

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE REZENDE DE LOYOLA

MODELO GENERALIZADO PARA FORMAÇÃO DE GEADA EM PLACAS PLANAS
E CANAIS DE PLACAS PARALELAS

CURITIBA

2013

FELIPE REZENDE DE LOYOLA

MODELO GENERALIZADO PARA FORMAÇÃO DE GEADA EM PLACAS PLANAS
E CANAIS DE PLACAS PARALELAS

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná como requisito para a obtenção do grau de mestre em engenharia mecânica, na área de concentração de Fenômenos de Transporte e Engenharia Térmica.

Orientador: Christian Johann Losso Hermes

CURITIBA
2013

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luciano e Maria Estela, e a toda a minha família por toda a compreensão e apoio de forma incondicional durante esses mais de dois anos de mestrado.

Ao meu orientador acadêmico, Prof. Christian J. L. Hermes pela dedicação e competente orientação durante todo o trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora pela disposição para a avaliação do trabalho.

A minha namorada Beatriz por toda a paciência, amor, companheirismo e dedicação nos momentos em que mais precisei nesse longo período de mestrado.

Aos meus amigos do LTT pela ajuda e companhia, em especial ao Mestre Eng. Valter Salles e a todos os alunos de Iniciação Científica que contribuíram de forma importante no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de longa data por toda a paciência e apoio em minhas decisões e apoio à minha decisão de realização do mestrado.

A todos os professores da pós-graduação, pelos conhecimentos passados durante todo o processo.

Ao PG-MEC pela empenho na organização da pós-graduação.

A UFPR pelo espaço e recursos para a realização do trabalho.

A CAPES e ao Ministério da Educação, pelo apoio financeiro.

A todos os que estiveram presentes em todo esse processo e que ajudaram de alguma forma no desenvolvimento deste trabalho.

Dedico este trabalho aos
meus pais, Luciano e Maria Estela,
aos meus irmãos e à minha
namorada Beatriz.

“A theory is the more impressive the greater the simplicity of its premises, the more different kinds of things it relates, and the more extended its area of applicability. Therefore the deep impression that Classical Thermodynamics made upon me. It is the only physical theory of universal content which I am convinced will never be overthrown, within the framework of applicability of its basic concepts”

Albert Einstein, circa 1903

RESUMO

A formação de uma camada de geada em evaporadores de sistemas de refrigeração diminui a taxa de transferência de calor neste componente não só devido a sua baixa condutividade térmica, mas também pela restrição da área de passagem de ar, causando uma perda de carga significativa que implica ou no aumento da potência de bombeamento ou na redução da vazão de operação. Em ambos os casos, há uma diminuição da capacidade de refrigeração do evaporador, tal que a energia consumida pelo sistema para garantir o mesmo efeito frigorífico é maior, pois o compressor precisa atuar por mais tempo. Existem diferentes tipos de evaporadores empregados em refrigeradores domésticos. Em todos eles, o escoamento de ar ocorre em canais formados ou pelas aletas (no caso de evaporadores aletados) ou pelas placas (no caso de evaporadores tipo placa-e-tubo). Dadas as limitações dos trabalhos existentes na literatura aberta para prever a formação de geada em evaporadores de refrigeradores domésticos, o presente trabalho pretende estudar, através de uma abordagem teórico-computacional, a formação da geada em canais formados por placas planas paralelas (i.e., uma geometria simples que representa os canais formados nos evaporadores) em condições de operação típicas de refrigeradores domésticos (e.g., temperatura de superfície, grau de super-resfriamento e velocidade de face). Para tanto, um modelo matemático para prever o escoamento de ar úmido com formação de geada em canais de placas paralelas foi desenvolvido usando os princípios fundamentais da transferência de massa, calor e quantidade de movimento. Uma equação evolutiva, de natureza semi-empírica, foi adicionalmente proposta para prever o adensamento da camada de geada ao longo do tempo. As previsões do modelo foram comparadas com dados experimentais da literatura, quando se constatou que as previsões para a espessura da geada apresentaram concordância satisfatória com os dados experimentais, com erros na banda de $\pm 10\%$. Uma análise de sensibilidade dos parâmetros que influenciam a transferência de calor e massa também é apresentada.

Palavras-Chave: Formação de geada. Escoamento em canais. Evaporadores. Refrigeradores domésticos.

ABSTRACT

Evaporator frosting is an undesired effect in household refrigeration appliances as it decreases the evaporator capacity not only due to its low thermal conductivity, but also because the airflow passage is restricted, thus requiring a higher pumping power. In order to keep the internal compartment temperature, the refrigeration system might run longer, thus increasing the amount of energy required to produce the same cooling effect. There are different kinds of evaporators adopted in domestic refrigerators. In all cases, the air flows through channels formed by fins or by plates. A judicious inspection of the open literature reveals the frost formation models are not suitable for the working conditions of household refrigerators. Therefore, the present work is aimed at studying, by means of a theoretical-computational approach, the frost formation in channel flows (e.g., a simple geometry that emulates the evaporator channels) in conditions typical of household refrigerators (e.g., surface temperature, super-cooling degree and face velocity). A mathematical model to predict the airflow of moist air under frosting conditions in channel flows was developed using the first-principles of mass, heat and momentum conservation. An evolving semi-empirical model was further proposed to predict the frost density over time. The model predictions were compared with experimental data obtained from the literature, where it was found that the predictions for the frost thickness showed satisfactory agreement with the experimental data, with all errors falling within a $\pm 10\%$ error band. A sensitivity analysis of the key parameters was also carried out.

Keywords: Frost formation. Channel flows. Evaporators. Household Refrigerators.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO MECÂNICA DE VAPOR.....	24
FIGURA 2 - EXEMPLOS DE FORMAÇÃO DE GEADA (A) E GELO (B)	24
FIGURA 3 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NO <i>INTERNATIONAL CONGRESS OF REFRIGERATION (IIR)</i>	28
FIGURA 4 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NA <i>INTERNATIONAL REFRIGERATION CONFERENCE AT PURDUE</i>	28
FIGURA 5 - MORFOLOGIA DOS CRISTAIS DE GELO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DO GRAU DE SUPERSATURAÇÃO.....	29
FIGURA 6 - ESQUEMAS DA NUCLEAÇÃO HOMOGÊNEA (A) E HETEROGÊNEA (B).	43
FIGURA 7 - GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO PARA A TEMPERATURA DE ORVALHO DE 0°C	45
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE NUCLEAÇÃO EM UMA CARTA PSICROMÉTRICA	46
FIGURA 9 - BALANÇO DE CALOR E MASSA DENTRO DA CAMADA DE GEADA	53
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM CRISTAL DE GELO	57
FIGURA 11 - AJUSTE DA CONSTANTE C PARA OS 24 PONTOS EXPERIMENTAIS DE HERMES <i>ET AL.</i> (2009).....	60
FIGURA 12 - RELAÇÃO FUNCIONAL ENTRE C E JA.....	62
FIGURA 13 - COMPARAÇÃO ENTRE AS DENSIDADES DA GEADA AJUSTADA E MEDIDA	63
FIGURA 14 - FORMAÇÃO DE GEADA EM CANAIS DE PLACAS PLANAS.....	66
FIGURA 15 - CANAL DIVIDIDO EM PEQUENOS VOLUMES DE CONTROLE	67
FIGURA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFUSIVIDADES AJUSTADA E MEDIDA	71
FIGURA 17 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CONDUTIVIDADES TÉRMICA AJUSTADA E MEDIDA.	72
FIGURA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE AS VISCOSIDADES ABSOLUTAS AJUSTADAS E MEDIDA.	73
FIGURA 19 - ANÁLISE DO REFINO DE MALHA ESPACIAL.....	78

