devido aos mais diversos parâmetros ambientais envolvidos na formação das camadas de gelo. Parâmetros estes como umidade relativa do ar, temperatura do ambiente, temperatura da superfície, material da superfície de deposição, etc. O processo de formação da camada de gelo é complexo em ser modelado, devido as diversas condições ambientais envolvidas no fenômeno. Uma das principais características da formação da camada de gelo poroso é a ocorrência simultânea dos processos de transferência de calor e massa.

A presença deste fenômeno físico em aplicações industriais como em sistemas de refrigeração, aviação, evaporadores dentre outras é considerado um problema de relevância econômica, energética e até mesmo de segurança, quando o mesmo ocorre em aeronaves ou em rotores de compressores. Evaporadores nada mais são que trocadores de calor, cuja sua função é transferir o calor do ambiente refrigerado para o fluido refrigerante que está circulando, dessa forma os evaporadores atuam na manutenção da temperatura adequada para o ambiente refrigerado. Evitar o acúmulo de gelo nos evaporadores é essencial para o bom funcionamento do sistema. Segundo Wu et al. (2007) a camada de *frost* (*gelo poroso*) em evaporadores não somente aumenta a resistência térmica, como também reduz o fluxo de ar causando uma queda na performance dos evaporadores.

A camada de gelo poroso formada sobre um trocador de calor é um problema para a eficiência térmica do sistema, pois este atua como um isolante térmico, reduzindo drasticamente a taxa de transferência de calor no sistema de refrigeração. Fato este que é agravado ao passar do tempo, pois a espessura da camada de gelo aumenta e com isso o fluxo de ar diminui, de acordo com Liu (2006) em alguns casos

excepcionais a camada aumenta tanto ao ponto de bloquear completamente o fluxo de ar no trocador de calor.

O acúmulo de gelo em sistemas de refrigeração proporciona uma maior demanda energética do sistema tornando assim importante a sua retirada periódica, o que causa maiores gastos com o processo de degelo ou *defrost*.

Devido a transferência de massa, a fronteira do sistema cresce ao passar do tempo, e com o seu crescimento sua geometria permanece em um estado de constante alteração, influenciando diretamente nas condições de escoamento e de transferência de calor, mencionadas anteriormente. Todas estas considerações tornam a grande parcela dos estudos que envolvem a formação do gelo poroso serem baseados em conhecimentos experimentais.

Segundo Da Silva (2014) para uma avaliação completa do crescimento de gelo poroso é necessário a utilização de modelos formulados a partir de equações que governam os fenômenos de transferência de calor e massa aliado aos fatores operacionais e geométricos envolvidos no processo, obtendo assim melhores resultados e estimativas sobre o processo de crescimento do gelo poroso.

Segundo Tahavvor el al. (2014) com a utilização das funções da matemática convencional não é possível analisar simultaneamente todos os efeitos dos parâmetros envolvidos no crescimento das camadas de gelo poroso; o autor propõe como saída para essa barreira a utilização de novas abordagens matemáticas como a de geometria de fractais.

Este trabalho aborda o estudo da formação do gelo poroso em evaporadores, bem como estudar a minimização deste problema, analisando diferentes tipos de revestimentos para a superfície do mesmo. Visando proporcionar uma redução significativa nos gastos energéticos causados pelo degelo. Além de apresentar uma análise sobre os fatores que influenciam a formação de gelo poroso em evaporadores, baseada em simulações numéricas do escoamento do ar úmido sobre a superfície resfriada do evaporador, o presente trabalho também proporciona uma comparação entre os resultados obtidos para os diferentes tipos de revestimentos utilizados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é analisar a influência dos revestimentos na redução da camada de gelo poroso formada sobre a superfície de evaporadores, entendendo o processo de formação e analisando parâmetros ambientais que influenciam esse fenômeno, evitando assim a necessidade de realizar o processo de degelo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter embasamento teórico da formação de gelo poroso em evaporadores com diferentes arranjos e materiais na superfície;
- Investigar os parâmetros que influenciam a formação de gelo poroso;
- Investigar diferentes tipos de materiais que podem minimizar o crescimento da camada de gelo poroso;
- Modelar matematicamente o fenômeno de formação do gelo poroso;
- Implementar o modelo matemático para o crescimento do gelo poroso em software computacional;
- Analisar os resultados obtidos.

3 JUSTIFICATIVA

Todo sistema de refrigeração é prejudicado se o evaporador não funciona corretamente, evitar a formação do acúmulo de gelo no evaporador é essencial para o bom funcionamento de qualquer sistema de refrigeração. Novos programas em eficiência energética estão cada vez mais rígidos quanto à utilização eficiente das fontes de energia, com ações que obrigam os fabricantes a desenvolverem novos produtos com alto desempenho e baixa demanda energética.

O acúmulo de gelo poroso provoca uma diminuição no desempenho de muitos equipamentos envolvidos no processo de refrigeração, reduzindo sua eficiência gerando gastos energéticos que poderiam ser evitados, além de danificar os equipamentos do sistema de refrigeração. Portanto esse problema tem como consequência direta o surgimento de prejuízos com as paradas periódicas com manutenção, que estes equipamentos necessitam, para remoção do gelo.

Um maior conhecimento sobre a formação de gelo poroso aliado a um entendimento de como evitar esse fenômeno pode ajudar no aumento da eficiência de sistemas de refrigeração. Portanto entende-se que o tema abordado neste trabalho é relevante para a indústria e a comunidade científica.

4 REVISÃO DA LITERATURA

O seguinte capítulo tem a finalidade de aprofundar os conhecimentos sobre a formação do gelo poroso, e também apresentar métodos que possam evitar formação deste fenômeno físico na superfície de evaporadores. Na seção 4.1 os conceitos de gelo e gelo poroso são comparados, posteriormente na seção 4.2 são detalhadas as fases da formação do gelo poroso, na próxima seção 4.3 são apresentadas as possíveis geometrias que os cristais de gelo podem assumir e por último na seção 4.4 são levantados todos os parâmetros, conhecidos, envolvidos na formação do gelo poroso.

4.1 DIFERENÇA ENTRE GELO E GELO POROSO

Os conceitos de gelo e o gelo poroso não se referem à mesma substância, pois os mesmos possuem diferentes estruturas e propriedades físicas. O gelo poroso é definido como a mistura congelada, composta por ar e vapor de água que tem como consequência a formação de um meio poroso, enquanto o gelo é definido como o estado sólido da água. A diferença visual entre os mesmos pode ser visualizada na figura 1 onde (a) ilustra o aspecto visual do gelo poroso e (b) ilustra o aspecto visual do gelo.

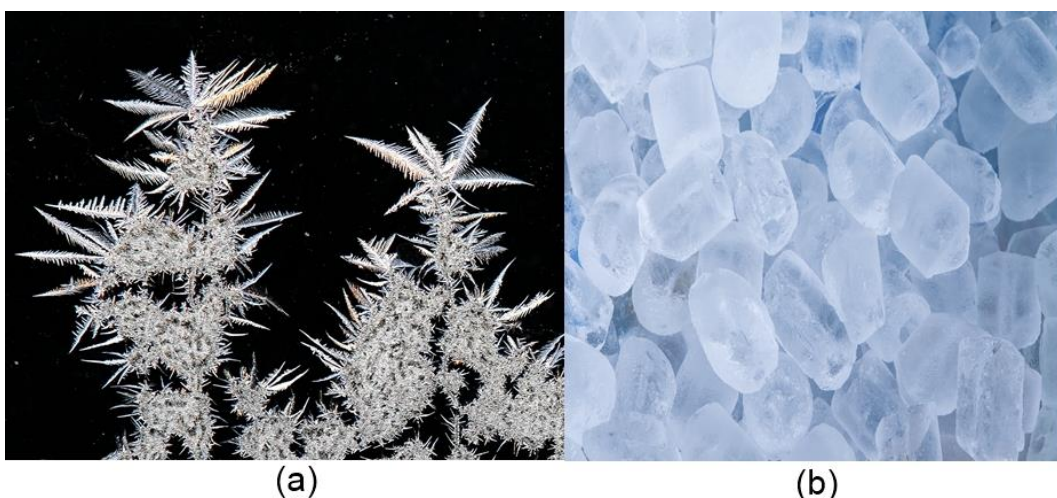


Figura 1 – Diferenciação visual entre o gelo e o gelo poroso.

Um maior entendimento sobre as diferenças de tais conceitos pode ser adquirido a partir da análise do diagrama de mudança de fase da água que pode ser visto na figura 2.

O gelo é o resultado da mudança de fase representada pelo trajeto I, onde a água faz a transição direta do estado líquido para o estado sólido, a estrutura do gelo geralmente é maciça e translúcida possibilitando, quase sempre, enxergar através do mesmo. A mudança de fase representada pelo trajeto II possibilita o fenômeno da formação de gelo poroso, onde o vapor d'água passa diretamente para o estado sólido, criando assim sua estrutura porosa formada por cristais irregulares de gelo.

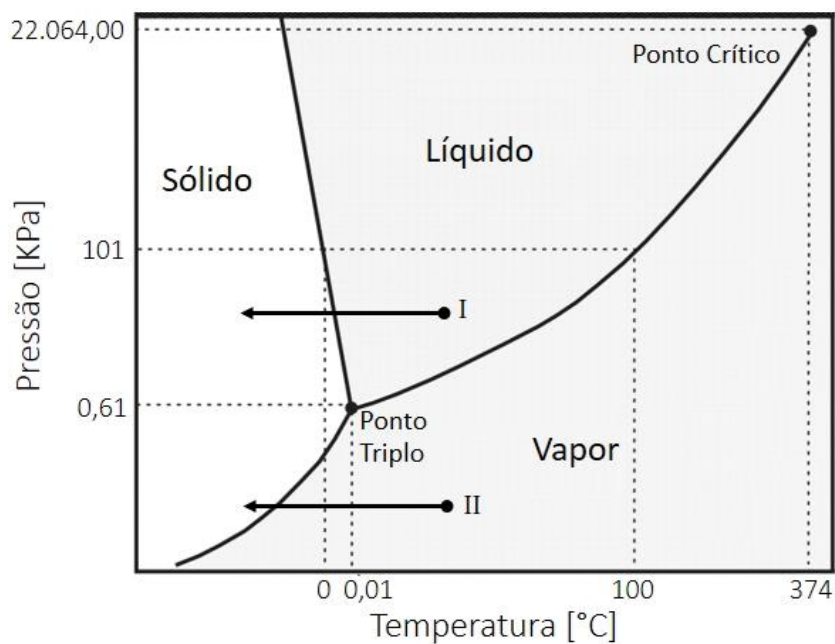


Figura 2 – Diagrama de mudança de fase da água.

Como mencionado anteriormente o gelo e o gelo poroso, possuem propriedades físicas diferentes principalmente quando se analisa o coeficiente de condutividade térmica (k). A diferença da condutividade térmica pode ser visualizada na tabela 1 onde também apresenta a massa específica (ρ) para os dois objetos de estudo dessa seção.

Tabela 1 – Coeficiente de condutividade térmica e massa específica do gelo e do gelo poroso

Grandeza	Gelo	<i>Frost</i>
$k [Wm^{-1}K^{-1}]$	2,1	0,2
$\rho [Kgm^{-3}]$	917	211

Fonte: Da Silva, 2014.

O Gelo possui uma condutividade térmica aproximadamente dez vezes superior que a do *frost*, no entanto o mesmo possui uma densidade aproximadamente cinco vezes menor que o gelo. A partir dos dados disponíveis na tabela 1 é possível constatar que a massa de gelo poroso ocupa um maior volume comparado à mesma quantidade de massa de gelo, dessa forma o gelo poroso proporciona uma redução da área de passagem do ar.

Em consequência das propriedades apresentadas na tabela 1 os processos de transferência de calor e massa, na camada de gelo poroso, dependem diretamente da porosidade (ε) do meio, de acordo com Junior (2013) uma menor porosidade acarreta em uma menor taxa de transferência de massa e conseqüentemente em uma menor taxa de transferência de calor, o contrário para esse cenário também é válido.

4.2 ESTÁGIOS DE FORMAÇÃO DO GELO POROSO

O fenômeno de formação de gelo poroso é de alta complexidade devido aos diversos parâmetros ambientais envolvidos, vários estudos já foram conduzidos na tentativa de compreender totalmente esse processo de formação. O fenômeno de formação pode ser dividido em três estágios que serão apresentados a seguir e também podem ser visualizados na figura 3. (CHENG e SEKI, 1991, p. 454)

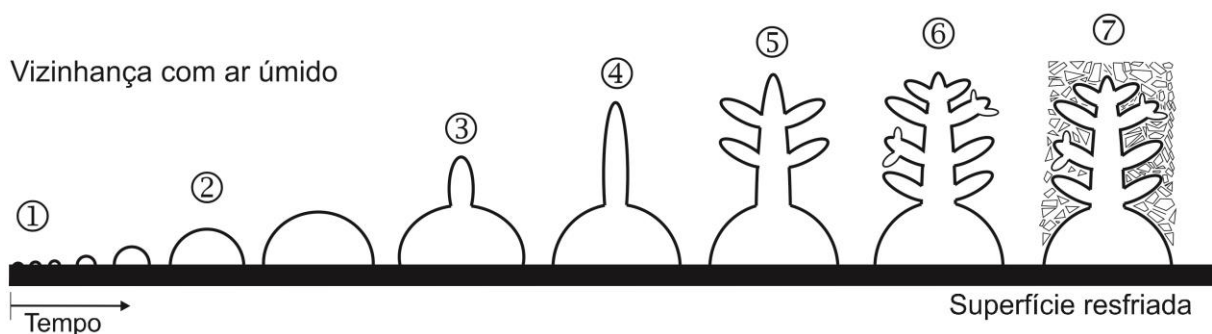


Figura 3 – Estágios de formação do gelo poroso.

Fonte: Adaptado de Tao et al. (1992).

4.2.1 Período de Crescimento de Cristais

O primeiro estágio de formação também é conhecido como período de nucleação (1), pois é caracterizado pelo surgimento de aglomerados de moléculas de vapor d'água, que estão relativamente distantes uma das outras, e o posterior congelamento das mesmas. Durante essa fase, que é de curta duração, tem-se como consequência um crescimento considerável na taxa de transferência de calor, por motivos que serão apresentados posteriormente. (CHENG e SEKI, 1991, p. 454)

Em seguida mais cristais de gelo se formam sobre estes núcleos (2), que são caracterizados por um crescimento na direção vertical, à uma taxa praticamente constante, enquanto isso os mesmos cristais de gelo também crescem na direção lateral. Este estágio chega ao fim quando é formada uma camada fina e áspera de gelo poroso sobre a superfície de deposição. (CHENG e SEKI, 1991, p. 454)

4.2.2 Período de Crescimento da Camada de Gelo Poroso

A partir da camada fina e áspera de gelo poroso formada no estágio do período de crescimento de cristais o processo de deposição de gelo sobre a superfície continua até que a energia de superfície dos núcleos de gelo não suporte mais a adesão de novas moléculas, assim surgindo novas nucleações (3 e 4) sobre a camada formada anteriormente. Essas novas adesões continuam crescendo e paralelamente a isso novas ramificações surgem sobre as mesmas, pois é cada vez maior a demanda de energia de superfície para sustentar sua estrutura. (CHENG e SEKI, 1991, p. 454)

Este estágio continua ao passo que os cristais vão se tornando cada vez mais ramificados (5 e 6), formando uma camada porosa e uniforme devido as ramificações presentes nos cristais de gelo. A medida que transferência de massa se intensifica, enquanto os poros são preenchidos com ar úmido, a taxa de transferência de calor cai proporcionalmente à essa intensificação da deposição, dessa forma a camada de gelo poroso começa a se comportar como um isolante térmico, dificultando a transferência de calor neste meio. (CHENG e SEKI, 1991, p. 454)

4.2.3 Período de Crescimento Intenso da Camada de Gelo Poroso

Quando a temperatura da superfície do gelo poroso se aproxima da temperatura do ponto triplo da água, o estágio de crescimento intenso se inicia. Neste estágio o vapor d'água não pode ser mais cristalizado, devido a energia de superfície disponível não proporcionar novas ramificações. Este vapor começa a se condensar sobre a camada do gelo poroso e na medida que se concentra sobre a camada o mesmo é absorvido pela a estrutura porosa presente, posteriormente esse vapor d'água se congela formando uma camada de gelo (7). Esse congelamento do vapor causa um aumento drástico na densidade da camada e uma redução na resistência térmica. (CHENG e SEKI, 1991, p. 455)

Portanto neste último estágio um processo cíclico de fusão, congelamento e crescimento irá promover de forma acelerada o crescimento da camada de gelo poroso. O tempo requerido para que cada etapa ocorra depende das condições do ambiente onde uma maior taxa de deposição acarretara num menor tempo para cada estágio.

A divisão dos estágios de crescimento apresentada neste trabalho é uma abordagem generalizada da formação do gelo poroso, onde uma abordagem individual para cada situação é mais efetiva, pois deve-se considerar os parâmetros físicos envolvidos como geometria da superfície de deposição além das variáveis ambientais já mencionadas anteriormente. (CHENG e SEKI, 1991, p. 455)

4.3 TIPOS DE CRISTAIS DE GELO

Para um ponto de vista macroscópico as fases de formação de gelo poroso podem ser divididas em três estágios, apresentados nas seções anteriores, no entanto considerando um ponto de vista microscópico os estágios desse fenômeno são diferentes, pois consideram os vários parâmetros ambientais envolvidos nesse processo.

Segundo Kobayashi (1958) a forma que o cristal de gelo irá apresentar depende diretamente da temperatura do ambiente, além disso considera-se que a direção preferencial de crescimento do cristal de gelo é dependente da densidade do vapor da água. As principais geometrias de cristais de gelo podem ser visualizadas na figura 4.

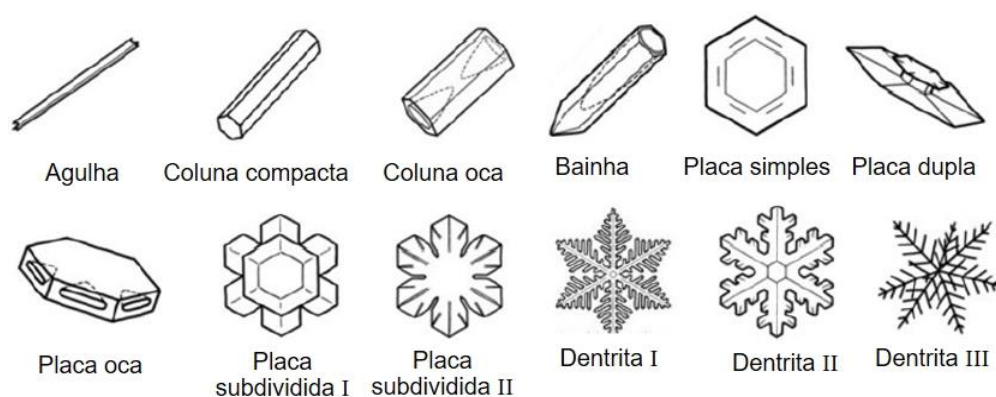


Figura 4 – Diferentes formas dos cristais de gelo poroso.

Fonte: Adaptado de Kobayashi (1958).

A tabela 2 apresenta uma classificação das possíveis formas que o cristal de gelo poroso pode assumir de acordo com a sua temperatura de superfície.

Tabela 2 – Classificação das formas possíveis para o cristal de gelo.

Faixa de temperatura do ambiente	Direção preferencial de nucleação.	Forma do cristal
Abaixo de -4°C	Lateral	Placa
Entre -4°C e -10°C	Vertical	Bainha, Agulha, Colunas
Entre -10°C e -20°C	Vertical	Placas subdivididas, Dendrica,
Abaixo de -20°C	Lateral	Colunas ocas, Colunas compactas

Fonte: Adaptado de Kobayashi (1958).

Um estudo mais recente realizado por Zhang et al. (2016) propõe que a fase de nucleação de gelo poroso sobre uma superfície fria é influenciada pela presença de um campo elétrico, alterando assim a forma dos cristais de gelo poroso. Sendo o processo de nucleação intensificado ou suprimido de acordo com a frequência do campo elétrico atuante sobre a região de nucleação.

4.4 PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DO GELO POROSO

Estudos analíticos e experimentais, já foram realizados na tentativa de entender o fenômeno de formação de gelo poroso bem como a influência dos parâmetros que envolvidos neste fenômeno. A seguir serão descritos os principais fatores envolvidos na formação do gelo poroso.

Os principais parâmetros envolvidos na formação do gelo poroso segundo a literatura são:

- T_{∞} : Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$);
- T_c : Temperatura da superfície resfriada ($^{\circ}\text{C}$);
- w : Umidade absoluta do ar (%);
- ϕ : Umidade relativa do ar (%);
- δ : Espessura do cristal de gelo (mm);
- θ : Ângulo de contato de superfície ($^{\circ}$);
- V_a : Velocidade do ar (m/s);
- ρ : Massa específica do meio poroso (Kg/m^3);
- ε : Porosidade das camadas de gelo (%);

Outros parâmetros que estão relacionados ao estágio de nucleação são listados a seguir:

- γ : Energia de superfície (J/m^2);
- r_c : Raio crítico do embrião de gelo com a superfície (mm);
- G : Energia livre de Gibbs (kg/m^3);
- σ : Energia interfacial (KJ/m^2);
- δ_f : Altura dos embriões de água (mm);
- A_c : Área de contato dos embriões com a superfície (mm^2);
- V_G : Volume de água na gotícula (mm^3);
- t_{tr1} : Tempo de espera até o congelamento dos embriões começar (s).

Liu et al. (2008) consideram que o processo de deposição de gelo se inicia a partir da condensação de vapor sobre uma superfície fria, pois a partir da condensação ocorre o posterior congelamento das mesmas iniciando-se o processo de deposição, propondo que a transição de fase da água pode ocorrer apenas se a energia livre de Gibbs diminuir, caso a energia livre de Gibbs seja maior que o raio crítico da gotícula a mesma diminui à medida que as gotículas de água crescem.

Huang et al. (2012) investigaram experimentalmente o efeito do ângulo de contato na gotícula de água no estágio de nucleação constatando que o ângulo de contato tem uma forte influência na forma como os cristais de gelo crescem e no tempo para que o congelamento das gotículas ocorra. Além disso constata-se que quanto maior for o ângulo de contato maior será o tempo necessário para congelar a gotícula de água. Uma parcela dos resultados obtidos pode ser vista na figura 5.

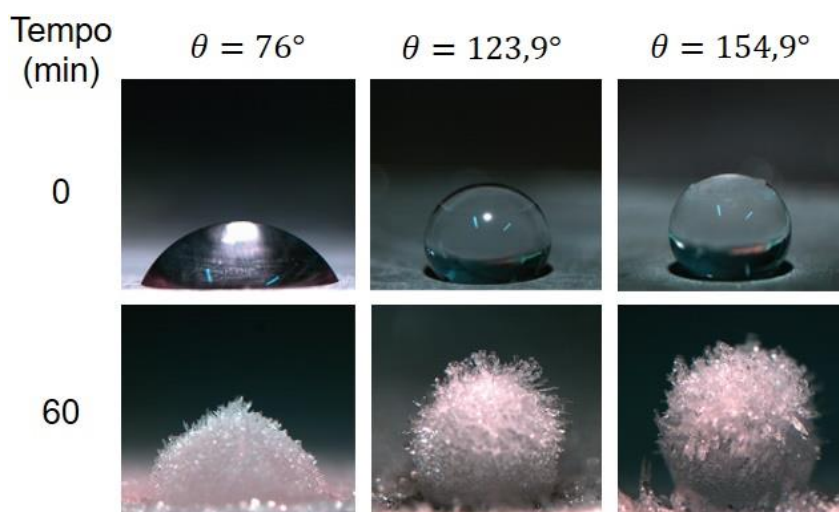


Figura 5 – Influência do ângulo de contato no crescimento dos cristais de gelo.

Fonte: Adaptado de Huang et al. (2012).

O ângulo de contato é determinado pela condensação de vapor sobre a superfície fria e varia de acordo com o material que constitui a superfície de deposição. Wang et al. (2016) descrevem o ângulo de contato como um parâmetro macroscópico que determina a microestrutura que o gelo irá assumir na camada porosa.

Liu et al. (2007) citam que alterações na energia de superfície da placa resfriada é uma maneira interessante de se modificar as propriedades do gelo poroso e alterar a formação dos cristais de gelo.

Segundo Na e Webb. (2004) a taxa de transferência de massa do vapor d'água é o parâmetro mais importante para a modelagem da formação do gelo poroso, pois esse parâmetro afeta diretamente a taxa de crescimento dos cristais de gelo. Essa afirmação coincide indiretamente com o trabalho de Liu et al. (2008) que afirma que o ângulo de contato afeta o tempo necessário para a fase de nucleação dos cristais começar, ou seja afeta a velocidade do crescimento.

Os estudos realizados por Na e Webb (2003) consideram que a mistura de ar úmido sobre a superfície de gelo poroso é saturada, quando atinge a temperatura da superfície fria, e que para o processo de nucleação ocorra as gotículas de água devem superar a barreira de energia de Gibbs, que pode ser obtido pela supersaturação da mudança de fase da água. A energia livre de Gibbs é influenciada pela energia de superfície, a qual está relacionada com o ângulo de contato. Já os revestimentos ou a rugosidade da superfície podem alterar a energia de superfície sugerindo-se a possibilidade do desenvolvimento de superfícies no retardamento do processo de formação de gelo poroso.

Liu et al. (2016) investigaram experimentalmente a formação de gelo poroso sobre uma placa de cobre em temperaturas criogênicas, por volta de -165°C . O argumento dos autores para realizar testes em temperaturas criogênicas se baseou no fato de que a maioria dos estudos realizados sobre a ocorrência desse fenômeno são baseados em temperaturas negativas ordinárias, pouco abaixo dos -10°C . Os autores constataram que em temperaturas criogênicas a formação de gelo poroso é intensificada e as gotículas de água ficam mais distantes umas das outras na superfície de deposição, onde a deposição do gelo se concentrou em alguns pontos distintos da placa fria, não ocorrendo de maneira uniforme. O trabalho de Liu et al. (2016) é bastante importante, pois evidencia a influência da temperatura da superfície fria (T_c) nesse fenômeno e deixa o questionamento se fatores como umidade relativa do ar ϕ e temperatura ambiente (T_{∞}), quando elevados aos casos extremos, também possam apresentar efeitos peculiares na camada de gelo formada.

5 METODOLOGIA

O trabalho apresentado neste documento foi desenvolvido de acordo com as seguintes etapas descritas a seguir:

- Adaptar o modelo matemático para o processo de formação do gelo poroso, sobre superfície planas, desenvolvido por Salinas (1996) para placas composta de diferentes materiais;
- Implementar a modelagem matemática desenvolvida no software Wolfram Mathematica 11;
- Validar o modelo numérico a partir de dados disponíveis na literatura;
- Investigar a influência dos parâmetros ambientais na formação do Gelo Poroso. Nesta etapa investiga-se a influência da temperatura da superfície (T_c), temperatura ambiente (T_∞), velocidade (v_∞) e umidade do ar w_∞ ;
- Simular o crescimento da camada de gelo poroso para o cobre, alumínio e latão, através de seus respectivos coeficientes de condutividade térmica, e a partir disso simular revestimentos constituídos de cera e sílica como agente minimizador desse fenômeno. Será utilizada, na simulação, temperaturas comerciais de -5°C para a placa fria e de 22°C para o ambiente externo;
- Realizar uma análise da espessura da camada de gelo, temperatura superficial e velocidade de deposição para as diferentes superfícies simuladas;
- Desenvolver as considerações finais sobre esse trabalho e propor sugestões para trabalhos futuros.

6 MÉTODOS DE MINIMIZAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GELO POROSO

O seguinte capítulo tem a finalidade de aprofundar os conhecimentos sobre os métodos de minimização da formação de gelo poroso em superfícies frias. A seguir serão apresentados os estudos, mais relevantes, disponíveis na literatura que investigam novas técnicas para minimizar a formação de gelo poroso.

Kinsara et al. (1997) tentaram reduzir a formação de gelo poroso nos evaporadores por desumidificação do ar a partir de um sistema de desumidificação onde era usada uma substância higroscópica, que tem a capacidade de absorver água, como agente de secagem. No entanto esse sistema pode apresentar um elevado custo para aplicações de menor porte como em refrigeradores comerciais.

Cai et al. (2010) estudaram os efeitos da energia de superfície na mudança de fase do vapor d'água no estágio inicial do crescimento de gelo poroso e realizaram testes em duas superfícies revestidas respectivamente por cobre e cera, constatando que a velocidade na qual ocorre a nucleação está relacionada com o ângulo de superfície. Os núcleos formados na superfície de cera se distribuem de forma mais espaçada entre si, cobrindo menos área, do que os da superfície revestida com cobre. Além disso os cristais de gelo necessitam de mais tempo para aparecer na superfície revestida com cera e sua camada de gelo poroso apresenta baixa densidade e peso quando comparada a superfície revestida com cobre. Finalizando constatou-se que o revestimento de cera não restringe de maneira totalmente efetiva o crescimento de gelo sobre a superfície.

Alguns estudos, que são apresentados a seguir, foram realizados na tentativa de descobrir a influência de campos elétricos na formação dos cristais de gelo. Wang et al. (2004) avaliaram a formação de gelo poroso em duas situações, na presença e na ausência de um campo elétrico, os autores constataram que na presença de um campo elétrico a coluna de gelo cresce no sentido vertical, em direção ao eletrodo que gera o campo, formando uma camada de gelo fina e fraca que pode ser facilmente removida pela influência da gravidade ou pela ação manual. Verificou-se também que a polaridade elétrica do campo é um fator que influencia a espessura da camada de gelo poroso. Para uma polaridade negativa a camada de gelo é mais fina e frágil do que para polaridades positivas.

O resultado do estudo anterior converge com o feito por Ma e Peterson (1995 apud Xiaomin, 2007) que constataram que um campo elétrico pode deixar a camada de gelo poroso com a espessura menor de modo que a mesma pode ser facilmente arrancada manualmente ou removida pelo fluxo de ar. Jung et al. (1998) também indica que a nucleação de gelo é acentuada na presença de um campo elétrico externo, técnica conhecida como congelamento elétrico ou “electrofreezing”.

Tudor e Ohadi (2006) estudaram o efeito de campos elétricos de corrente alternada e frequências fixas sobre o crescimento de gelo poroso, os resultados obtidos por eles mostraram uma redução de 46% na camada de gelo para uma faixa de frequência fixa (370Hz -7,5Hz) e tensão de 7,5Kv.

Entretanto Zhang et al. (2016) não identificaram nenhuma influência direta de campos elétricos na redução de formação de gelo poroso. Os autores investigaram se campos elétricos podem aumentar ou suprimir a nucleação dos cristais de gelo durante a fase de formação. Os resultados obtidos por eles indicam que a nucleação foi intensificada na presença de campos elétricos (abaixo de $10^5 V/m$) indiferente da direção do campo.

Os seguintes pesquisadores apostaram em revestimentos feitos de substâncias hidrofóbicas, que repelem a água, e hidrofílicas, que tem afinidade pela água, como método para evitar a formação de gelo poroso.

Kim et al. (2016) propuseram que uma superfície aletada revestida por substâncias hidrofóbicas e super-hidrofóbicas podem retardar o fenômeno de formação de gelo poroso sobre a superfície resfriada. Esse atraso ocorre devido ao prolongamento do estágio de nucleação dos cristais de gelo, entretanto os dois tipos de revestimentos só são efetivos quando as superfícies estão super-resfriadas entre -20°C e -40°C . Além disso constatou-se que o trocador de calor revestido apresenta melhor resistência térmica do que o não revestido e que o tempo de deposição durante a fase de nucleação é proporcional ao ângulo de contato da superfície com os cristais de gelo.

Okoroafor e Newborough (2000) constataram que superfícies revestidas com substâncias hidrofílicas, de estrutura reticulada, reduziram a taxa de crescimento de gelo poroso entre 10% a 30%. A espessura do revestimento aplicado na superfície está compreendida entre 0,3 a 0,07mm e se torna mais grossa depois que absorve

água, tornando o revestimento não adequado para certas aplicações nas quais as aletas tem espessura média de 0,1 mm.

Segundo Dyke e Betz (2014) os resultados obtidos da redução na taxa de crescimento de gelo poroso a partir da utilização de revestimentos constituídos de substâncias hidrofóbicas ou hidrofílicas podem variar consideravelmente, pois estas substâncias são dependentes de condições operacionais com a rugosidade da superfície. Um novo revestimento constituído da mistura das substâncias hidrofílicas e hidrofóbicas numa espuma de silicone é proposto como a solução desse empecilho.

A proposta de funcionamento para esse revestimento é bastante simples, o vapor d'água irá condensar preferencialmente sobre as áreas hidrofílicas tornando, assim, possível o controle de onde a nucleação irá ocorrer. A partir desse controle é possível determinar o tamanho e forma dos cristais de gelo. Por fim consta-se que essa nova superfície retarda de forma mais eficiente a formação de gelo poroso do que as superfícies revestidas, unicamente, com substâncias hidrofílicas ou hidrofóbicas. (DYKE e BETZ, 2014)

Liu et al. (2006) testaram uma tinta constituída da mistura das substâncias poliméricas e hidrofílicas, na tentativa de retardar a nucleação e minimizar o crescimento dos cristais de gelo sobre a superfície revestida. Metade de uma placa de metal foi revestida com a presente tinta e os autores monitoraram os parâmetros: temperatura da superfície, temperatura do ambiente e umidade relativa do ar. Os resultados obtidos constataram que o revestimento é efetivo em retardar a formação de gelo poroso, onde houve uma redução de 40% na espessura da camada de gelo na parte revestida da placa e também houve um atraso de 15 minutos no início do estágio de nucleação.