FIGURA 20 - ANÁLISE DO INCREMENTO DE TEMPO.....	79
FIGURA 21 - ALGORITMO DE SOLUÇÃO PARA PLACA PLANA.....	80
FIGURA 22 - ALGORITMO DE SOLUÇÃO PARA CANAL.....	81
FIGURA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE HERMES <i>ET AL.</i> (2009) PARA O CASO (I) EM PLACA PLANA	85
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE HERMES <i>ET AL.</i> (2009) PARA OS CASOS (II) E (III) EM PLACA PLANA.....	85
FIGURA 25 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE HERMES <i>ET AL.</i> (2009) PARA OS CASOS (IV) E (V) EM PLACA PLANA.....	86
FIGURA 26 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL.....	88
FIGURA 27 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) EM CANAL	89
FIGURA 28 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CAMADA DE GEADA EM DIFERENTES POSIÇÕES DO CANAL NAS CONDIÇÕES DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL.....	91
FIGURA 29 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA FRONTEIRA DA GEADA PARA AS CONDIÇÕES DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL.....	92
FIGURA 30 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA GEADA AS CONDIÇÕES DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL.....	92
FIGURA 31 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA DENSIDADE DA GEADA PARA O TESTE 2 DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL.....	93
FIGURA 32 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) PARA T = 15 MINUTOS.....	94
FIGURA 33 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) PARA T = 30 MINUTOS.....	94

FIGURA 34 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) PARA T = 60 MINUTOS.....	95
FIGURA 35 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) PARA T = 120 MINUTOS.....	95
FIGURA 36 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA EM DIFERENTES POSIÇÕES PARA O CASO 2 DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) EM CANAL	97
FIGURA 37 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA ESPESSURA DA GEADA PARA O CASO 2 DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) EM CANAL.....	97
FIGURA 38 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA GEADA PARA O CASO 2 DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) EM CANAL.	98
FIGURA 39 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA POROSIDADE DA GEADA PARA O CASO 2 DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) EM CANAL.....	98
FIGURA 40 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) PARA EM T = 30 MINUTOS.....	99
FIGURA 41 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) PARA EM T = 60 MINUTOS.....	99
FIGURA 42 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) PARA EM T = 120 MINUTOS.....	100
FIGURA 43 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009) PARA EM T = 240 MINUTOS.....	100
FIGURA 44 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA	102
FIGURA 45 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA	103
FIGURA 46 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA.....	104

FIGURA 47 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DAS DIFERENTES TAXAS DE CALOR PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA ...	104
FIGURA 48 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA	105
FIGURA 49 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA	106
FIGURA 50 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA	106
FIGURA 51 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE.....	107
FIGURA 52 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE.....	108
FIGURA 53 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE .	108
FIGURA 54 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DAS DIFERENTES TAXAS DE CALOR PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE.....	109
FIGURA 55 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE.....	110
FIGURA 56 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE	110
FIGURA 57 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE.....	111
FIGURA 58 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	112

FIGURA 59 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	112
FIGURA 60 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	113
FIGURA 61 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DAS DIFERENTES TAXAS DE CALOR PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.	114
FIGURA 62 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DOS DIFERENTES FLUXOS DE MASSA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	114
FIGURA 63 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	115
FIGURA 64 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	115
FIGURA 65 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	116
FIGURA 66 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE	117
FIGURA 67 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE	117
FIGURA 68 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE.....	118
FIGURA 69 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE.	118
FIGURA 70 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS	119
FIGURA 71 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS.....	120

FIGURA 72 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS.....	120
FIGURA 73 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS	121
FIGURA 74 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS	121
FIGURA 75 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS	122

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRINCIPAIS TRABALHOS RELACIONADOS À FORMAÇÃO DE GEADA EM TROCADORES DE CALOR	30
TABELA 2 - PRINCIPAIS TRABALHOS DE NATUREZA EXPERIMENTAL.....	31
TABELA 3 - PRINCIPAIS TRABALHOS DE NATUREZA TEÓRICO-EXPERIMENTAL	32
TABELA 4 - DADOS EXPERIMENTAIS DE HERMES <i>ET AL.</i> (2009)	59
TABELA 5 - VALORES DA CONSTANTE C PARA AS 12 CONDIÇÕES DE HERMES <i>ET AL.</i> (2009).....	61
TABELA 6 - VALORES DO ERRO RMS DE COMPARAÇÃO DOS VALORES NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE HERMES <i>ET AL.</i> (2009).....	84
TABELA 7 - ERROS RMS OBTIDOS PELA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO COM DADOS DE LÜER E BEER (2000).	88
TABELA 8 - VALORES DO ERRO RMS DE COMPARAÇÃO DOS VALORES NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE LENIC <i>ET AL.</i> (2009).	89

NOMENCLATURA

Símbolos Romanos

Símbolo	Descrição	Unidades
A_b	Área da base da coluna de gelo	(m ²)
A_s	Área de troca de calor	(m ²)
A_c	Área da seção estrangulada	(m ²)
A_f	Área de face	(m ²)
A_{ag}	Área da interface embrião e meio envolvente	(m ²)
A_{gp}	Área da interface embrião e substrato	(m ²)
AR	Razão de aspecto	(adimensional)
c	Coeficiente da correlação para densidade da geada	(adimensional)
c_p	Calor específico a pressão constante	(J/kgK)
cells	Número de seções em que o canal é dividido	(adimensional)
D	Difusividade do vapor d'água no ar	(m ² /s)
D_{ef}	Difusividade efetiva do vapor d'água na geada	(m ² /s)
D_h	Diâmetro hidráulico	(m)
Ec	Número de Eckert	(adimensional)
f	Fator de atrito	(adimensional)
Fo	Número de Fourier	(adimensional)
G	Energia livre de Gibbs	(J)
Gr	Número de Grashof	(adimensional)
h_c	Coeficiente de transferência de calor	(W/m ² K)
H	Altura do canal	(m)