Liu et al. (2007) repetiram o experimento anterior e avaliaram a formação de gelo poroso sobre um revestimento de parafina como agente hidrofílico e constataram que as camadas de gelo formadas sobre essa superfície eram "soltas" e fracas facilitando a remoção manual das mesmas.

Kim e Lee (2011) estudaram a influência de revestimentos hidrofóbicos e hidrofílicos na formação de gelo poroso e compara os resultados obtidos com resultados de uma placa sem revestimento. Observa-se que os revestimentos proporcionam um retardamento em ambas superfícies, porem na superfície

hidrofóbica o efeito é insignificante, já na superfície hidrofílica a camada de gelo é mais fina e a densidade é maior estes resultados podem ser vistos na figura 6.

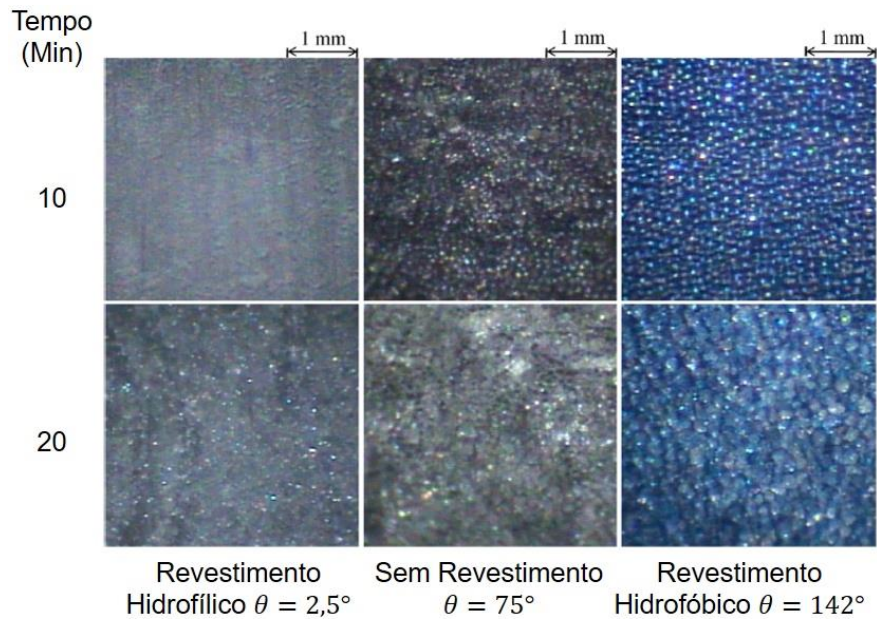


Figura 6 – Formação de gelo poroso em diferentes revestimentos.

Fonte: Adaptado de Kim e Lee (2011).

A figura 7 mostra os diferentes ângulos de contato obtidos para cada tipo de revestimento no trabalho de Kim e Lee.



Figura 7 – Ângulo de contato para diferentes revestimentos.

Fonte: Adaptado de Kim e Lee (2011).

A partir dos estudos apresentados nessa seção pode-se constatar que os mecanismos de minimização, da formação de gelo poroso, ainda não são totalmente conhecidos e que mais tentativas e hipóteses devem ser feitas no intuito de investigar e avaliar quais revestimentos ou métodos são mais efetivos na minimização do fenômeno de formação de gelo poroso em superfícies frias.

7 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO

Neste capítulo será apresentada a formulação matemática do fenômeno de formação de gelo poroso em placa plana, e para isso será utilizado o modelo desenvolvido por Salinas (1996) e Tao et al. (1993) que descreve matematicamente o fenômeno de formação de gelo poroso para placa plana. Como já mencionando no capítulo anterior os estágios de formação de gelo poroso podem ser divididos em três estágios:

1. Período de Crescimento de Cristais.
2. Período de Crescimento da Camada de Gelo Poroso.
3. Período de Crescimento Intenso da Camada de Gelo Poroso.

Porem para a modelagem matemática considera-se apenas as etapas mais importantes na formação do gelo poroso, assim pode-se considerar os dois últimos estágios como apenas um. Tao et al. (1993) subdividiram o processo de formação em dois estágios:

1. Crescimento unidimensional dos cristais.
2. Ramificação dos cristais e formação da camada porosa.

Para a realizar a formulação matemática desse fenômeno utiliza-se um parâmetro, denominado tempo de transição (t_{tr}) que é responsável por estabelecer o início e o final de cada estágio, bem como indicar a transição entre os estágios. Considerando-se o fator tempo de transição o primeiro estágio pode ser subdividido em duas etapas:

- Formação dos Núcleos de Gelo

Esta etapa ocorre desde o instante inicial do fenômeno ($t = 0$) até o momento da formação dos núcleos de gelo ($t = t_{tr1}$), formado pelas gotículas de água sobre a superfície, pode-se representar a duração desta etapa pelo par ($t = 0, t = t_{tr1}$) que são respectivamente os instantes inicial e final dessa fase. Os dados utilizados na formulação dessa fase são obtidos de Tao et al. (1992) apud Salinas (1996).

- Crescimento Unidimensional

Esta etapa ocorre desde o instante final da fase de formação dos núcleos de gelo ($t = t_{tr1}$) até o momento do crescimento dos cristais de gelo na direção perpendicular à superfície ($t = t_{tr2}$). Segundo a Salinas (1996) a identificação do segundo tempo de transição (t_{tr2}) pode causar alguns conflitos na sua determinação devido à grande dificuldade em realizar sua medição. Pode-se representar a duração desta etapa pelo par ($t = t_{tr1}, t = t_{tr2}$).

O segundo estágio é a etapa caracterizada pela ramificação dos cristais onde os cristais vizinhos começam a interagir entre si formando uma rede complexa e porosa e essa fase tem o seu início a partir de t_{tr2} , pode-se representar a duração desta etapa pelo par ($t = t_{tr2}, t = t$).

O termo “tempo de transição” estabelece que ao seu final haja uma transição de um estado para outro, a figura 8 ilustra a relação desse parâmetro no processo de formação de Gelo Poroso. No intervalo ($t = 0, t = t_{tr1}$) tem-se a presença de líquido resfriado sobre a superfície resfriada e a partir de t_{tr1} as gotículas de água passam para a fase cristal sólido até que t_{tr2} seja atingido caracterizando a fase de ramificação dos cristais de gelo.

Os tempos de transição utilizados no presente trabalho foram obtidos de Tao et al. (1992). Salinas (1996) afirma que é necessário que se façam mais estudos que estipulem de maneira mais exata os parâmetros iniciais dos estágios. A figura 9 mostra a variação dos valores de t_{tr1} e t_{tr2} para diversas condições ambientais, como temperatura da superfície e número de Reynolds.

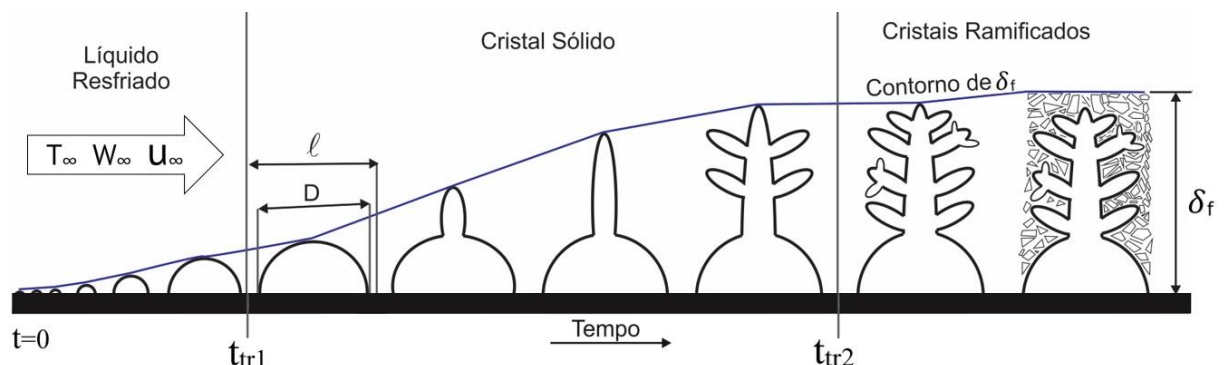


Figura 8 – Processo de formação das camadas de gelo poroso.

Fonte: Adaptado de Tao et al. (1992).

Fazendo uma analogia podemos perceber que os núcleos de gelo formados sobre a superfície fria, neste caso uma placa plana, equivalem à uma floresta de

elementos de gelo sobre os quais tem-se ar úmido escoando, onde o comprimento do núcleo (D) e o espaçamento entre os núcleos (ℓ) são fixos e determinados. Continuando a análise na figura 8 observa-se que a altura dos cristais de gelo (δ_f) varia ao do longo do tempo formando uma curva de contorno de δ_f .

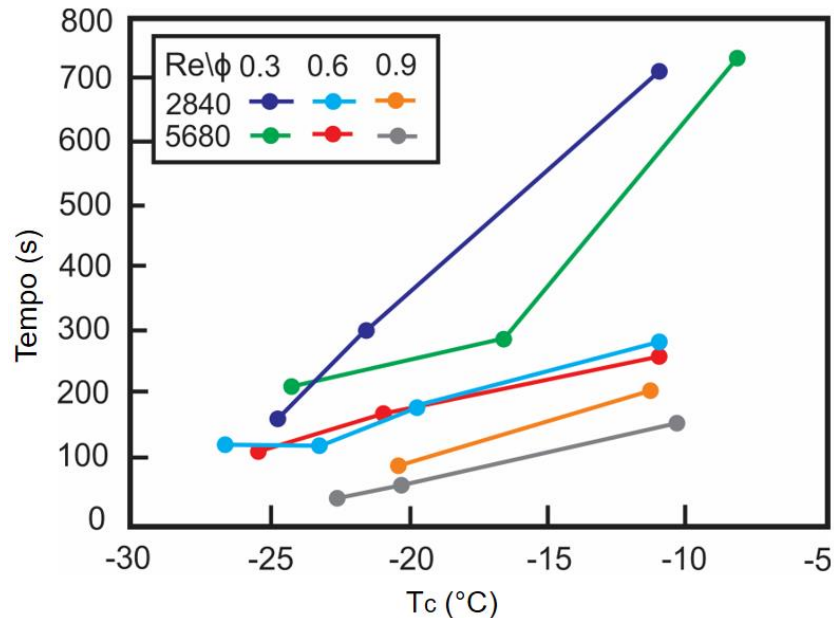


Figura 9 – Tempos de Transição para diversas condições ($t_{tr2} - t_{tr1}$).

Fonte: Adaptado de Tao et al. (1992).

Cada estágio foi modelado matematicamente de maneira diferente, pois a segunda fase, onde acontece a ramificação dos cristais, o gelo é considerado como poroso aumentando a complexidade do modelamento. Para resolver as equações que regem esse estágio foi necessário utilizar a técnica de média volumétrica desenvolvida por Whitaker (1977) para modelagem de processo de secagem em meios porosos, que também é utilizada no estudo de Salinas (1996).

7.1 MODELAGEM DO PRIMEIRO ESTÁGIO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO

Como já mencionado nesse trabalho, no primeiro estágio na formação de Gelo Poroso ocorre à formação de núcleos e crescimento unidimensional na direção perpendicular à superfície. A curta duração deste estágio não diminui a sua importância na modelagem matemática do processo de formação, este estágio é um requisito que deve ser cumprido para que se atinja o segundo estágio. A influência da primeira fase será perceptível somente na segunda fase.

No processo de formação desse fenômeno é conhecido que a transferência de calor e massa acontece de forma simultânea, conseqüentemente as equações governantes para este estágio são obtidas de balanços de calor e massa.

7.1.1 Equações Governantes

Nessa secção realiza-se os balanços de calor e massa para obter as equações governantes que regem este fenômeno.

1) Equação da Energia

Considerando a parcela dr da figura 10 efetua-se o balanço de energia e massa da seguinte maneira, através da equação de energia efetua-se o balanço de calor.

[Variação da energia interna] + [Calor latente devido à mudança de fase na fronteira] = [Fluxo de calor entrando no volume] - [Fluxo de calor saindo do volume]

Equacionando tem-se:

$$\rho_{\beta} c p_{\beta} \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\pi}{4} d^2 dr - \rho_{\beta} h_{sg} \frac{\pi}{4 dt} \left[\left(d + \frac{\partial d}{\partial t} dt \right)^2 - d^2 \right] dr = q_r + q_{conv} - q_{r+dr} \quad \dots \quad (1)$$

Escrevendo os termos de fluxo de calor tem-se:

$$\rho_{\beta} c p_{\beta} \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\pi}{4} d^2 dr - \rho_{\beta} h_{sg} \frac{\pi}{4} 2d \frac{\partial d}{\partial t} dr = k_{\beta} \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) \frac{\partial T}{\partial r} + h_{sg} (\pi d dr) (T_{\gamma} - T_{\beta}) - \left\{ k_{\beta} \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left[k_{\beta} \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) \frac{\partial T}{\partial r} \right] dr \right\} \quad (2)$$

Rearranjando a equação tem-se:

$$\rho_{\beta} c p_{\beta} d \frac{\partial T}{\partial t} = k_{\beta} d \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + 2k_{\beta} \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial d}{\partial r} - 4h_c (T - T_{\gamma}) + 2\rho_{\beta} h_{sg} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (3)$$

II) Equação da Difusão

Através da equação da difusão, pode-se realizar o seguinte balanço de massa:

$$[\text{Variação de massa}] = [\text{Taxa de transferência de massa}]$$

Tem-se:

$$\rho_{\beta} \frac{\pi}{4 dt} \left[\left(d + \frac{\partial d}{\partial t} dt \right)^2 - d^2 \right] dr = h_m (\pi d dr) (w_{\gamma} - w_{\beta}) \quad \therefore \quad (4)$$

Rearranjando a equação tem-se:

$$\rho_{\beta} \frac{\pi}{4} 2d \frac{\partial d}{\partial t} dr = h_m (\pi d dr) (w_{\gamma} - w_{\beta}) \quad \therefore \quad (5)$$

Em que w_{β} indica a concentração avaliada na temperatura T_{β} da fase sólida resultando em:

$$\rho_{\beta} \frac{\partial d}{\partial t} = 2h_m (w_{\gamma} - w_{\beta}) \quad \therefore \quad (6)$$

As equações (3) e (6) representam a modelagem matemática do primeiro estágio do processo de formação de gelo poroso, que é considerado como

unidimensional. Através das condições iniciais e das condições de contorno desse estágio obtém-se as soluções analíticas para as equações (3) e (6).

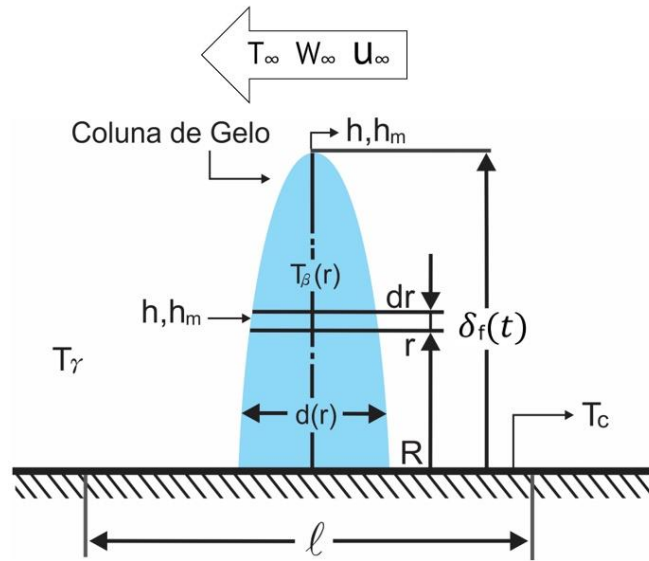


Figura 10 – Modelo unitário do crescimento do cristal de gelo.