H	Entalpia	(J)
H_c	Espaçamento efetivo entre as placas do canal	(m)
Ha	Número de Hatta	(adimensional)
i_{sv}	Entalpia de dessublimação da água	(J/kg)
I	Taxa de formação de embriões	(1/m ² s)
I_0	Constante cinética de formação de embriões	(1/m ² s)
h_m	Coefficiente convectivo de transferência de massa	(kg/m ² s)
Ja	Número de Jakob modificado	(adimensional)
k	Constante de Boltzmann	(J/K)
k	Sub-índice referente a cada seção do canal	(adimensional)
k_{ef}	Condutividade térmica efetiva da geada	(W/mK)
k_i	Condutividade térmica do gelo	(W/mK)
k_a	Condutividade térmica do ar	(W/mK)
L	Comprimento da coluna de gelo	(m)
L	Comprimento do canal	(m)
Le	Número de Lewis	(adimensional)
M	Massa molar da água	(kg/mol)
m	Massa da geada	(g)
m''	Fluxo de massa	(kg/m ² s)
\dot{m}	Taxa de transferência de massa	(kg/s)
\dot{m}_w	Taxa total de transferência de massa de vapor d'água da fase vapor para a fase sólida	(kg/s)
n	Número de moléculas	(moléculas)
n_i	Número de moléculas presente em um embrião	(moléculas)
N_e	Número de embriões nucleados por volume	(1/m ³)

Nu	Número de Nusselt	(adimensional)
Nu_{D_h}	Número de Nusselt avaliado pelo diâmetro hidráulico	(adimensional)
Nu_L	Número de Nusselt avaliado para placa plana	(adimensional)
NUT	Número de unidades de transferência	(adimensional)
p	Pressão	(Pa)
P_∞	Pressão parcial do vapor	(Pa)
P_{atm}	Pressão atmosférica	(Pa)
$P_{sat}(T_e)$	Pressão parcial do vapor correspondente à temperatura de saturação do embrião	(Pa)
Pr	Número de Prandtl	(adimensional)
q''	Fluxo de calor	(W/m ²)
\dot{Q}_{sen}	Taxa de calor sensível	(W)
\dot{Q}_{lat}	Taxa de calor latente	(W)
\dot{Q}_{tot}	Taxa de calor total	(W)
r	Raio do embrião	(m)
r^*	Raio crítico do embrião	(m)
R	Constante dos gases ideais	(J/molK)
R_a	Constante do ar seco	(J/kgK)
Re	Número de Reynolds	(adimensional)
Re_c	Número de Reynolds de transição (crítico)	(adimensional)
Re_{D_h}	Número de Reynolds avaliado para diâmetro hidráulico	(adimensional)
Re_L	Número de Reynolds avaliado para placa plana	(adimensional)
S	Entropia	(J/K)
Sc	Número de Schmidt	(adimensional)
Sh	Número de Sherwood	(adimensional)

t	Tempo	(s)
t_{dif}	Tempo característico de difusão	(s)
t_{des}	Tempo característico de dessublimação	(s)
T	Temperatura	(K)
T_e	Temperatura do embrião	(K)
T_w	Temperatura do substrato	(K)
T_f	Temperatura da superfície da geada	(K)
T_a	Temperatura da corrente de ar	(K)
T_i	Temperatura do gelo	(K)
T_m	Temperatura de congelamento da água	(K)
$T_{sat}(\omega_a)$	Temperatura de orvalho	(K)
U	Energia interna	(J)
u_a	Velocidade da corrente de ar	(m/s)
u_c	Velocidade do ar na seção estrangulada	(m/s)
V	Volume	(m ³)
V_i	Volume ocupado pelo gelo	(m ³)
y	Direção perpendicular ao substrato	(m)
z	Altura de uma ilha de nucleação	(m)
W	Largura do canal	(m)

Símbolos Gregos

Símbolo	Descrição	Unidades
α	Coeficiente de dessublimação	(1/s)

α	Difusividade térmica	(m ² /s)
δ	Espessura da geada	(m)
γ_{ag}	Tensão superficial na interface embrião e meio envolvente	(J/m ²)
γ_{gp}	Tensão superficial na interface embrião e substrato	(J/m ²)
γ_{ap}	Tensão superficial na interface substrato e meio envolvente	(J/m ²)
γ_{ij}	Tensão superficial na interface embrião e geada	(J/m ²)
ΔG_{lat}	Energia livre de Gibbs latente	(J)
ΔG_{sup}	Energia livre de Gibbs de interação superficial	(J)
ΔG_{tot}	Energia livre de Gibbs total	(J)
ΔG_{tot}^*	Energia livre de Gibbs total crítica	(J)
Δt	Incremento de tempo	(s)
Δx	Incremento espacial na direção x	(m)
Δy	Incremento espacial na direção y	(m)
ΔT_{sup}	Grau de super-resfriamento da superfície	(K)
$\Delta \omega_{sup}$	Grau de supersaturação da superfície	(kg/kg)
ε	Porosidade	(adimensional)
ϕ_a	Umidade relativa do ar	(%)
μ	Viscosidade absoluta	(Pa s)
η	Coeficiente de sub-relaxação	(adimensional)
ρ	Densidade	(kg/m ³)
ρ_a	Densidade do ar seco	(kg/m ³)
ρ_f	Densidade da geada	(kg/m ³)
ρ_i	Densidade do gelo	(kg/m ³)

τ	Fator de tortuosidade	(adimensional)
σ	Grau de obstrução do canal	(adimensional)
θ	Ângulo de contato	(graus)
ω	Umidade absoluta	(kg _{água} /kg _{ar})
$\dot{\omega}$	Taxa de dessublimação	(m ² s)
ω_a	Umidade absoluta da corrente de ar	(kg _{água} /kg _{ar})
ω_f	Umidade absoluta na temperatura da superfície da geada	(kg _{água} /kg _{ar})
$\omega_{sat}(T_e)$	Umidade absoluta na temperatura de saturação do embrião	(kg _{água} /kg _{ar})
$\omega_{sat}(T_w)$	Umidade absoluta na temperatura de saturação do substrato	(kg _{água} /kg _{ar})
$\omega_{sat}(T_f)$	Umidade absoluta na temperatura de saturação da superfície	(kg _{água} /kg _{ar})

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 CONTEXTO GERAL.....	23
1.2 LITERATURA.....	27
1.3 OBJETIVOS.....	38
1.4 METODOLOGIA.....	39
1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	40
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
2.1 NUCLEAÇÃO.....	41
2.2 CRESCIMENTO.....	46
2.3 ADENSAMENTO.....	47
2.4 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	49
3 MODELO MATEMÁTICO	50
3.1 GENERALIDADES.....	50
3.2 MODELO DE CRESCIMENTO E ADENSAMENTO.....	51
3.3 BALANÇO DE CALOR E MASSA NA CAMADA DE GEADA.....	52
3.4 EQUAÇÃO EVOLUTIVA PARA A DENSIDADE DA GEADA.....	56
3.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NA SUPERFÍCIE.....	64
3.5.1 Placas Planas.....	64
3.5.2 Canais de Placas Planas Paralelas.....	65
3.6 CÔMPUTO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.....	71
3.6.1 Propriedades Termofísicas do Ar.....	71
3.6.2 Propriedades Termofísicas do Meio poroso.....	74
3.7 Síntese do Modelo Matemático.....	75
4 MÉTODO DE SOLUÇÃO	76
4.1 GENERALIDADES.....	76
4.2 LAÇO ITERATIVO ESPACIAL.....	76
4.3 LAÇO TEMPORAL.....	77
4.4 REFINO DE MALHA E INCREMENTO DE TEMPO.....	78
4.5 ALGORITMO DE SOLUÇÃO.....	79
4.6 SÍNTESE DO MÉTODO DE SOLUÇÃO.....	82
5 RESULTADOS	83
5.1 VERIFICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	83
5.1.1 Placa Plana.....	83