7.1.1.1 Condições de Contorno

As equações (3) e (6) estão sujeitas às seguintes condições de contorno:

I) $r = \delta$

Considerando $r = \delta$ na superfície do gelo poroso, enquanto ocorre a transferência de massa, tem-se que o diâmetro da superfície da camada de gelo poroso é igual a d_0 , assim a solução fica:

$$d = d_0 \quad (7)$$

$$\rho_\beta h_{sg} d_0 \frac{\partial \delta}{\partial t} = k_b d_0 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_\delta + h_c d_0 (T_\infty - T_s) \therefore \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_\delta = \frac{h_c}{k_b} (T_\infty - T_s) + \frac{\rho_\beta h_{sg}}{k_b} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (8)$$

$$\rho_\beta h_{sg} d_0 \frac{\partial \delta}{\partial t} = h_m d_0 (w_\infty - w_\delta) \therefore \frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{h_m}{\rho_\beta} (w_\infty - w_\delta) \quad (9)$$

II) $r = 0$

Na superfície da placa plana, o diâmetro da superfície da camada de gelo poroso novamente é considerado como d_0 e a temperatura da superfície do gelo é igual à temperatura de evaporação.

$$T_s = T_e \quad (10)$$

$$\frac{\partial d}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

III) Condições iniciais do fenômeno

$$\delta(t_{tr1}) = \delta_0 \quad (12)$$

$$d(r, t_{tr1}) = d_0 \quad (13)$$

$$T(r, t_{tr1}) = T_C \quad (14)$$

7.1.1.2 Equações Governantes Adimensionais

A seguir será realizada uma adimensionalização das equações governantes utilizando as seguintes variáveis adimensionais:

$$t = \frac{t \cdot a^*}{\delta_0^2} \quad (15)$$

$$a^* = \frac{k_\beta}{\rho_\beta c p_\beta} \quad (16)$$

$$\delta_f^* = \frac{\delta_f}{\delta_0} \quad (17)$$

$$r^* = \frac{r}{\delta_0} \quad (18)$$

$$d^* = \frac{r}{\delta_0} \quad (19)$$

$$\rho_v^* = \frac{\rho_v}{\rho_{of}} \quad (20)$$

$$Bim_\beta^* = \frac{h_m \delta_0 c p_\beta}{k_\beta} \quad (21)$$

$$Bi_\beta^* = \frac{h_c \delta_0}{k_\beta} \quad (22)$$

$$Ja^* = \frac{c p_\beta \Delta t}{h_{sg}} \quad (23)$$

Fazendo as simplificações necessárias, tem-se:

I) Equação da Energia

$$d \frac{\partial T}{\partial t} = d \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + 2 \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial d}{\partial r} - 4Bi_{\beta}^*(T - T_{\gamma}) + \frac{2}{Ja^*} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (24)$$

II) Equação da Difusão

$$\frac{\partial d}{\partial t} = 2Bim_{\beta}^*(w_{\gamma} - w) \quad (25)$$

III) Condições de Contorno

$$\frac{d\delta_f}{dt} = Bim_{\beta}^*(w_{\infty} - w) \quad (26)$$

$$\frac{\partial T(\delta_f, t)}{\partial r} = Bi_{\beta}^*(T_{\infty} - T) + \frac{1}{Ja^*} \frac{d\delta_f}{dt} \quad (27)$$

$$T(\delta_f, t) = T_c \quad (28)$$

$$\frac{\partial d(0, t)}{\partial r} = 0 \quad (29)$$

IV) Condições Iniciais

As condições iniciais são representadas pelas equações (12), (13) e (14).

V) Considerações Importantes

Sendo T_{γ} a temperatura da fase gasosa, compreendido entre a temperatura ambiente e a temperatura da placa fria. T_{γ} pode ser encontrado através da seguinte aproximação:

$$T_{\gamma} = \alpha T_{\infty} + (1 - \alpha) T_c \quad (30)$$

Onde o fator α , pode variar entre 0 para Reynolds muito baixo e 1 para Reynolds muito alto.

Os valores iniciais de d_0 e δ_{f_0} dependem do material da superfície fria, do grau de sub-resfriamento e das condições ambientais. Neste estudo os valores são obtidos de medições experimentais e testes numéricos realizadas por Tao et al. (1992).

Para determinar o coeficiente de transferência de calor Salinas (1996) utiliza a seguinte equação:

$$Nu_x = 0.05Re_x^{0.8}Pr^{1/3} \quad (31)$$

O coeficiente de transferência de massa é encontrado baseado na analogia de transferência de calor e massa.

$$h_m = \frac{h}{cp_\beta^*Le^{1/3}} \quad (32)$$

7.1.2 Equações de Acoplamento Entre os Dois Estágios

Para aplicar o modelamento matemático de um estágio para outro é preciso que se tratem apropriadamente os resultados obtidos no primeiro estágio para serem utilizados no próximo estágio. A forma de tratamento são as seguintes, para cada uma das i subdivisões, segundo Tao et al. (1992) a fração volumétrica $\epsilon_{\beta i}$ é determinada por:

$$\epsilon_{\beta i} = \frac{\pi d_i^2}{4l^2} \quad (33)$$

E a temperatura T_i pode ser determinada utilizando a equação:

$$T_i = \epsilon T_{\beta i} + (1 - \epsilon_{\beta i})T_\gamma \quad (34)$$

Os valores de ρ_{fi} e cp_{fi} são encontrados como função de $\epsilon_{\beta i}$ e T_i no seguinte estágio.

7.2 MODELAGEM DO SEGUNDO ESTÁGIO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO

Para o modelamento desta etapa utiliza-se o modelo para meio poroso desenvolvido por Whitaker (1977), já mencionado anteriormente, baseado na Média Volumétrica Local. A formulação matemática do fenômeno de formação de gelo poroso no segundo estágio é desenvolvida a partir das equações básicas que regem o fenômeno de transporte de calor e massa. Este modelo já foi utilizado por Tao et al. (1993), Salinas (1996) e Da Silva (2014) que utilizaram este modelo completo para meio poroso no estágio final evitando assim simplificações. O modelamento matemático neste estágio é baseado nas restrições e hipóteses mencionadas abaixo:

Restrições:

1. Equilíbrio termodinâmico entre a fase sólida (β_e) e líquida ($T_{fasesólida} = T_{faselíquida}$);
2. Processo de difusão mais significativo que o processo convectivo no meio poroso;
3. Entalpia independente da pressão, $h = h(T)$ para as fases $\beta(sólido)$ e $\gamma(gasoso)$;
4. Cp das fases são constantes, $h = cp * T + C$ para as fases $\beta(sólido)$ e $\gamma(gasoso)$;
5. Condutividade térmica constante para as fases $\beta(sólido)$ e $\gamma(gasoso)$;
6. A fase $\beta(sólido)$ só tem uma componente;
7. Não ocorre reação química na fase $\gamma(gasoso)$;
8. Trabalho de compressão e dissipação para as fases $\beta(sólido)$ e $\gamma(gasoso)$ desprezíveis;
9. Sem termo fonte $\varphi = 0$.

Hipóteses:

1. Sistema sólido - gás em equilíbrio local;
2. Efeitos convectivos dentro da camada porosa são desprezados;
3. Transferência de calor e de massa ocorre de maneira unidimensional;
4. Pressão interna do meio poroso é uniforme.

7.2.1 Equações Governantes

As equações governantes para as fases β (sólido) e γ (gasoso), que serão apresentadas nos próximos tópicos, foram desenvolvidas por Salinas (1996). Todas as equações governantes foram formuladas para um volume elementar, que pode ser visualizado na figura 11.

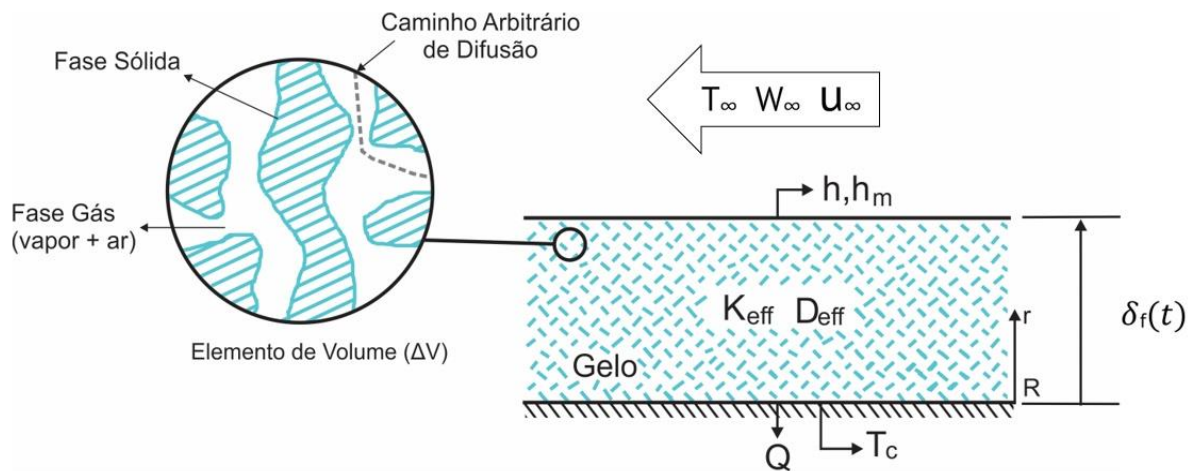


Figura 11 – Elemento de Volume utilizado no modelo.

Fonte: Adaptado de Tao et al. (1992).

Especificando um elemento de volume ΔV dentro do meio poroso conforme mostra a figura 11, pode se obter as equações (35), (36) e (37) que serão apresentadas logo a seguir.

7.2.2 Equações Governantes Dimensionais

I) Balanço de Energia

$$\rho_{\beta} c p_f \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{m} h_{sg} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (35)$$

II) Equação da continuidade da fase gelo β

Considerando meio poroso sob a hipótese da presença de ar saturado tem-se:

$$\frac{\partial \varepsilon_{\beta}}{\partial t} = \dot{m} = w - w_{sat} \quad (36)$$

III) Equação de difusão da fase gás γ

Considerando meio poroso sob a hipótese da presença de ar saturado tem-se:

$$\frac{\partial \varepsilon_{\gamma}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (37)$$

As equações (35), (36) e (37) correspondem ao modelo do segundo estágio do processo de formação de gelo poroso.

7.2.2.1 Condições de Contorno

Através das condições e de contorno para esse estágio se obtém a resolução das equações (35), (36) e (37). As condições iniciais para esse estágio são as mesmas apresentadas no primeiro estágio.

I) Na superfície da camada de gelo

Na superfície da camada de gelo, as condições de fronteira móvel em $r = \delta$ são expressas como:

$$h_m(w_{\infty} - w_{\delta}) = D_{ef,\delta} \frac{\partial w}{\partial r} + \rho_{f,\delta} \quad (38)$$

$$h_c(T_{\infty} - T_s) = k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} - \rho_{f,s} h_{sg} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (39)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{\beta}(r = \delta_{f,t})}{\partial r} \quad (40)$$

II) Na superfície da Placa Plana

Na superfície da placa em $r = 0$.

$$T_s = T_e \quad (41)$$

$$\frac{\partial \epsilon_d}{\partial r} = 0 \quad (42)$$

III) Condições Iniciais

As condições iniciais são obtidas das equações de acoplamento utilizando os resultados do primeiro estágio.

7.2.3 Equações Governantes Adimensionais

As equações que modelam o segundo estágio, são adimensionalizadas utilizando as variáveis a seguir:

I) Equação da Energia

$$t^* = \frac{t \alpha_{oeff}}{\delta_0^2} \quad (43)$$

$$r^* = \frac{r}{\delta_0} \quad (44)$$

$$T^* = \frac{T}{T_\infty - T_c} = \frac{T}{\Delta T} \quad (45)$$

$$\partial r = \delta_0^* \partial r^* \quad (46)$$

$$\partial T = \Delta T^* \partial T^* \quad (47)$$

$$\alpha_{oeff}^* = \frac{k_{oeff}^*}{\rho_{fo}^* c p_{fo}^*} \quad (48)$$

$$\partial t^* = \frac{\delta_0^{*2}}{\alpha_{oeff}^*} \partial t \quad (49)$$

Substituindo Δt^* , Δr^* , ΔT^* , e dividindo por ρ_{fo}^* , $c p_{fo}^*$ na equação (35), tem-se que:

$$\frac{\rho_f^* \rho_{fo}^*}{\rho_{fo}^* c p_{fo}^*} - \frac{\Delta T^* \partial T^*}{\frac{\delta_0^{*2}}{\alpha_{oeff}^*} \partial t} + \frac{\Delta h_{sg}^* \dot{m}}{\rho_{fo}^* c p_{fo}^*} = \frac{1}{\rho_{fo}^* c p_{fo}^*} \frac{\partial}{\delta_0^{*2} \partial r^*} \left(k_{oeff}^* \Delta T^* \frac{\Delta T^*}{\partial r^*} \right) \quad (50)$$

Conhecendo que:

$$\rho_f = \frac{\rho_f^*}{\rho_{fo}^*} \quad (51)$$

$$cp_f = \frac{cp_f^*}{cp_{fo}^*} \quad (52)$$

$$k_{eff} = \frac{k_{eff}^*}{k_{oeff}^*} \quad (53)$$

$$P_2 = \frac{\Delta h_{sg}^*}{cp_{fo}^* \Delta T^*} \quad (54)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}^* \delta_0^{*2}}{\rho_{fo}^* \alpha_{oeff}^*} \quad (55)$$

Substituindo os parâmetros em (50) e desenvolvendo obtém-se:

$$\rho_f cp_f \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\Delta h_{sg}^* \delta_0^{*2} \dot{m}}{\rho_{fo}^* cp_{fo}^* \Delta T^* \alpha_{oeff}^*} = \frac{\delta_0^{*2}}{\rho_{fo}^* cp_{fo}^* \Delta T^* \alpha_{oeff}^*} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff}^* \Delta T^* \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (56)$$

$$\rho_f cp_f \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\Delta h_{sg}^* \delta_0^{*2} \dot{m}}{\rho_{fo}^* cp_{fo}^* \Delta T^* \alpha_{oeff}^*} = \frac{1}{\rho_{fo}^* cp_{fo}^* k_{oeff}^* / \rho_{fo}^* cp_{fo}^*} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff}^* \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (57)$$

Com algumas simplificações obtém-se:

$$\rho_f cp_f \frac{\partial T}{\partial t} + P_2 \dot{m} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff}^* \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (58)$$

II) Equação da continuidade da fase Gelo β

Tem-se que a equação da continuidade da fase Gelo β é dada por:

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta}{\partial t^*} + \frac{\dot{m}}{\rho_\beta^*} = 0 \quad (59)$$

Conhecendo que:

$$P_1 = \frac{\rho_\rho^*}{\rho_{fo}^*} \quad (60)$$

$$\partial t^* = \frac{\delta_0^{*2}}{\alpha_{oeff}^*} \partial t \quad (61)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}^* \delta_0^{*2}}{\rho_{fo}^* \alpha_{oeff}^*} \quad (62)$$

Substituindo e desenvolvendo obtém-se:

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{P_1} = 0 \quad (63)$$

III) Equação de difusão da fase Gasosa (vapor)

Adimensionalizando a equação (37) e considerando que:

$$\rho_v = \frac{\rho_v^*}{\rho_{fo}^*} \quad (64)$$

$$D_{eff} = \frac{D_{veff}^*}{\alpha_{oeff}^*} \quad (65)$$

Substituindo tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_y \rho_v) - \dot{m} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_v) \right) \quad (66)$$

IV) Condições de Contorno Adimensionalizadas

Para a superfície do gelo tem-se:

$$Bi_m [w_\infty - w(r = \delta_f, t)] = D_{effs} \frac{\partial \rho_v(r = \delta_f, t)}{\delta_r} + \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} \quad (67)$$

$$Bi [T_\infty - T(r = \delta_f, t)] = K_{eff} \frac{\partial T(r = \delta_f, t)}{\delta_r} + P_2 \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} \quad (68)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta(r=\delta_f,t)}{\partial r} = 0 \quad (69)$$

Para superfície da placa plana tem-se:

$$T(r = 0, t) = T_e \quad (70)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta(r = 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (71)$$

7.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES

As propriedades do gelo poroso são avaliadas utilizando as correlações empíricas disponíveis na literatura utilizadas por Salinas (1996) e Da Silva (2014). A condutividade térmica utilizada é obtida de (Dietsch, 1983)

$$k_{\beta} = \frac{630}{T} \left(\frac{W}{mk} \right) \quad (72)$$

Utiliza-se a expressão do calor específico obtida por Ismail et al. (1997) que é expressa por:

$$C_{p\beta} = 2116,56 + 7,2845T \left(\frac{J}{kg^{\circ}C} \right) \quad (73)$$

A massa é obtida de Sami et al. (1989) apud Salinas (1996) que é expressa por:

$$\frac{1}{\rho_{\beta}} = 0,0010907 + 1,4635 * 10^{-7}T \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (74)$$

As propriedades do ar seco são obtidas segundo a ASHRAE (1989) e são expressas por:

$$k_{ar} = 0,001968 + 8,15 * 10^{-5}T \left(\frac{W}{mk} \right) \quad (75)$$

$$CP_{ar} = 1004 \left(\frac{J}{kg^{\circ}C} \right) \quad (76)$$

$$\rho_{ar} = \frac{344,9}{T} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (77)$$

A avaliação da condutividade efetiva da camada porosa de gelo (k_{eff}) é crucial para o modelamento matemático do fenômeno, existem diversas expressões que avaliam a condutividade da camada, porem a maioria delas relaciona a condutividade

com a densidade da camada de gelo. No presente trabalho utiliza-se a expressão proposta por Yonko e Sepsy (1967) apud Salinas (1996).

$$k_{eff} = 0,02422 + 7,214 * 10^{-4} \rho_f + 1,1797 * 10^{-6} \rho_f^2 \left(\frac{W}{mk} \right) \quad (78)$$

O coeficiente efetivo de difusão é determinado a partir da expressão desenvolvida por Tao et al. (1992). Esse parâmetro apresenta difícil determinação devido as complexidades envolvidas no processo de difusão que ocorrem nesse fenômeno. A expressão de Tao et al. (1992) é representada pela seguinte equação.

$$D_{eff} = e_y D (1 + F) \quad (m^2/s) \quad (79)$$

Onde D é o coeficiente binário de difusão e determinado pela expressão de Eckert (1954) apud Salinas (1996).

$$D = 2,19 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,81} * 10^{-5} \quad (m^2/s) \quad (80)$$

Salinas (1996) determina que o coeficiente efetivo de difusão na superfície é dado por:

$$D_{eff} = e_y D (1 + F_s) \quad (m^2/s) \quad (81)$$

Os fatores F e F_s são obtidos de Tao et al. (1993) através da figura 12.

Para o cálculo da umidade relativa utiliza-se a equação proposta por Stoecker e Jones (1985) que é apresentada a seguir.

$$\phi = \frac{\text{Pressão parcial d vapor d'água}}{\text{Pressão de saturação de água}} \quad (82)$$

A pressão parcial do vapor de água e a pressão de saturação de água, ambas na mesma temperatura, são obtidas a partir de tabelas termodinâmicas.

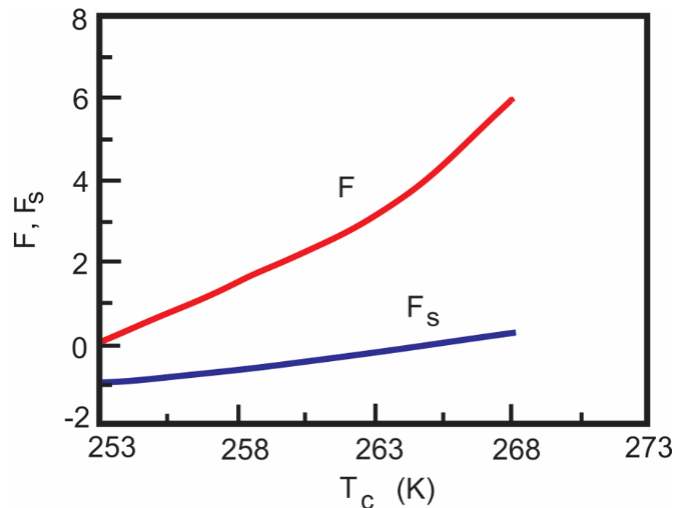


Figura 12 – Fatores F e F_s.

Fonte: Adaptado de Tao et al. (1993).

Para o cálculo da umidade absoluta utiliza-se a seguinte correlação proposta por Stoecker e Jones (1985).

$$w = \frac{\text{kg de vapor de água}}{\text{kg de ar seco}} = \frac{\frac{P_s}{R_s}}{\frac{(P_t - P_s)}{R_a}} = \frac{P_s R_a}{R_s (P_t - P_s)} \quad (83)$$

Onde:

- w é a umidade absoluta (%);
- P_s é a umidade relativa (KPa);
- R_s é a constante de gás do vapor ($461,5 \frac{J}{kg K}$);
- P_t é a pressão atmosférica [$p_a - p_s$] (KPa);
- R_a é a constante de gás do ar seco ($287 \frac{J}{kg K}$);

Assim tem-se que:

$$w = 0,622 \frac{P_s}{(P_t - P_s)} \quad (84)$$

Onde a pressão de saturação para qualquer tempo e posição da camada de gelo é avaliada em função da temperatura, utilizaremos a equação empírica de

ASHRAE (2009) apud Da Silva (2014) válida somente no intervalo $100^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$.
A equação é expressa por:

$$\ln(p_{v,sat}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7\ln(T) \quad (85)$$

Onde os valores das constantes C são:

$$C_1 = -5,6745359 * 10^3$$

$$C_2 = 6,3925247$$

$$C_3 = -9,677843 * 10^{-3}$$

$$C_4 = 6,2215701 * 10^{-7}$$

$$C_5 = 2,0747825 * 10^{-9}$$

$$C_6 = -9,484024 * 10^{-13}$$

$$C_7 = 4,1635019$$

O calor latente de sublimação (h_{sg}) é obtido a partir da equação desenvolvida por Parish (1970).

$$h_{sg} = 2322 * (1220,1 - 0,04667(1,8(T - 273) + 32)) \left(\frac{J}{kg}\right) \quad (86)$$

Os coeficientes de transferência de calor e massa sobre a superfície da camada de gelo são parâmetros críticos no modelamento desse fenômeno, como já apresentado anteriormente. Deve-se considerar que a camada limite térmica e difusiva são transientes, além da camada de gelo ser rugosa e de fronteira móvel. Nesse trabalho são utilizadas as mesmas correlações que Salinas (1996) utilizou em seu trabalho.

O coeficiente de transferência de calor será avaliado a partir as seguintes expressões:

$$Nu_{ax} = 0,051 \left(\frac{x}{dh}\right)^{0,611} w_{\infty}^{-0,860} T_i^{1,647} Re_{dh}^{0,317} Fo_{dh}^{0,206} \quad (87)$$

$$h_{ax} = \frac{Nu_{ax} k_{ar}}{x} \quad (88)$$

$$Bi = \frac{h_{ax} \delta_{fo}}{k_{oeff}} \quad (89)$$

O coeficiente de transferência de massa será avaliado a partir as seguintes expressões:

$$Sh_x = 1,019 * 10^{-5} \left(\frac{x}{dh}\right)^{0,781} w_{\infty}^{-2,859} T_i^{-0,119} Re_{dh}^{0,185} Fo_{dh}^{0,187} \quad (90)$$

$$h_m = \frac{Sh_x D(r = \delta_f)}{x} \quad (91)$$

$$Bim = \frac{h_m \delta_{fo}}{\alpha_{oeff} \rho_{fo}} \quad (92)$$

Onde:

$$Re_{db} = \frac{\rho_{ar} v_{dh}}{\mu} \quad (93)$$

$$Fo_{dh} = \frac{\alpha_{oar} t}{dh^2} \quad (94)$$

$$T_i = \frac{T_{tp} - T_c}{\Delta T} \quad (95)$$

As correlações experimentais para a densidade e espessura da camada de gelo são apresentadas a seguir:

$$\rho_f = 5,559 * 10^{-6} \left(\frac{x}{dh}\right)^{0,137} w_{\infty}^{-0,413} T_i^{-0,997} Re_{dh}^{0,715} Fo_{dh}^{0,252} \quad (96)$$

$$\delta_f = 0,156 \left(\frac{x}{dh}\right)^{-0,098} w_{\infty}^{1,723} T_i^{1,1} Re_{dh}^{0,343} Fo_{dh}^{0,655} (m) \quad (97)$$

Os valores das propriedades usadas como referência de adimensionalização de Tao et al. (1992) são apresentados a seguir:

$$\alpha_{oeff} = 1,38 * 10^{-6} (m^2/s)$$

$$\rho_{fo} = 92,84 (kg/m^3)$$

$$cp_{fo} = 1912,28 \left(\frac{J}{kgK}\right)$$

$$\delta_0 = 0,0029 \text{ (m)}$$

Durante a simulação o valor da condutividade efetiva (k_{oef}) será determinado de acordo com o material ou revestimento da superfície que estiver sendo simulado.

7.4 ANÁLISE NUMÉRICA

A simulação numérica foi implementada para tentar determinar o crescimento da fronteira de gelo poroso sobre a superfície de um evaporador em escoamento de ar úmido segundo. As características do tratamento numérico de fronteira móvel desenvolvida por Salinas (1996) para placas planas e posteriormente por Da Silva (2014) para cilindros com arranjo triangular. Nessa seção abordaremos os tratamentos numéricos necessários para realizar essa simulação.

7.4.1 Análise Numérica do Primeiro Estágio

As equações que modelam o primeiro estágio do crescimento da camada de gelo poroso são resolvidas utilizando diferenças finitas, para desenvolver a discretização foi utilizado o método das diferenças finitas centrada na derivada no espaço e nos pontos intermediários, além disso também utilizaremos formulação implícita para o tempo de transição. Utilizando malha fixa os valores das propriedades são interpolados para cada nova posição da fronteira através do método da *spline*, que é uma técnica de aproximação onde se divide o intervalo de interesse em vários subintervalos que são interpolados com polinômios de grau pequeno. Todas equações diferenciais envolvidas são solucionadas utilizando o método da relaxação, dessa forma garantindo a convergência da solução em cada intervalo de tempo.

7.4.1.1 Discretização das Equações Governantes do Primeiro Estágio

I) Equação da Energia

Pela discretização realizada a partir da equação (3) obtém-se:

$$d_i \frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{\Delta t} = d_i \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} + 2 \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x} \frac{d_i^n - d_{i-1}^n}{\Delta x} - 4Bi(T_i^n - T_\gamma) + \frac{2}{Ja} \frac{d_i^n - d_{i-1}^n}{\Delta t} \quad (98)$$

II) Equação da Difusão

$$\frac{d_i^n - d_{i-1}^n}{\Delta t} = 2Bim(w_\gamma - w_i^{n-1}) \quad (99)$$

III) Condições de Contorno

As condições de contorno também foram discretizadas pela técnica de diferenças finitas, porém nesta etapa foi utilizado o esquema de diferença atrasada para a primeira derivada no espaço, no caso da superfície, e diferença finita avançada no caso da superfície da placa em $r = 0$, para garantir a estabilidade da solução.

Para a superfície da camada de gelo tem-se:

$$\frac{\delta_f^n - \delta_f^{n-1}}{\Delta t} = Bim(w_\infty - w(r = \delta_f^{n-1})) \quad (100)$$

$$\frac{T^n(r = \delta_f^n) - T^n(r = \delta_f^{n-1} - \Delta r)}{\Delta r} = Bi_\beta [T_\infty - T(r = \delta_f^n)] + \frac{1}{Ja} \frac{\delta_f^n - \delta_f^{n-1}}{\Delta t} \quad (101)$$

Na superfície da placa tem-se:

$$(r = 0, t) = T_c \quad (102)$$

$$\frac{\partial d(r = 0, t)}{\partial r} = 0 \quad (103)$$

7.4.2 Análise Numérica do Segundo Estágio

As equações diferenciais que modelam o segundo estágio também foram solucionadas utilizando o método das diferenças finitas. Da Silva (2014) utiliza diferenças finitas centradas para as derivadas no espaço e para os pontos

intermediários utiliza-se a técnica de Up Wind para a derivada temporal. Novamente utiliza-se malha fixa e os valores das variáveis em estudo e das propriedades são interpoladas para cada nova posição da fronteira. Todas as equações diferenciais foram resolvidas por relaxação, por meio de iterações até que se obtenha uma diferença de 10^{-5} entre os valores das variáveis em duas iterações sucessivas, em função da convergência da solução.

7.4.2.1 Discretização das Equações Governantes do Segundo Estágio

I) Discretização da Equação da Energia

$$\rho_f c p_f \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \dot{m} P_2 \rho_f c p_f \quad (104)$$

Discretizando tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{12} (\rho_f c p_f)_{J+1}^{n-1} \frac{T_{J+1}^n - T_{J+1}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{5}{6} (\rho_f c p_f)_J^{n-1} \frac{T_J^n - T_J^{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{12} (\rho_f c p_f)_{J-1}^{n-1} \frac{T_{J-1}^n - T_{J-1}^{n-1}}{\Delta t} = \\ \frac{k_{eff_{J+\frac{1}{2}}}^{n-1} T_{J+1}^n - \left(k_{eff_{J+\frac{1}{2}}} + k_{eff_{J-\frac{1}{2}}} \right)^{n-1} T_J^n + k_{eff_{J-\frac{1}{2}}}^{n-1} T_{J-1}^n}{\Delta x^2} - (\dot{m} P_2)_J^{n-1} \end{aligned} \quad (105)$$

Considerando que:

$$\alpha(r) = \frac{\Delta t}{\Delta r^2} k_{eff}(r) \quad (106)$$

$$\begin{aligned} D_J^{n-1} = \frac{1}{12} (\rho_f c p_f)_{J+1}^{n-1} \frac{T_{J+1}^n - T_{J+1}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{5}{6} (\rho_f c p_f)_J^{n-1} \frac{T_J^n - T_J^{n-1}}{\Delta t} \\ + \frac{1}{12} (\rho_f c p_f)_{J-1}^{n-1} \frac{T_{J-1}^n - T_{J-1}^{n-1}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (107)$$

Substituindo tem-se:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{12} \rho_{f_{J-1}} c p_{f_{J-1}} - \alpha_{J-\frac{1}{2}} \right)^{n-1} T_{J-1}^n + \left(\frac{5}{6} \rho_{f_J} c p_{f_J} + \alpha_{J+\frac{1}{2}} + \alpha_{J-\frac{1}{2}} \right)^{n-1} T_J^n \\ + \left(\frac{1}{12} \rho_{f_{J+1}} c p_{f_{J+1}} - \alpha_{J+\frac{1}{2}} \right)^{n-1} T_{J+1}^n = D_J^{n-1} - (\dot{m} P_2)_J^{n-1} \Delta t \end{aligned} \quad (108)$$

Considerando que:

$$Ao = \left(\frac{1}{12} \rho_{f_{J-1}} c p_{f_{J-1}} - \alpha_{J-\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \quad (109)$$

$$Bo = \left(\frac{5}{6} \rho_{f_J} c p_{f_J} + \alpha_{J+\frac{1}{2}} + \alpha_{J-\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \quad (110)$$

$$Co = \left(\frac{1}{12} \rho_{f_{J+1}} c p_{f_{J+1}} - \alpha_{J+\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \quad (111)$$

Fazendo a relaxação tem-se:

$$rAoT_{J-1}^n + BoT_J^n + rCoT_{J+1}^n = (1-r)BoT_J^{n-1} + (D_J^{n-1} - (\dot{m}P_2)_J^{n-1}\Delta t) \quad (112)$$

Onde r é o fator de relaxação.

II) Discretização da Equação de Difusão da Fase Gasosa (vapor)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_v \rho_v) - \dot{m} = \frac{\partial}{\partial r}(D_{eff}) \frac{\partial}{\partial r}(\rho_v) \quad (113)$$

Onde:

$$\varepsilon_v = 1 - \varepsilon_\beta(r) \quad (114)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} - \frac{\dot{m}}{P_1} = 0 \quad (115)$$

Desenvolvendo tem-se:

$$(1 - \varepsilon_\beta) \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \left(\frac{\rho_v \dot{m}}{P_1} - \dot{m} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} \frac{\partial \rho_v}{\partial r} \right) \quad (116)$$

Discretizando da mesma maneira que a equação da energia tem-se:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{12}(1-\varepsilon_\beta)_{J-1}^{n-1} \frac{\rho_{vJ-1}^n - \rho_{vJ-1}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{5}{6}(1-\varepsilon_\beta)_J^{n-1} \frac{\rho_{vJ}^n - \rho_{vJ}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{12}(1-\varepsilon_\beta)_{J+1}^{n-1} \frac{\rho_{vJ+1}^n - \rho_{vJ+1}^{n-1}}{\Delta t} \\ & = \frac{D_{effJ+\frac{1}{2}}^{n-1} \rho_{vJ+1}^n - \left(D_{effJ+\frac{1}{2}}^{n-1} - D_{effJ-\frac{1}{2}}^{n-1} \right) \rho_{vJ}^n + D_{effJ-\frac{1}{2}}^{n-1} \rho_{vJ-1}^n}{\Delta x^2} - \left(\frac{\rho_{vJ}^n}{P_1} - \dot{m}_J \right)^{n-1} \end{aligned} \quad (117)$$

Considerando que:

$$\gamma(r) = \frac{\Delta t}{\Delta r^2} D_{eff}(r) \quad (118)$$

$$\delta_J^{n-1} = \frac{1}{12}(1-\varepsilon_\beta)_{J-1}^{n-1} \rho_{vJ-1}^{n-1} + \frac{5}{6}(1-\varepsilon_\beta)_J^{n-1} \rho_{vJ}^{n-1} + \frac{1}{12}(1-\varepsilon_\beta)_{J+1}^{n-1} \rho_{vJ+1}^{n-1} \quad (119)$$

Substituindo e desenvolvendo tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{m}_J^n = \frac{1}{\left(1 - \frac{\rho_{vJ}^n}{P_1}\right)} & \left[\left(\frac{1}{12}(1-\varepsilon_\beta)_{J-1} - \gamma_{J+\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \rho_{vJ-1}^n + \left(\frac{5}{6}(1-\varepsilon_\beta)_J + \gamma_{J+\frac{1}{2}} + \right. \right. \\ & \left. \left. \gamma_{J-\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \rho_{vJ}^n + \left(\frac{1}{12}(1-\varepsilon_\beta)_{J+1} - \gamma_{J+\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \rho_{vJ+1}^n - \delta_J^{n-1} \right] \end{aligned} \quad (120)$$

III) Discretização da Equação de Continuidade da fase gelo (β)

A discretização da equação de continuidade da fase de gelo (β) fica:

$$\varepsilon_{\beta J}^n = \varepsilon_{\beta J}^{n-1} - \frac{\dot{m}_J^n}{P_1} \Delta t \quad (121)$$

$$\rho_{vJ}^n = \frac{\exp \left[-P_5 \left(\frac{1}{T_j^n} - \frac{1}{T_o} \right) \right]}{P_4 T_j^n} \quad (122)$$

IV) Condições de Contorno

As condições de contorno são novamente discretizadas utilizando diferenças finitas, onde diferenças atrasadas foram utilizadas para a 1ª derivada no espaço na superfície da camada e diferenças adiantadas para 1ª derivada no espaço na superfície da placa ou $r = 0$.