5.1.2 Canal	86
5.2 RESULTADOS.....	90
5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	101
5.3.1 Influência da Umidade	101
5.3.2 Influência da Temperatura de Superfície da Placa Fria	106
5.3.3 Influência do Super-resfriamento	111
5.3.4 Influência da Velocidade	116
5.3.5 Influência do Espaçamento do Canal	119
5.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	122
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	123
6.1 CONCLUSÕES FINAIS	123
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO GERAL

A refrigeração é a ciência responsável pelo resfriamento de corpos e fluidos para temperaturas inferiores às disponíveis em um dado local e instante (GOSNEY, 1982). Entre suas aplicações principais destacam-se o processamento e a conservação de alimentos, foco da refrigeração comercial e doméstica, responsáveis por uma significativa parcela global do consumo da energia elétrica produzida. (SILVA *et al.* 2011a).

A refrigeração é viabilizada pelo uso de meios artificiais, em que se destacam os princípios de refrigeração por compressão mecânica de vapor, refrigeração por absorção e refrigeração termoelétrica, sendo a primeira a mais empregada comercialmente. A refrigeração por compressão mecânica de vapor se baseia no ciclo Rankine reverso, ilustrado na Figura 1, em que o calor é retirado do meio a ser resfriado através da evaporação de uma substância volátil a baixa pressão e temperatura e, então, descartado para o ambiente através da condensação do fluido refrigerante, que pode, desta forma, ser reaproveitado no processo.

Entre o evaporador e o condensador existem dois outros componentes: o compressor e o dispositivo de expansão. Enquanto o primeiro é responsável por aspirar refrigerante do evaporador e descarregá-lo no condensador através da conversão de energia elétrica em entalpia, o dispositivo de expansão tem o papel de reduzir a pressão do refrigerante entre o condensador e o evaporador, o que ocorre de forma irreversível.

Em aplicações de refrigeração para preservação de alimentos, tais como a doméstica, a comercial e a industrial, é comum que o evaporador opere com temperaturas de evaporação bastante baixas, criando condições propícias à formação de gelo e geada naquelas aplicações em que o meio a ser resfriado é composto por ar úmido. (KNABBEN *et al.*, 2011; SILVA *et al.* 2011b).

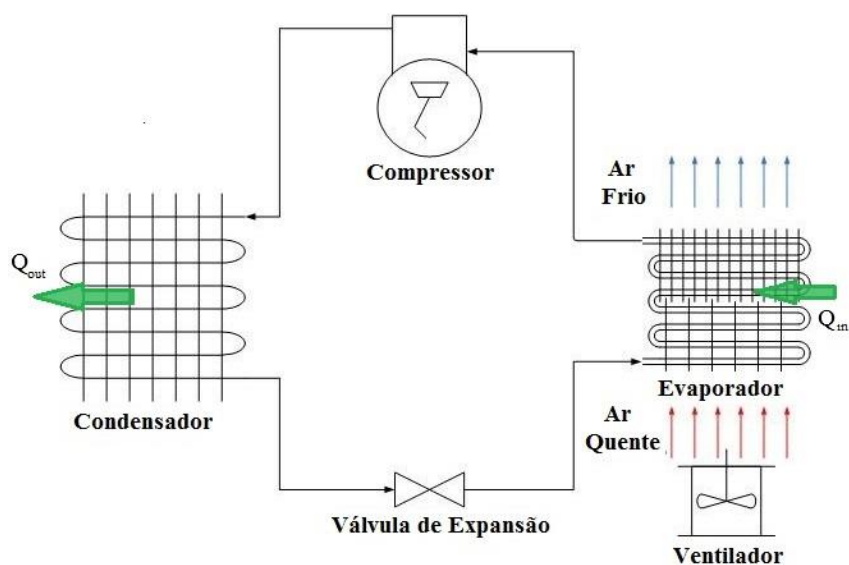


FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO MECÂNICA DE VAPOR

Enquanto o gelo é definido como água no estado sólido obtido por um processo de condensação seguido de solidificação, a geada consiste em um meio poroso, composto por cristais de gelo e ar úmido, formado pela dessublimação do vapor d'água presente no ar (PIUCCO, 2008). No caso dos evaporadores de refrigeradores domésticos, em que as temperaturas de evaporação são mais baixas, verifica-se a presença da geada (KNABBEN, 2010), enquanto o gelo é mais comum em aplicações com temperaturas de evaporação mais elevadas (SILVA *et al.*, 2011b). A temperatura de evaporação é apenas um dos fatores determinantes do processo de formação de gelo ou geada, que também depende do grau de supersaturação do ar úmido. A Figura 2 (a) ilustra a formação de geada sobre as superfícies de um evaporador, enquanto a Figura 2 (b) mostra a formação de gelo sobre a borda de uma superfície aerodinâmica.



FIGURA 2 - EXEMPLOS DE FORMAÇÃO DE GEADA (A) E GELO (B)

Para que um refrigerador doméstico seja classificado como frost-free, a presença de gelo e geada deve ocorrer preferencialmente no evaporador, embora haja formação (indesejada) de gelo e geada nas superfícies internas de alguns refrigeradores (PIUCCO *et al.*, 2011). A formação de gelo e geada ocorre não só porque a temperatura de evaporação é baixa, mas também porque a umidade do ar que circula nos compartimentos refrigerados permanece em níveis elevados, seja pela evaporação de água dos alimentos armazenados, seja pela constante abertura de portas ou pela infiltração de ar úmido através das gaxetas. (BORGES, 2013).

De acordo com a legislação e a normalização internacional em vigor (IEC 62552, 2007), o projeto de refrigeradores exige temperaturas de evaporação abaixo de -6°C (1 estrela), -12°C (2 estrelas) ou -18°C (3 estrelas). Caso a temperatura de orvalho do ar na entrada do evaporador seja superior a esse valor e exista uma diferença de umidade suficientemente grande entre o ar e a superfície fria, ocorrerá a formação e o acúmulo de gelo e/ou geada sobre a superfície do evaporador.