Para a superfície da placa ($r = 0$) tem-se:

$$T(r = 0) = T_c \quad (123)$$

$$\frac{\varepsilon_\beta^n(r = \Delta r) - \varepsilon_\beta^n(r = 0)}{\Delta r} = 0 \quad (124)$$

Para a superfície da camada de gelo ($r = \delta$) tem-se:

$$Bim[w_\infty - w^n(r = \delta_f)] = D_{eff} \frac{\rho_v^n(r=\delta_f) - \rho_v^n(r=\delta_f - \Delta r)}{\Delta r} - \rho_f \frac{\delta_f^{n+1} - \delta_f^n}{\Delta t} \quad (125)$$

$$Bi[T_\infty - T^n(r = \delta_f)] = k_{eff} \frac{T^n(r=\delta_f) - T^n(r=\delta_f - \Delta r)}{\Delta r} - P_2 \rho_f \frac{\delta_f^n - \delta_f^{n-1}}{\Delta t} \quad (126)$$

$$\frac{\varepsilon_\beta^n(r = \delta_f) - \varepsilon_\beta^n(r = \delta_f - \Delta r)}{\Delta r} = 0 \quad (127)$$

7.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo desenvolveu o modelo matemático utilizado para simular o processo de formação de gelo poroso em placa plana sob o escoamento de ar úmido. Na seção 7.1 é modelada as equações que definem o primeiro estágio de formação desse fenômeno, posteriormente em 7.2 é modelada as equações do segundo estágio de formação, em 7.3 todas as propriedades do gelo poroso são avaliadas utilizando as correlações empíricas disponíveis na literatura. Por fim em 7.4 é realizada uma análise numérica das equações que modelam os dois estágios de formação que serão implementadas no programa utilizado para realizar as simulações.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados numéricos do processo de formação de gelo poroso sobre uma placa plana, obtidos a partir da simulação numérica desenvolvida nos capítulos anteriores. Os resultados serão expostos através de uma série de gráficos e considerações. O presente capítulo foi dividido da seguinte maneira, em 8.1 são apresentados os resultados numéricos e posteriormente em 8.2 é realizada a convalidação do modelo proposto através de dados empíricos e experimentais obtidos na literatura.

8.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Nessa seção serão analisados os resultados numéricos obtidos da formação de gelo poroso sobre uma superfície plana. O modelamento do processo de formação de gelo sobre superfície plana exposta a temperaturas inferiores a 0°C e a um fluxo de ar úmido foi realizado considerando a divisão do fenômeno em dois estágios, como descrito anteriormente. Cada estágio de formação foi modelado a partir de um conjunto de equações governantes deduzidas para descrever os fenômenos físicos que ocorrem durante o estágio em questão.

O modelo numérico que representa o primeiro estágio de formação é simples e os resultados obtidos dele influenciam diretamente no modelamento do segundo estágio de formação. Os principais parâmetros que influenciam esses resultados são as condições iniciais escolhidas para iniciar a modelagem tais como, perfil do cristal de gelo formado no intervalo de tempo entre t_0 e t_{tr1} , o comprimento inicial do cristal de gelo (δ_{fo}) e o diâmetro inicial d_0 do cristal formado.

Esses parâmetros são de difícil determinação e necessitam de uma série de experimentos para poder obter esses dados. Para dados de difícil determinação utiliza-se nessa simulação os dados propostos por Salinas (1996) em sua modelagem matemática, na modelagem do presente trabalho apenas os parâmetros ambientais foram modificados para cada simulação. Parâmetros como, velocidade do ar (v_∞), temperatura da superfície fria (T_c), temperatura ambiente (T_∞), umidade relativa do

ar (w_∞) e o coeficiente de condutibilidade térmica (k) para cada material simulado numericamente.

Os evaporadores geralmente são feitos de alumínio, cobre ou latão, materiais que possuem alta condutividade térmica, e os principais revestimentos utilizados para retardar o crescimento de gelo poroso são sílica – SiO_2 e a cera (wax). A seguir serão apresentadas as simulações realizadas com os respectivos materiais descritos anteriormente.

8.1.1 Simulação para Superfície Revestidas

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos para superfícies revestidas com cera e sílica que atuam, respectivamente, como agentes hidrofóbico e hidrofílico.

8.1.1.1 Superfície revestida com cera

Nesse tópico serão apresentados os resultados obtidos da simulação considerando uma placa revestida com cera. A figura 13 mostra o resultado obtido da simulação da espessura da camada de gelo poroso, a espessura está em função do tempo. As condições ambientais que a placa está exposta estão descritas na própria figura 13.

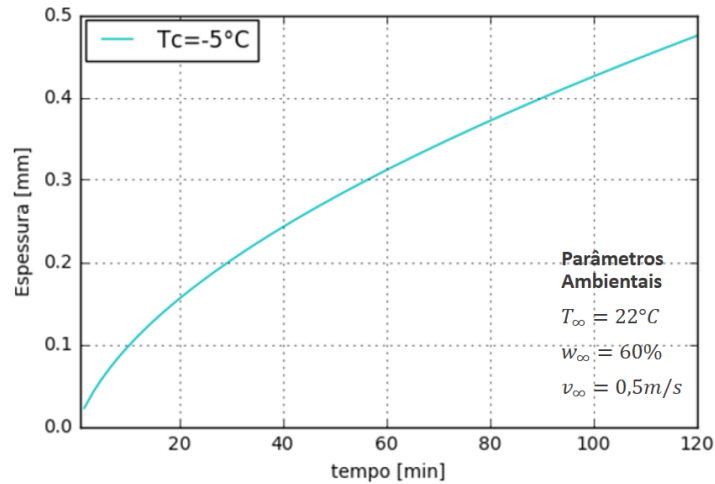


Figura 13 – Espessura da camada de gelo para placa revestida com cera.

Pode-se observar que nas condições propostas a camada de gelo no intervalo de 120 minutos varia entre 0 a $0,47\text{ mm}$ sobre a superfície da placa, quando a superfície da mesma está em -5°C .

A figura 14 mostra como o comportamento da espessura do gelo poroso pode ser influenciada quando a temperatura da superfície da placa é variada. Pode-se notar que quanto menor as temperaturas da superfície maior é a espessura da camada de gelo que se forma ao longo do tempo, isso acontece devido ao gradiente de temperatura maior que causa como consequência uma maior troca térmica entre a superfície do gelo poroso e o fluxo de ar, dessa forma mais cristais se depositam na superfície formando a estrutura porosa e aumentando assim sua espessura.

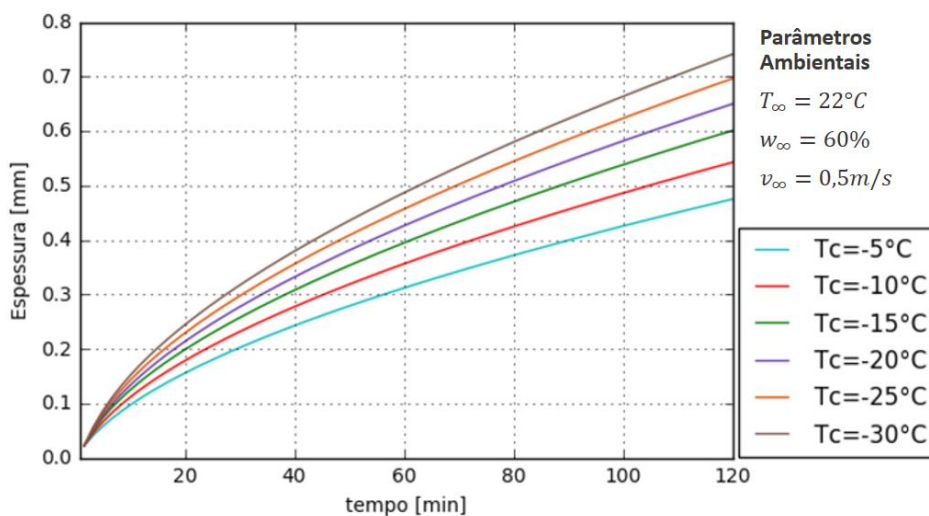


Figura 14 – Espessura da camada de gelo para placa revestida com cera – variando a temperatura da superfície.

Um parâmetro importante avaliado nesta simulação é a temperatura superficial da camada de gelo que é mostrado na figura 15. Os resultados mostram um rápido crescimento da temperatura na superfície nos primeiros minutos deste estágio até que o crescimento vai ficando cada vez mais lento à medida que o tempo passa.

A temperatura superficial é uma das variáveis mais sensíveis utilizadas na modelagem, ela é utilizada na determinação do fluxo de calor que está atravessando a camada de gelo e para os balanços energéticos do sistema, ou seja, é uma variável de grande relevância.

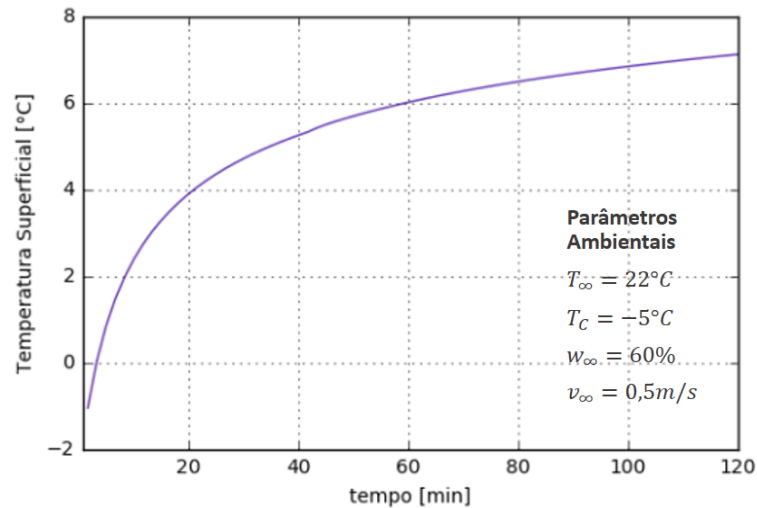


Figura 15 – Temperatura superficial da camada de gelo para placa revestida com cera.

A figura 16 apresenta a variação da velocidade de deposição do gelo poroso, sobre a superfície revestida com cera, de acordo com a temperatura da superfície de deposição.

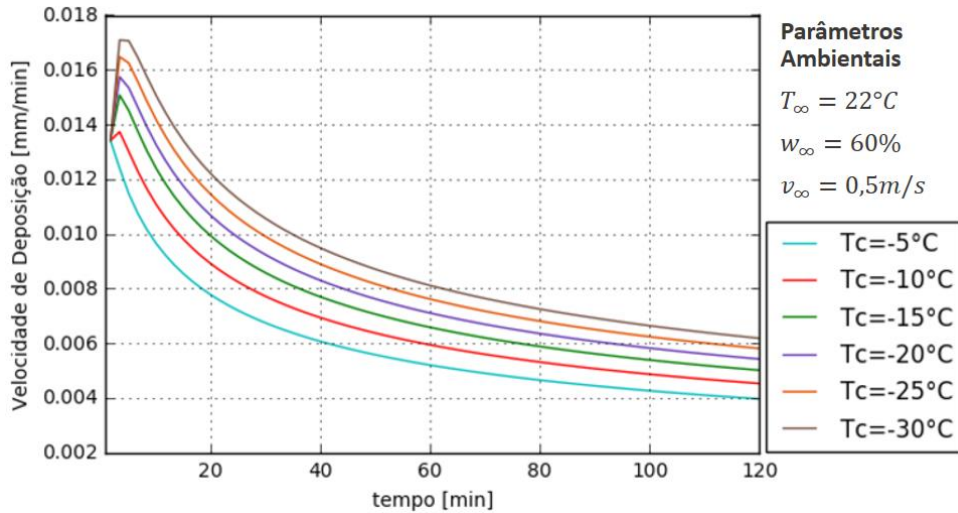


Figura 16 – Velocidade de deposição de gelo para placa revestida com cera- variando a temperatura da superfície.

Pode-se observar que na medida que a temperatura da placa diminuí a velocidade de deposição, do gelo poroso sobre a placa revestida, aumenta ao longo do tempo. Também pode-se constatar uma alta velocidade de deposição nos primeiros minutos deste estágio, que vai diminuindo ao longo do tempo.

A partir dos resultados obtidos na figura 14, entende-se que conforme a temperatura da superfície fria (T_c) é variada essa variação afeta a espessura da camada de gelo. Baseado nisso a figura 17 apresenta como o comportamento da espessura do gelo poroso é influenciada quando a temperatura do ambiente (T_{∞}) ao redor da placa resfriada é variada.

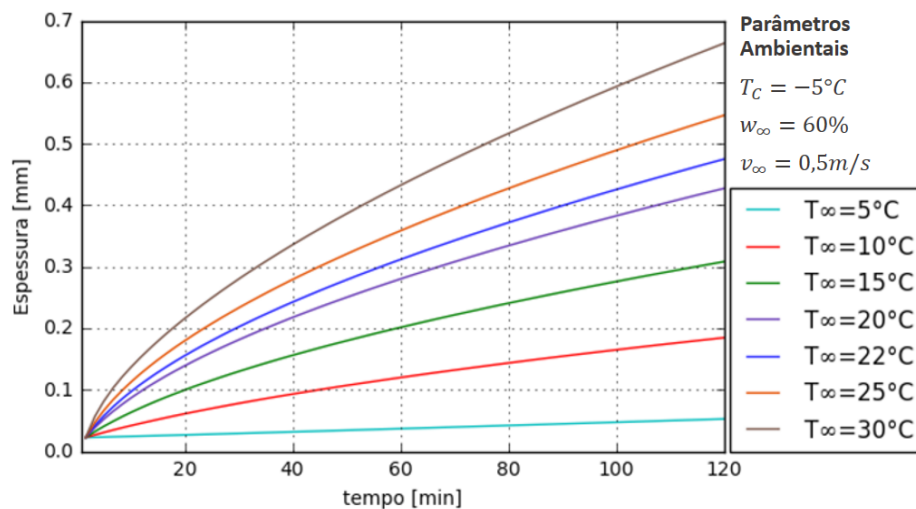


Figura 17 – Espessura da camada de gelo para placa revestida com cera – variando a temperatura do ambiente.

A partir dos resultados apresentados nas figuras 14 e 17 observa-se que a espessura da camada de gelo pode estar relacionada com a diferença de temperatura entre a superfície fria e o ambiente ao redor dela. Os resultados obtidos indicam que quanto menor a diferença de temperatura entre T_c e T_∞ menor é a camada de gelo formada e quanto maior for essa diferença maior é a espessura da camada de gelo que se forma ao longo do tempo.

A figura 18 apresenta como a variação da umidade do ambiente (w_∞) afeta o crescimento da camada de gelo poroso sobre a placa resfriada.

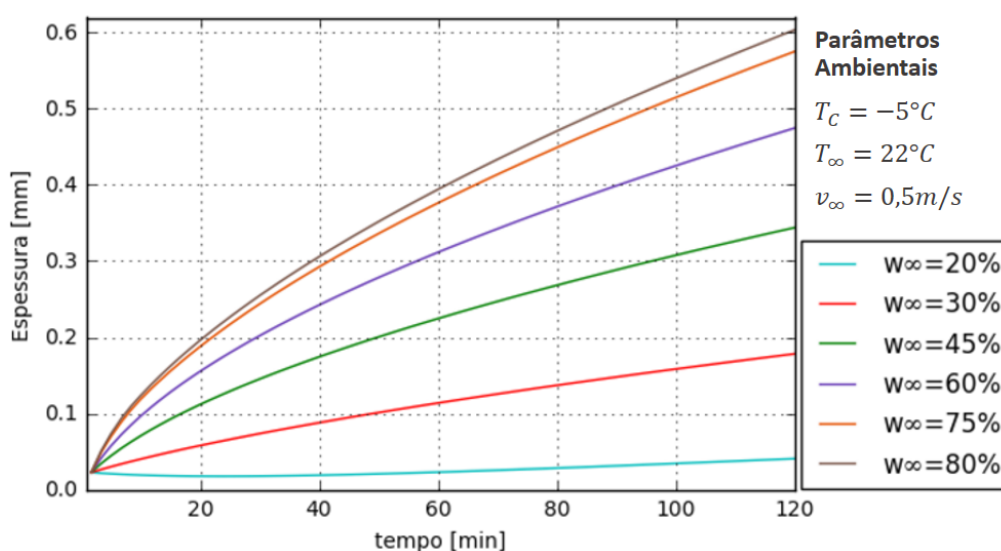


Figura 18 – Espessura da camada de gelo para placa revestida com cera – variando a umidade relativa do ambiente.