Na grande maioria das aplicações de refrigeração existe uma condição de operação propícia ao acúmulo de gelo e/ou geada nas superfícies das aletas e dos tubos do evaporador. Este componente é geralmente dimensionado prevendo-se a possibilidade da formação de geada e, por isso, possui meios para realizar o degelo. Se não houvesse o degelo, a taxa de acúmulo de geada reduziria a capacidade de resfriamento do evaporador devido à sua baixa condutividade térmica e à obstrução da passagem de ar, o que não só elevaria as temperaturas internas do produto como também o consumo de energia.

No Brasil, o setor doméstico responde por 26% do consumo da energia elétrica produzida, dos quais os refrigeradores e freezers são responsáveis por 27% (PROCEL GEM, 2009). Dada a participação da refrigeração doméstica no consumo total de energia elétrica no Brasil, em torno de 7%, qualquer medida que vise aumentar a eficiência e diminuir os custos operacionais dos refrigeradores terá grande impacto na sociedade em geral. Por esse motivo, medidas cada vez mais rigorosas vem sendo empregadas para aumentar a eficiência dos refrigeradores, seja por iniciativa do setor produtivo ou por regulamentação governamental.

Como exemplos de medidas de órgãos governamentais tem-se a Comissão Européia de Energia que decidiu, em 2007, como um dos planos para uma economia de baixo carbono, por reduzir o consumo energético em 20% até 2020. Em 2011, essa mesma comissão decidiu também por reduzir o consumo energético em 30% até 2050

(EC, 2009). Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) e o Departamento de Energia (DOE) lançaram, em 1992, o programa Energy Star, que dá isenção tributária a empresas que coloquem no mercado produtos energeticamente eficientes. Em 2009 foram divulgados alguns resultados do programa, como por exemplo: a economia de \$17 bilhões de dólares em energia elétrica (ENERGY, 2009).

No Brasil, existe desde 1985 o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), cuja missão é “promover eficiência energética, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população e eficiência dos bens e serviços, reduzindo os impactos ambientais” (PROCEL GEM, 2009). Em 1993 foi instituído o selo Procel, que orienta o consumidor a adquirir produtos mais eficientes. Também foi instituída a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – ENCE, que indica o consumo de energia elétrica e a faixa de eficiência do produto.

Neste contexto, o presente trabalho pretende avançar o conhecimento existente sobre a formação de geada em evaporadores de refrigeradores domésticos a fim de contribuir para o desenvolvimento de produtos mais eficientes. A literatura aberta, embora rica em estudos teóricos e experimentais direcionados à formação de geada em placas planas paralelas (SAMI e DUONG, 1989; NA e WEBB, 2004(a,b); HERMES *et al.*, 2009) e em evaporadores de sistemas de refrigeração (OGAWA *et al.*, 1993; LEE *et al.*, 2004; KNABBEN *et al.*, 2011), carece de modelos mais generalizados que sejam independentes de informações puramente empíricas para o cômputo das propriedades da geada, particularmente da densidade.

Dadas as limitações encontradas na literatura aberta, o presente trabalho tem seu foco voltado ao estudo da formação de geada em canais de placas planas paralelas, que representam a geometria encontrada nas aletas dos evaporadores de refrigeradores domésticos, em condições de operação tipicamente encontradas em tais aplicações, em que os cristais de geada possuem a forma de agulhas e colunas. (PIUCCO, 2008; SILVA, 2012).

Pretende-se, portanto, avançar um modelo semi-empírico que forneça uma equação evolutiva para a densidade da geada e que possa ser usada, juntamente com os princípios fundamentais da transferência de calor, de massa e de quantidade de movimento, para prever o crescimento de uma camada não-uniforme e não-homogênea de geada ao longo de canais de placas paralelas. Assim, espera-se estabelecer a base teórica tanto para o desenvolvimento de modelos mais sofisticados para determinar a distribuição de geada em evaporadores domésticos, tornando

possível o projeto de sistemas de degelo mais eficientes, como para uma correlação generalizada para a densidade de geada, que é indubitavelmente o principal aspecto limitante dos modelos atuais de crescimento e adensamento de geada em superfícies. (HERMES, 2012).

É importante enfatizar que a formação de gelo e geada em superfícies não é um problema exclusivo à refrigeração. A formação de gelo sobre a borda de superfícies aerodinâmicas, tais como asas, estabilizadores e tubos de Pitot afetam a segurança e estabilidade de aeronaves. Devido à dificuldade e, principalmente, aos custos associados à realização de ensaios experimentais de formação de gelo em aeronaves, os modelos computacionais aparecem como uma solução confiável e de menor custo (SILVEIRA, 2006).

1.2 LITERATURA

O estudo da formação de geada é relativamente recente e os resultados obtidos têm sido amplamente discutidos. A Figura 3 e a Figura 4 resumem o número de publicações sobre geada e degelo nas edições mais recentes dos principais congressos da comunidade de refrigeração, o *IIR International Congress of Refrigeration* e o *International Refrigeration Conference at Purdue*. Em ambos, observa-se um número crescente de artigos publicados sobre formação de geada, principalmente em trocadores de calor, o que leva à conclusão de que a literatura de formação de geada ainda está sendo formada.

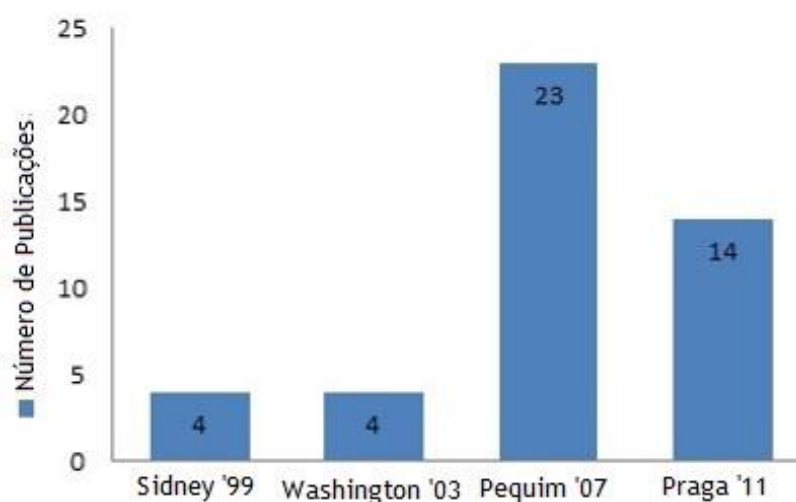


FIGURA 3 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NO *INTERNATIONAL CONGRESS OF REFRIGERATION (IIR)*

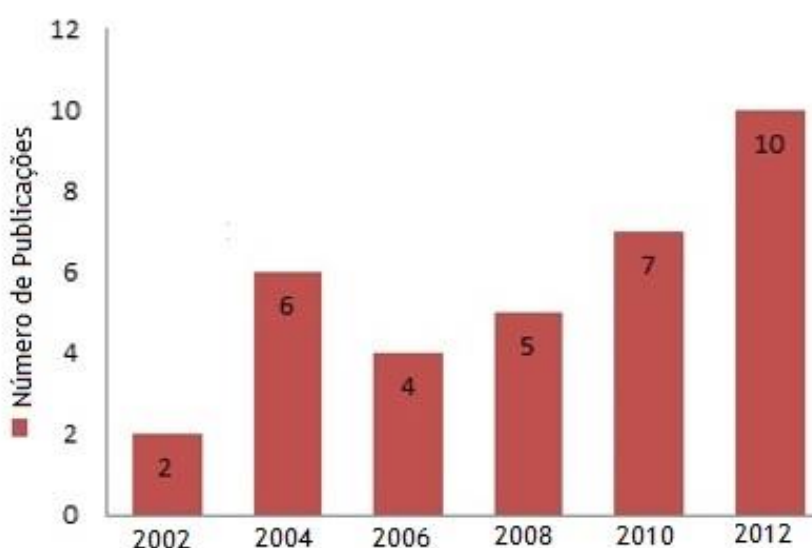


FIGURA 4 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NA *INTERNATIONAL REFRIGERATION CONFERENCE AT PURDUE*

Os principais estudos relacionados à formação de geada em trocadores de calor tratam de modelos simplificados para a previsão do crescimento e adensamento da geada, sendo que a grande maioria se baseia em informações empíricas para as propriedades termofísicas da camada de geada, tais como a densidade e a condutividade térmica. As propriedades termofísicas da geada estão diretamente relacionadas à morfologia dos cristais de gelo, que depende essencialmente das condições de operação, ou seja, da temperatura do substrato e grau de supersaturação, o qual é definido como a diferença de umidade entre a superfície do substrato e o ar.

A geada que é formada em evaporadores aletados, tipicamente empregados em refrigeradores domésticos, em que a temperatura de evaporação está em torno de -30°C , é composta principalmente por cristais na forma de colunas, como observado pela faixa de temperatura na Figura 5, que conferem à geada uma menor densidade.

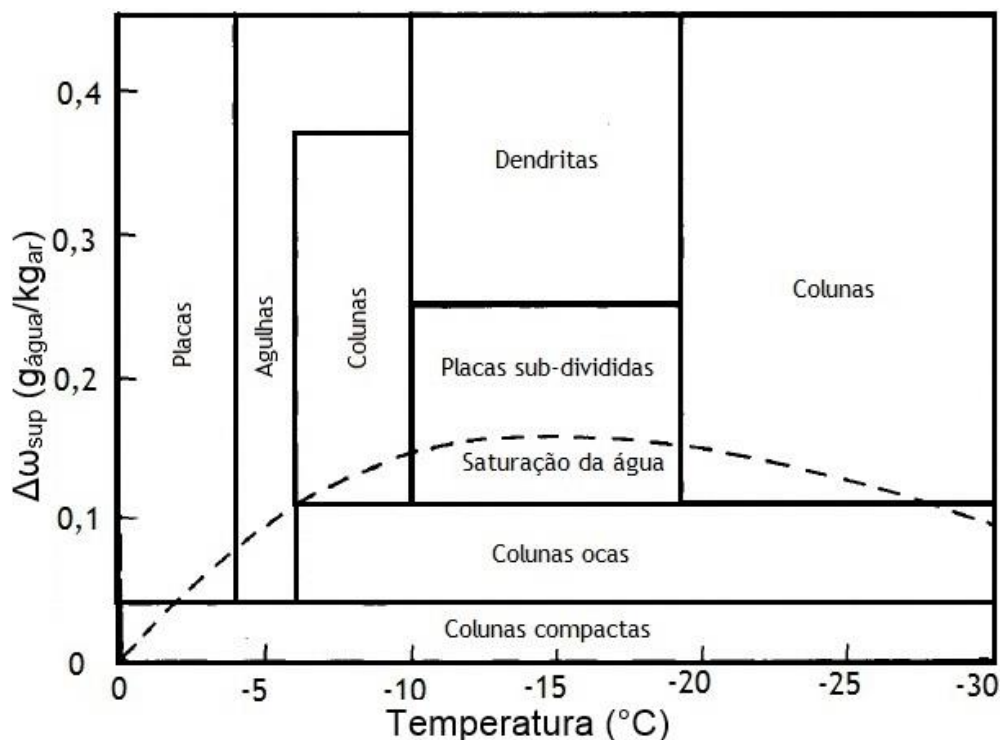


FIGURA 5 - MORFOLOGIA DOS CRISTAIS DE GELO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E DO GRAU DE SUPERSATURACÃO
Fonte: Adaptado pelo autor, a partir de Piucco (2008)

As principais características dos trabalhos de formação de geada em trocadores de calor estão resumidas na Tabela 1.

Os estudos relacionados aos aspectos fundamentais da formação de geada em geometrias simplificadas, tais como placas planas, canais de placas planas paralelas e feixe de tubo cilindros, têm sido desenvolvidos com o objetivo de avançar no entendimento dos fenômenos físicos de nucleação, crescimento e adensamento que regem a formação da camada de geada. De uma maneira simples, os principais trabalhos experimentais estão sumarizados na Tabela 2.

TABELA 1 - PRINCIPAIS TRABALHOS RELACIONADOS À FORMAÇÃO DE GEADA EM TROCADORES DE CALOR

Autor	Origem	Aplicação	Abordagem	Ventilador	Validação
Stoecker (1957)	EUA	Tubo aletado	Experimental	Não	-
Kondepudi e O'Neal(1987)	EUA	Tubo aletado	Global	Não	Não
Rite e Crawford (1991)	EUA	Tubo aletado	Experimental	Não	-
Ogawa <i>et al.</i> (1993)	Japão	No-frost	Experimental	Não	-
Bejan <i>et al.</i> (1994)	EUA	No-frost	Global	Não	Sim
Radcenco <i>et al.</i> (1995)	EUA	No-frost	Global	Não	Não
Chen <i>et al.</i> (2000a,b)	Canadá	Tubo aletado	Global	Sim	Não
Tassou <i>et al.</i> (2001)	Inglaterra	Tubo aletado	Experimental	Sim	-
Jhee <i>et al.</i> (2002)	Coréia do Sul	Tubo aletado	Experimental	Não	-
Chen <i>et al.</i> (2003)	Canadá	Termoelétrico	Global	Sim	Não
Seker <i>et al.</i> (2004)	Turquia	No-frost	Global	Não	Pobre
Tso <i>et al.</i> (2006)	Singapura	Tubo aletado	Distribuída	Não	Pobre
Xia <i>et al.</i> (2006)	EUA	Micro-canais	Global	Não	Sim
Aljuwayhel (2006)	EUA	Industrial	Distribuída	Sim	Sim
Yang <i>et al.</i> (2006)	Coréia do Sul	Tubo aletado	Distribuída	Não	Sim
Huang <i>et al.</i> (2008)	Taiwan	Tubo aletado	CFD	Sim	Não
Zhang e Hrnjak (2009)	EUA	Tubo aletado	Experimental	Não	-
Lenic <i>et al.</i> (2009)	Croácia	Tubo aletado	CFD	Não	Sim
Waltrich <i>et al.</i> (2010)	Brasil	Tubo aletado	Global e Experimental	Sim	Sim
Silva <i>et al.</i> (2011 a,b)	Brasil	Tubo aletado	Global e Experimental	Sim	Sim
Knabben <i>et al.</i> (2011)	Brasil	Tubo aletado	Distribuído e Experimental	Sim	Sim