Observa-se que quanto maior a umidade relativa maior é a espessura do gelo poroso, isto é explicado pelo aumento de vapor de água entrando na camada e esse aumento de vapor consequentemente aumenta a espessura da camada de gelo que logo aumenta sua densidade também. E como era de se esperar quanto menor for a umidade no ambiente menor é a espessura da camada, pois não há grandes quantidades de vapor disponíveis para formar uma espessa camada de gelo sobre a placa. Uma maneira de reduzir formação de gelo poroso é controlar o aumento da umidade no ambiente.

A figura 19 mostra a influência da variação da umidade do ambiente na velocidade de deposição. A partir dos resultados pode-se constatar que quanto maior a umidade relativa do ambiente maior é a velocidade de deposição do gelo poroso

sobre a placa revestida ao longo do tempo. Novamente percebe-se uma alta velocidade de deposição nos primeiros minutos deste estágio, que diminuí na medida que a simulação ocorre.

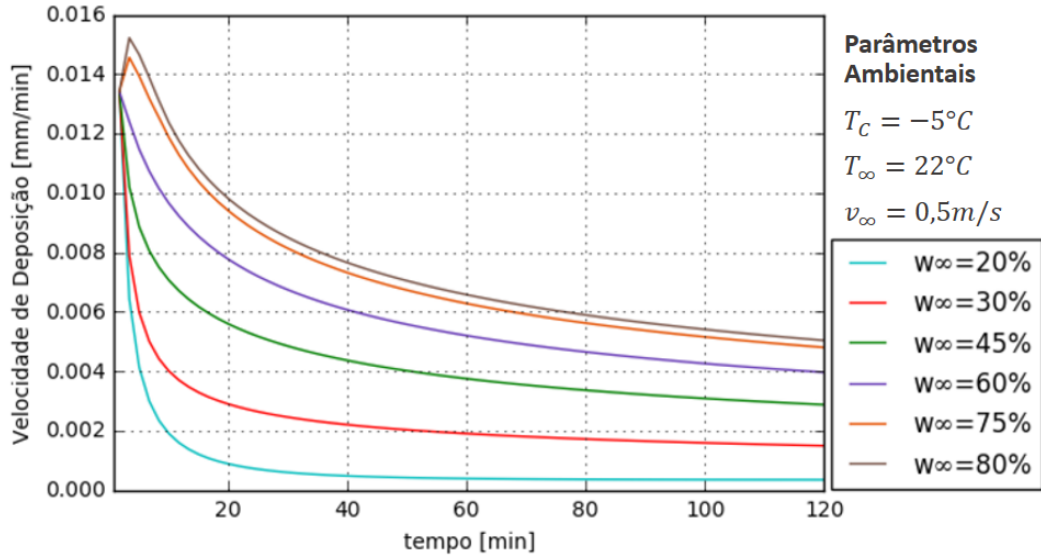


Figura 19 – Velocidade de deposição de gelo para placa revestida com cera - variando a umidade relativa do ambiente.

8.1.1.2 Superfície Revestida com Sílica

Na figura 20 os resultados obtidos da espessura da camada de gelo poroso para placa revestida com Sílica, quando variada a temperatura da superfície da placa (T_c), são apresentados. A partir desse resultado, pode-se começar a notar a diferenças na espessura da camada de gelo quando comparamos matérias diferentes.

Os resultados obtidos para a velocidade de deposição de gelo poroso para placa revestida com Sílica quando é variada a temperatura da superfície da placa (T_c) são expostos na figura 21. Pode-se notar, novamente, que a velocidade de deposição no início da simulação é alta nos primeiros minutos e posteriormente vai diminuindo na medida que a simulação ocorre. Os resultados obtidos para a espessura da camada de gelo poroso para placa revestida com Sílica quando variada a umidade relativa do ambiente são expostos na figura 22.

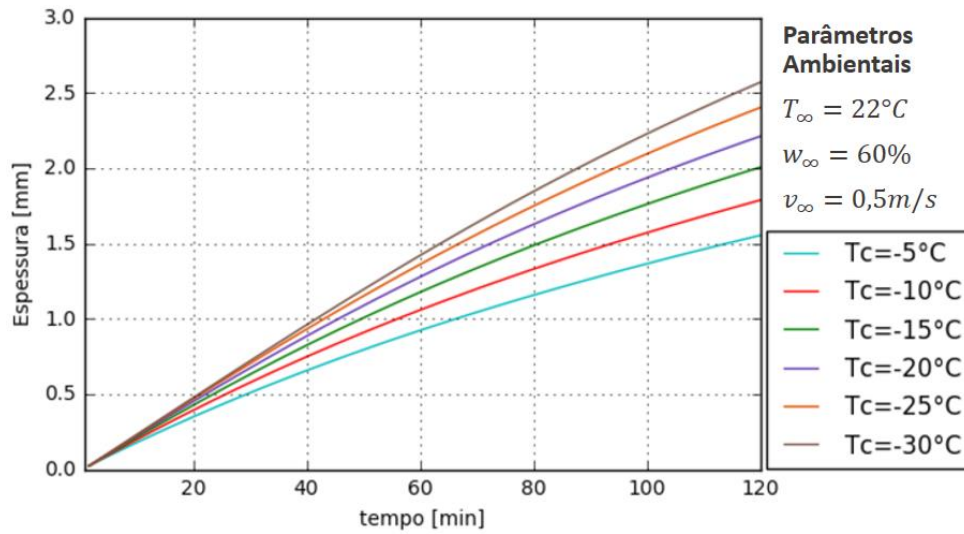


Figura 20 – Espessura da camada de gelo para placa revestida com Sílica – variando a temperatura da superfície.

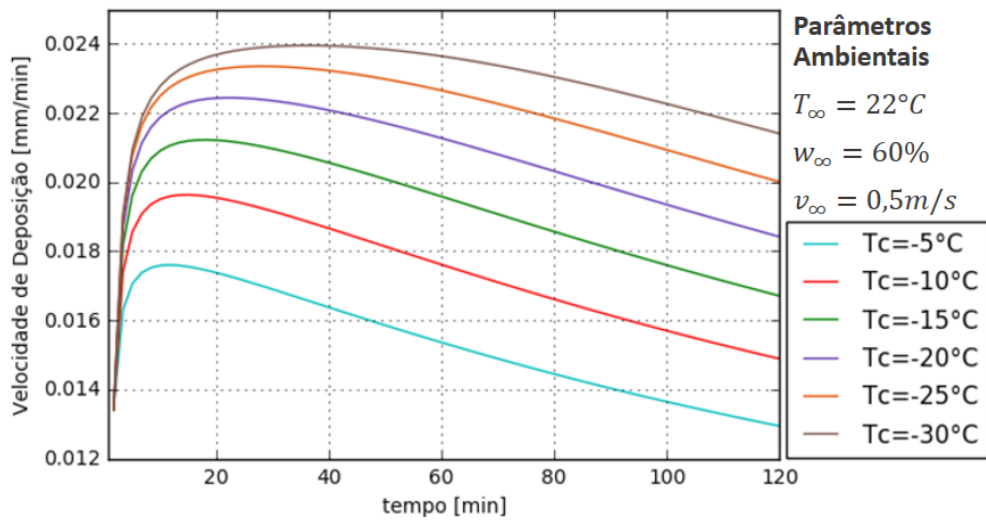


Figura 21 – Velocidade de deposição de gelo para placa revestida com Sílica- variando a temperatura da superfície.

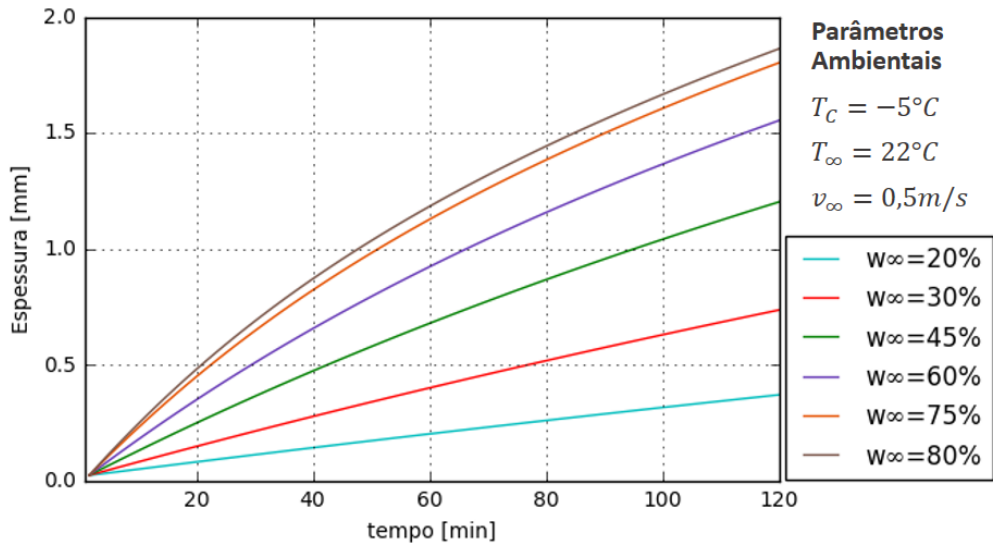


Figura 22 – Espessura da camada de gelo para placa revestida com Sílica – variando a umidade relativa do ambiente.

8.1.2 Simulação para Superfícies Usuais

Nessa seção são expostos os resultados obtidos da simulação numérica para as superfícies constituídas de Alumínio, Cobre e Latão que são os materiais mais utilizados na fabricação de evaporadores. Na figura 23 é apresentado as espessuras da camada de gelo poroso que se formam quando a superfície fria é constituída dos diferentes materiais mencionados anteriormente.

A superfície composta de cobre, das três superfícies em análise, é aquela onde a camada de gelo ficou mais espessa quando comparada as outras duas. Em seguida observa-se que as superfícies de alumínio e latão, que é uma liga metálica composta por cobre e zinco, apresentaram resultados bem semelhantes para as condições de realização dessa simulação.

A figura 24 expõem as velocidades de deposição da camada de gelo poroso para placa constituída de materiais que estão sendo analisados nessa seção. Para esses materiais percebe-se que nos primeiros minutos a velocidade de deposição é baixa, porem logo em seguida aumenta abruptamente e se estabiliza nos minutos posteriores.

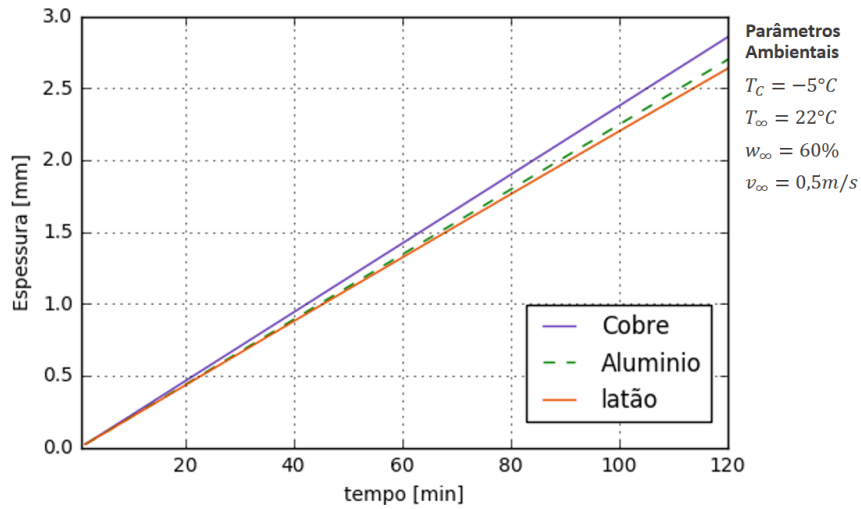


Figura 23 – Espessura da camada de gelo para placa composta de materiais usuais.

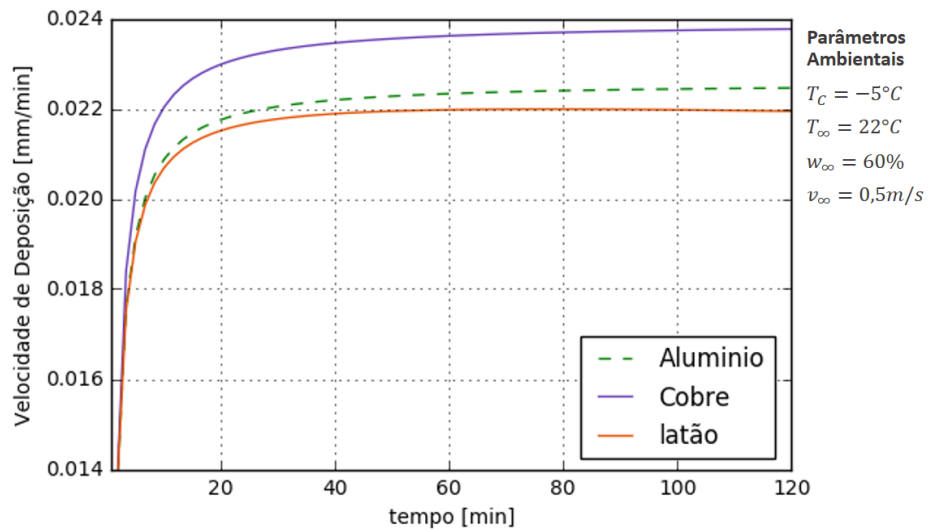


Figura 24 – Velocidade de deposição da camada de gelo para placa composta de materiais usuais.

A figura 25 apresenta a temperatura superficial, para os materiais em análise, de todos os materiais simulados constata-se que o latão apresenta uma maior temperatura superficial, seguida pelo alumínio e cobre.

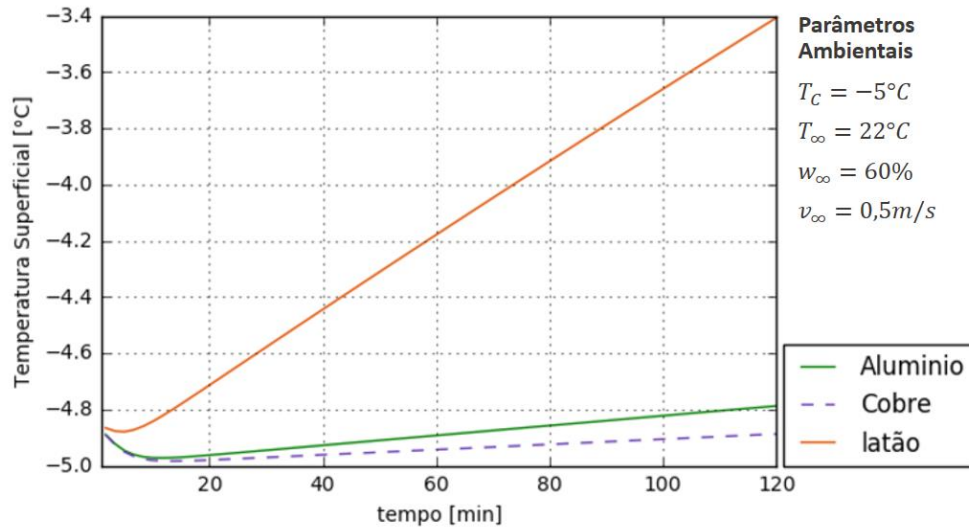


Figura 25 – Temperatura superficial da camada de gelo para placa composta de materiais usuais.

8.1.3 Comparativo dos Resultados

A figura 26 expõe a espessura da camada de gelo para diferentes matérias superficiais, entende-se que de todos os materiais simulados, para os parâmetros ambientais considerados, a cera é quem apresenta a camada de gelo mais fina, apresentando uma espessura de aproximadamente $0,5mm$. A sílica também apresenta uma fina camada de gelo de a aproximadamente $1,5mm$ de espessura.

Para o cobre, alumínio e latão, como já apresentado anteriormente, uma camada de gelo mais espessa se formou sobre esses materiais apresentando uma espessura acima de $2,5mm$ para a camada de gelo formada sobre a superfície da placa.

Os resultados apontam que dentre todos materiais estudados nessa simulação a cera é mais efetiva contenção do crescimento da camada de gelo nas condições mencionadas na figura 26.