TABELA 2 - PRINCIPAIS TRABALHOS DE NATUREZA EXPERIMENTAL

Autor	Origem	Variáveis Medidas							
		Esp.	Massa	Vel.	Temp. Sup.	Temp. Ar	Umidade	Âng. contato	Rugosidade
Cheng e Shiu (2002)	Taiwan	X		X	X	X	X		
Na e Webb (2003)	EUA				X	X	X	X	
Lee <i>et al.</i> (2004)	Coréia S.	X	X	X	X	X	X	X	
Lee <i>et al.</i> (2005)	Coréia S.	X	X	X	X	X	X	X	
Liu <i>et al.</i> (2005)	China	X			X	X	X		
Liu <i>et al.</i> (2006a,b)	China	X			X	X	X	X	
Wu <i>et al.</i> (2007)	China	X			X	X	X		
Piucco (2008)	Brasil	X	X	X	X	X	X	X	X

Além dos trabalhos experimentais, os processos de crescimento e adensamento da geada têm sido estudados através de modelos matemáticos desenvolvidos com base nos princípios fundamentais da transferência de calor e de massa, além das informações empíricas para a densidade e a condutividade térmica da geada. Alguns dos principais estudos teóricos com foco na formação de geada disponíveis na literatura são listados na Tabela 3.

O'Neal (1982) foi um dos primeiros a modelar o processo formação de geada. Ele desenvolveu um modelo teórico baseado nas equações de conservação da massa, energia e quantidade de movimento para prever o crescimento e adensamento da geada em canais de placas planas paralelas, utilizando dados empíricos para as propriedades do ar úmido e da geada, tais como a difusividade do vapor d'água no ar a tortuosidade da geada. A temperatura e umidade absoluta na superfície da geada foram obtidas através das equações de difusão de calor e massa dentro da camada de geada. O modelo necessitava de condições iniciais de espessura e densidade da geada e não foi validado contra dados experimentais.

TABELA 3 - PRINCIPAIS TRABALHOS DE NATUREZA TEÓRICO-EXPERIMENTAL

Autor	Origem	Abordagem	Meio Poroso	Geometria	Condição inicial		Validação
					Espessura (mm)	Densidade (kg/m ³)	
O'Neal (1982)	EUA	Global	X	Canal	0,05	40	
Sami e Duong (1989)	Canadá	Global	X	Placa plana			X
Tao <i>et al.</i> (1993)	Canadá	Global		Placa placa	0,1	92,84	X
Le Gall e Grillot (1997)	França	1-D	X	Placa plana	0,1	25	X
Lee <i>et al.</i> (1997)	Coréia S.	Global		Placa plana			X
Ismail e Salinas (1999)	Brasil	1-D	X	Placa Plana	2,9	Mao <i>et al.</i> (1999)	X
Lüer e Beer (2000)	Alemanha	2-D	X	Canal		Variável	
Cheng e Cheng (2001)	China	Global		Placa plana		Hayashi <i>et al.</i> (1997)	X
Lee (2003)	Coréia S.	Global	X	Placa plana	0,02	40	X
Na e Webb (2004a)	EUA	1-D	X	Placa plana	0,02	30	X
Yang e Lee (2005)	Coréia S.	2-D	X	Placa plana	0,02	Variável	X
Lenic <i>et al.</i> (2009)	Croácia	2-D	X	Canal	0,02	30	X
Hermes <i>et al.</i> (2009)	Brasil	Global	X	Placa plana	0,001	Correlação própria	X
Cui <i>et al.</i> (2011)	China	2-D	X	Canal	0	Modelo nucleação	X
Hermes (2012)	Brasil	Global	X	Placa plana	0,001	Correlação própria	X

O trabalho de Sami e Duong (1989) desenvolveu um modelo unidimensional com base nos conceitos fundamentais de transferência de calor e massa com o objetivo de prever a espessura e a densidade da geada formada sobre as superfícies planas ao longo do tempo. As simulações foram realizadas variando alguns parâmetros de teste como a temperatura, a umidade e a velocidade de face do ar, além da temperatura de superfície. Os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais de dois outros trabalhos, onde uma razoável concordância foi observada. Como as condições iniciais do modelo não foram reportadas, os resultados numéricos apresentados pelos autores não podem ser reproduzidos.

Tao *et al.* (1993) formularam um modelo com base nos conceitos de difusão transiente de calor e massa em um meio poroso para prever o comportamento do

crescimento da camada de geada sobre uma placa plana. Foram investigadas as variações espaciais de densidade, taxa de adensamento da geada e temperatura de superfície ao longo do tempo. Segundo os autores, o uso de uma difusividade efetiva para o meio poroso melhora substancialmente a concordância dos resultados do modelo quando comparado com os resultados experimentais.

Le Gall e Grillot (1997), a exemplo de Tao *et al.* (1993), também desenvolveram um modelo para o crescimento e adensamento da geada ao longo do tempo utilizando os conceitos de difusão de calor e massa. Como grandes incertezas relativas ao transporte efetivo de massa no interior da camada de geada foram identificadas, um ajuste do modelo foi exigido para que os dados experimentais pudessem ser reproduzidos dentro de uma banda de erros de $\pm 10\%$.

Lee *et al.* (1997) desenvolveram um procedimento semi-analítico para calcular a massa de geada depositada em uma superfície plana ao longo do tempo, considerando a difusão molecular de água e a dessublimação do vapor d'água no interior da camada de geada. A transferência de massa foi expressa em termos de um coeficiente de absorção. A validação do modelo foi realizada contra dados experimentais obtidos por terceiros, onde pouca concordância foi observada. Os autores não mencionam as condições iniciais necessárias à integração temporal das equações diferenciais, o que dificulta a reprodução dos resultados.

Ismail e Salinas (1999) desenvolveram um modelo unidimensional baseado nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e espécies químicas para prever a temperatura, a espessura e a densidade da camada de geada formada em uma placa plana ao longo do tempo. Propriedades termofísicas da camada de geada foram estimadas através de correlações empíricas existentes na literatura. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais de terceiros, mas uma boa concordância não foi observada. O modelo então foi estendido para uma simulação de formação de geada em canais de placas planas paralelas, cujos resultados não foram comparados com dados experimentais.