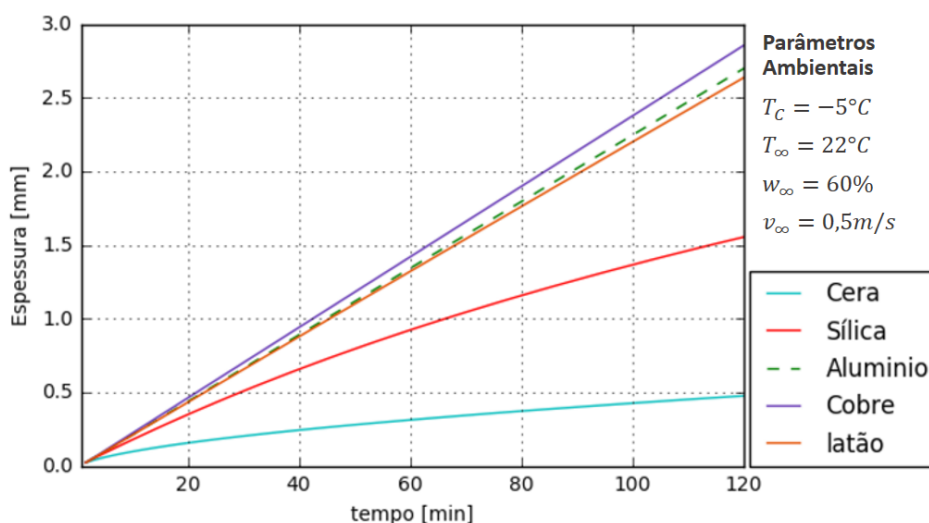


Figura 26 – Espessura da camada de gelo para diferentes materiais.

Os coeficientes de condutividade térmica (k) utilizados na simulação estão expostos na tabela 3. Pode-se observar uma relação entre o coeficiente (k) e a espessura da camada de gelo poroso, a espessura aumenta, nessa simulação, conforme (k) assume valores mais altos.

Tabela 3 – Coeficientes de condutividade térmica para diferentes materiais

Material	k	Unidade
Alumínio	204	$[W/mK]$
Cera	0,25	$[W/mK]$
Cobre	386	$[W/mK]$
Latão	26	$[W/mK]$
Sílica	1,5	$[W/mK]$

Fonte: Incropera, 2008.

A figura 27 apresenta um comparativo da velocidade de deposição da camada de gelo poroso para os materiais estudados nesse capítulo. Esse resultado é bastante interessante pois evidencia que para os materiais com condutividade térmica maior a deposição dos cristais de gelo corre em velocidade mais alta do que os materiais de baixa condutividade térmica, observa-se que a deposição ocorre de maneira mais rápida para o cobre e o alumínio e de maneira mais lenta para a cera e a sílica. É importante destacar que a velocidade de deposição não começa em zero, pois consideramos apenas o segundo estágio de formação nesse resultado.

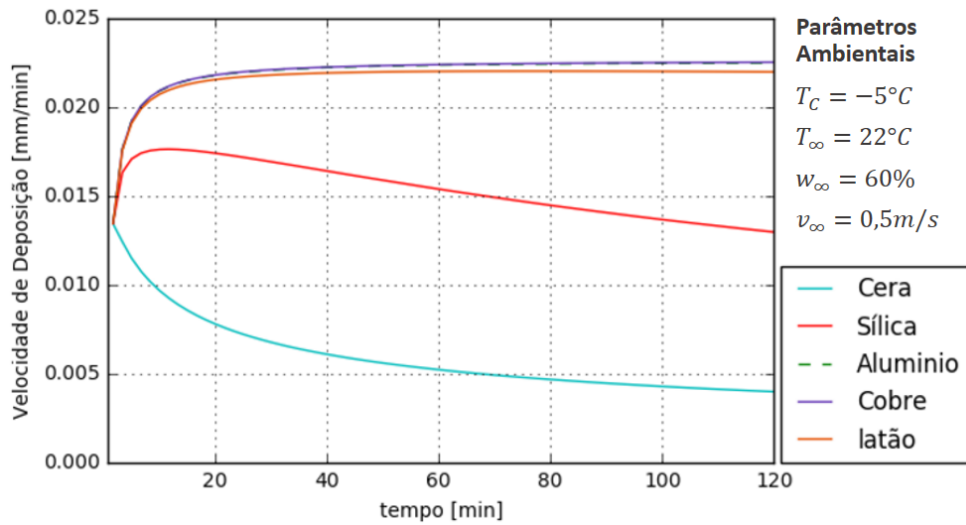


Figura 27 – Velocidade de deposição da camada de *gelo* para diferentes materiais.

Finalizando essa seção a figura 28 apresenta um comparativo da temperatura superficial da camada de gelo poroso para os diferentes materiais. Entende-se que a cera e a sílica apresentam maiores temperaturas superficiais do que o alumínio, cobre e latão. Esse resultado é essencial na determinação do fluxo de calor que atravessa a camada de gelo e dos balanços energéticos do sistema, essas informações não serão calculadas aqui por não serem o foco do presente trabalho.

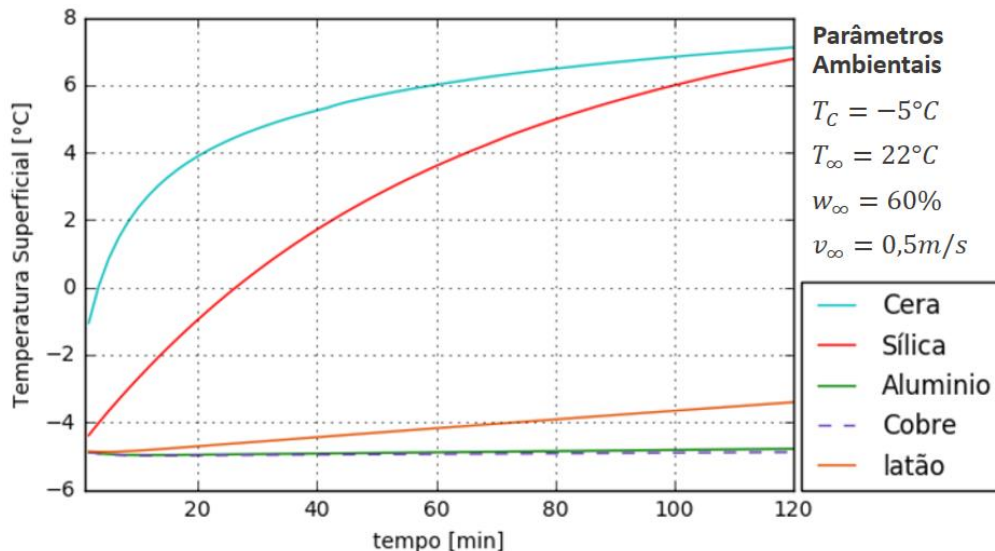


Figura 28 – Temperatura superficial da camada de *gelo* para diferentes materiais.

8.2 CONVALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Utiliza-se os resultados experimentais obtidos por Liu et. al. (2007), para a formação de gelo poroso sobre uma superfície revestida com parafina, na convalidação do modelo numérico apresentado. A figura 29 mostra a convalidação numérica do modelo utilizando o número de Nusselt proposto por Salinas (1996) apresentado na equação (31). As condições ambientais do experimento realizado por Liu et. al. (2007) são expostas na figura.

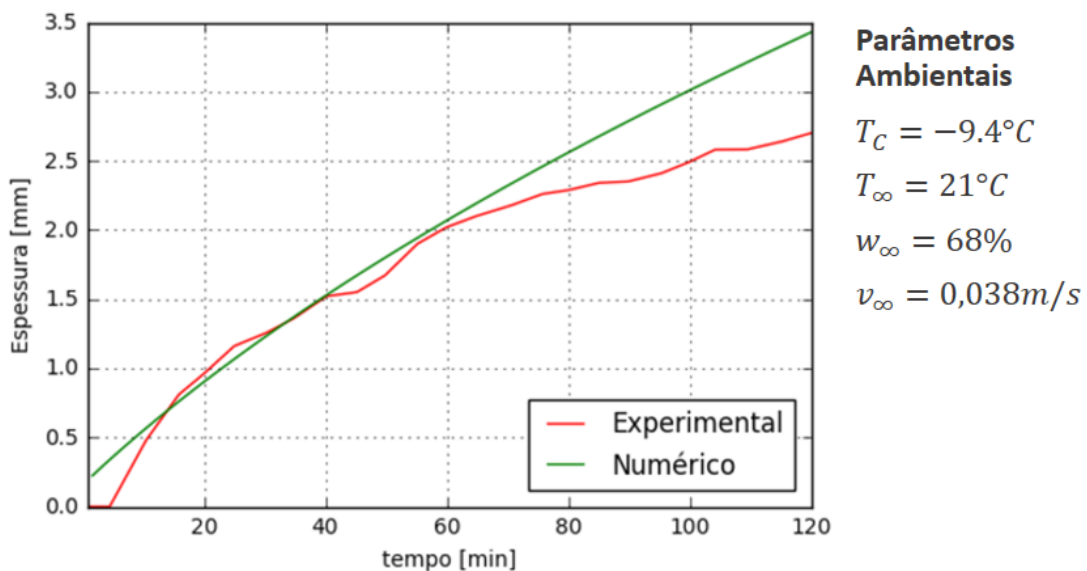


Figura 29 – Convalidação do modelo numérico utilizado.

A partir da figura 29, quando comparado os resultados, pode-se observar que o modelo matemático apresenta boa concordância com o resultado experimental obtido por Liu et. al. (2007) em até 60 minutos e após isso o modelo não é capaz de prever os resultados com uma boa precisão.

9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

O fenômeno de formação de gelo poroso sobre a superfície dos evaporadores é um fato relevante que deve ser levado em conta na avaliação do desempenho dos equipamentos no qual esse fenômeno ocorre, pois se trata de um fator importante em termos de perdas energéticas. Neste trabalho foram apresentados métodos de minimização da formação de gelo poroso em evaporadores, e a partir disso foi estudado numericamente a formação do mesmo sobre superfícies planas constituídas ou revestidas por alumínio, cera, cobre, sílica e latão sob condições de escoamento de ar úmido e também foi investigado numericamente a influência das variações de parâmetros operacionais como: velocidade do ar, umidade do ar, temperatura da superfície.

Foi demonstrado numericamente que a espessura da camada de gelo poroso e a velocidade de deposição aumentam com a diminuição da temperatura da superfície da placa plana. Pode-se concluir que o modelo matemático e o código numérico utilizado são capazes de prever as propriedades da camada de gelo porosa em até 60 minutos como foi verificado a partir da comparação com dados experimentais disponíveis na literatura. No presente trabalho foi utilizado um modelo matemático para o meio poroso completamente teórico em sua formulação que envolve os campos térmicos e difusivo resolvidos de maneira acoplada utilizando a técnica de diferenças finitas.

O levantamento dos métodos de minimização e os resultados obtidos na simulação numérica para as superfícies planas composta de diferentes materiais e o mapeamento da espessura e velocidade de deposição em torno da placa plana foram as contribuições desse trabalho

As sugestões para trabalhos futuros são:

- Considerar o ângulo de contato e a energia de superfície no modelo matemático;
- Considerar a rugosidade da placa, não admitir como placa plana e lisa no modelo matemático;
- Considerar a energia livre de Gibbs na modelagem da fase de nucleação das gotículas d'água no modelo matemático;

- Investigar as influências da energia livre de Gibbs no processo de formação.
- Considerar as variações do coeficiente de condutividade térmica, não admitir como constante no modelo matemático;
- Reformular o modelo considerando a geometria de fractais no processo de formação.

REFERÊNCIAS

ASHRAE, **Handbook - Fundamentals**, The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, G.A, 1989.

CAI, L. et al. Effects of different characteristic surfaces at initial stage of frost growth. **Journal Of Central South University**, Berlin, n. 17, p. 413-418, 2010.

C, Cheng and N, Seki. **Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering: Selected topics on Ice-Water Sytems and Welding and Casting Processes**. 1 ed. New York: CRC Press, 1991. 815 p.

DA SILVA, Raquel C.R. **Estudo Experimental e Numérico da Formação de Frost em torno de três Cilindros com Arranjo Triangular**. 2014. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

DIETENBERGER, M. A. Generalized correlation of the water frost thermal conductivity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 26 n. 4, p. 607–619, 1983.

DYKE, Alexander; BETZ, Amy. Frost formation and growth on hydrophilic, hydrophobic, and biphilic surfaces. **International heat transfer conference**, Kyoto, japan, n. 15, 2014.

E., Okoroafor; M., Newborough. Minimising frost growth on cold surfaces exposed to humid air by means of crosslinked hydrophilic polymeric coatings. **Applied thermal engineering**, Bedford, uk, n. 15, p. 737-758, 2000.

HUANG, L. et al. Effect of contact angle on water droplet freezing process on a cold flat surface. **Experimental thermal and fluid science**, Beijing, china, n. 40, p. 74-80, 2012.

INCROPERA, F. P. & DeWITT, D. P., **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, 6ª Ed., Editora LTC, 2008.

JUNG, Dong; YANG, Jung; JHON, Mu. The effect of an external electric field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulations. **Chemical physics**, South Korea, n. 244, p. 331-337, 1998.

JUNIOR, Valter S.N. **Uma Correlação Semi-Empírica para a Densidade da Geada**. 2013. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KIM, H. et al. Microscopic observation of frost behaviors at the early stage of frost formation on hydrophobic surfaces. **International journal of heat and mass transfer**, South Korea, n. 97, p. 861-867, 2016.

KIM, Kyoungmin; LEE, Kwan-soo. Frosting and defrosting characteristics of a fin according to surface contact angle. **International journal of heat and mass transfer**, South Korea, n. 54, p. 2758-2764, 2011.

KINSARA, A. et al. Parametric study of an energy efficient air conditioning system using liquid desiccant. **Applied thermal engineering**, Kuwait, v. 18, n. 5, p. 327-335, 1997.

KOBAYASHI, T. On the habit of snow crystals artificially produced at low pressures. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, Japan, v. 36, p. 193-208, 1958.

LIU, Z. et al. An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. part I. anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface. **International journal of refrigeration**, Beijing, China, n. 29, p. 229-236, 2005.

LIU, Z. et al. Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions. **International journal of heat and mass transfer**, Beijing, China, n. 51, p. 5975-5982, 2008.

LIU, Z. et al. Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions. **Experimental thermal and fluid science**, Beijing, China, n. 31, p. 789-794, Jul. 2007.

LIU et al. An experimental study of frost formation on cryogenic surfaces under natural convection conditions. **International journal of heat and mass transfer**, Beijing, China, n. 96, p. 569-577, 2016.

NA, Byeongchul; WEBB, Ralph. A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation. **International journal of heat and mass transfer**, Pennsylvania, n. 43, p. 3797-3808, abr. 2003.

NA, Byeongchul; WEBB, Ralph. New model for frost growth rate. **International journal of heat and mass transfer**, Pennsylvania, n. 47, p. 925-936, 2004.

SALINAS, Carlos T. **Formação de Gelo em Placa Plana**. 1996. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

STOECKER, W.F. How the frost Formation on Coils Affects refrigeration Systems. **Refrigerating Engineering**, v. 65, n.2 p. 42-46, 1957.

STOECKER, J. W., & Jones, J. W. (1985). *Refrigeração e Ar Condicionado*. McGraw Hill.

TAHAVVOR, A. et al. Modeling of frost growth on a horizontal circular cylinder under natural convection using fractal geometry analysis. **IJST, transactions of mechanical engineering**, Islamic republic of iran, v. 38, p. 1-8, 2014.

TAO, Y.X. et al. A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate. **International journal of heat and mass transfer**, Saskatoon, Canada, v. 36, n. 2, p. 353-363, 1993.

TAO, Y.X. et al. Characteristics of Frost Growth on a Flat Plate During the Early Growth Period. **ASHRAE Transactions**, Chicago, Illinois, v. 99, p. 746-753, 1992.

TUDOR, V.; OHADI, M. The effect of stationary and sweeping frequency ac electric fields on frost crystal removal on a cold plate. **International journal of refrigeration**, Usa, n. 29, p. 669-667, 2006.

WANG, C. et al. Some observations of the frost formation in free convection: with and without the presence of electric field. **International journal of heat and mass transfer**, Taiwan, v. 47, p. 3491-3505, 2004.

WANG, Feng et al. Visualization study of the effect of surface contact angle on frost melting process under different frosting conditions. **International journal of refrigeration**, Nanjing, china, n. 64, p. 143-151, 2016.

WHITAKER, S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying. **Advances in heat transfer - Academic Press**, New York, v. 13, p.119-203, 1977.

WU, X. et al. Visual and theoretical analyses of the early stage of frost formation on cold surfaces. **Journal of enhanced heat transfer**, Beijing, china, n. 14, p. 257-268, 2007.

ZHANG, Xiang; LI, Xin; CHEN, Min. Role of the electric double layer in the ice nucleation of water droplets under an electric field. **Atmospheric research**, China, n. 178, p. 150-154, 2016.