Lüer e Beer (2000) desenvolveram um modelo bidimensional baseado nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e espécies químicas para prever a espessura da geada em canal de placas planas paralelas, variando diversas condições de operação, tais como: temperatura, velocidade e umidade do ar, e temperatura da superfície. O escoamento foi modelado como multifásico e multicomponente, de forma que as características físicas do meio poroso,

como a porosidade e a tortuosidade, foram determinadas analiticamente. As distribuições de porosidade e temperatura de geada na superfície foram utilizadas como valores iniciais do problema, de forma que o valor inicial de porosidade foi ajustado de acordo com as condições de simulação para a obtenção de melhores resultados. Os resultados foram validados com dados experimentais dos próprios autores onde uma boa concordância foi observada. Tal modelo, contudo, exige um altíssimo tempo computacional, sendo inviável para simular a formação de geada ao longo de um evaporador como um todo.

Cheng e Cheng (2001) desenvolveram uma metodologia empírica para prever o crescimento e o adensamento da geada ao longo do tempo em placa plana. Para tanto uma correlação empírica para a densidade, baseada na temperatura da superfície da geada, foi empregada. O modelo foi validado com dados experimentais obtidos de outros autores, quando uma concordância razoável foi observada.

Lee (2003) realizou uma análise crítica dos modelos existentes para prever a formação de geada identificando as variáveis que afetam o crescimento e o adensamento da camada, tais como a temperatura, a velocidade e a umidade do ar, assim como a temperatura de superfície. Ele concluiu que não há um consenso quanto ao modo e a magnitude dos efeitos causados por cada variável sobre o processo de formação de geada.

Na e Webb (2004a), através de duas equações diferenciais parciais em conjunto com duas equações diferenciais ordinárias, desenvolveram um modelo para prever o crescimento e o adensamento da geada. O modelo foi resolvido numericamente, de forma que um considerável esforço computacional foi exigido. Diversos ajustes foram necessários para que o modelo elaborado pelos autores tivesse uma concordância na faixa de $\pm 15\%$ com dados experimentais também obtidos pelos autores.

Yang e Lee (2005) desenvolveram um modelo de escoamento bidimensional baseado nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e espécies químicas. Esse modelo, resolvido numericamente através das técnicas de dinâmica dos fluidos computacional, é capaz de prever as propriedades físicas da geada, tais como a espessura e a densidade, e os fluxos de transferência de calor e massa dentro da camada de geada formada em placa plana. Foram utilizadas correlações empíricas para o cálculo da densidade e da condutividade térmica da camada de geada. Os resultados foram gerados variando diversas condições de

operação, tais como a velocidade, a temperatura e a umidade do ar, assim como a temperatura da placa. Os dados foram validados com resultados experimentais obtidos na literatura e tiveram uma concordância na faixa de $\pm 10\%$.

Lenic *et al.* (2009) desenvolveram um modelo de formação de geada em placas planas paralelas utilizando as equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e espécies químicas, resolvidas através de um código computacional próprio. O escoamento foi modelado como multifásico e multicomponente, de forma que as propriedades físicas do meio poroso foram determinadas através de correlações empíricas. Valores iniciais de espessura e densidade de geada foram aplicados ao modelo, de modo que a evolução temporal da porosidade foi determinada pelo mesmo. Este foi validado com dados experimentais e a influência de parâmetros de operação, tais como a velocidade, umidade e temperatura do ar foi analisada.

Hermes *et al.* (2009) apresentaram uma análise teórico-experimental da formação de geada em placas planas horizontais em condições de operação encontradas tipicamente em refrigeradores domésticos. A influência de parâmetros de operação tais como a temperatura, a umidade e a velocidade do ar, assim como a temperatura de superfície sobre a taxa de crescimento da geada foi observada experimentalmente através de uma bancada projetada e construída especialmente para esta finalidade. Foi elaborado um modelo semi-empírico, que considera a camada de geada como um meio poroso, capaz de prever tanto a taxa de crescimento como a taxa de adensamento da camada de geada ao longo do tempo. O modelo foi validado com dados experimentais gerados pelos próprios autores, sendo capaz de prever a variação temporal da espessura da camada de geada dentro da faixa de erro de $\pm 10\%$.

Cui *et al.* (2011) resolveram o escoamento bidimensional entre placas planas paralelas com transferência de calor e massa através de um pacote comercial. Um modelo para prever a formação de geada foi realizado utilizando um modelo de nucleação no termo fonte da equação de conservação das espécies químicas. O escoamento foi modelado como multifásico e multicomponente, de forma que as características físicas do meio poroso, como a porosidade e a tortuosidade, foram determinadas teoricamente. Os resultados obtidos pelo modelo foram comparados com dados de Lenic *et al.* (2009) para somente uma condição de operação, apresentando uma concordância satisfatória.

Hermes (2012) desenvolveu um modelo algébrico baseado nos princípios básicos de transferência de calor e massa para prever a evolução temporal da espessura de uma camada de geada formada em placa plana. O modelo foi resolvido analiticamente de modo que uma expressão evolutiva da espessura da camada de geada no tempo é obtida, sendo função do número de Nusselt, da supersaturação e do super-resfriamento. O modelo foi validado com dados experimentais da literatura, onde uma boa concordância foi observada.

Os modelos de simulação do crescimento e adensamento de uma camada de geada empregam correlações empíricas para a densidade em função da temperatura da superfície da geada T_f (e.g. CHENG e CHENG, 2001; HERMES *et al.*, 2009; KNABBEN *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2011b) ou adotam um valor inicial arbitrário (geralmente $\sim 30 \text{ kg/m}^3$) como valor inicial da densidade da geada (LEE, 2003; LENIC *et al.*, 2009). Enquanto a aplicação de correlações empíricas limita a faixa de aplicabilidade do modelo, o uso de valores iniciais torna o modelo dependente do ajuste da condição inicial.

Apesar da importância da densidade da geada para os modelos de simulação, apenas algumas poucas correlações são encontradas na literatura. Em um trabalho pioneiro, Hayashi *et al.* (1977) propuseram uma correlação para a densidade da geada, ρ_f , como uma função da temperatura da superfície da geada T_f . A correlação é baseada no seguinte ajuste exponencial,

$$\rho_f = 650 \exp(0,277 T_f) \quad (1.1)$$

sendo válida para a faixa de $-18,6^\circ\text{C} \leq T_f \leq -5^\circ\text{C}$, com T_f em ($^\circ\text{C}$). Os testes foram conduzidos a temperatura ambiente, para velocidades do ar variando na faixa de 2 a 6 m/s.

Mao *et al.* (1999) propuseram uma abordagem adimensional para correlacionar a densidade da geada como função dos números de Reynolds e de Fourier, da diferença de temperatura adimensional, baseada nas temperaturas da superfície da geada, da superfície da placa fria T_w e do ponto triplo da água, assim como da umidade absoluta da corrente de ar ω_a . Essa correlação foi posteriormente revisitada por Yang e Lee (2004), que a modificaram como segue:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{Re}^{0,351} \text{Fo}^{0,311} \omega_a^{-0,368} \left(\exp\left(\frac{T_a - T_f}{T_a - T_w}\right) \right)^{2,4} \quad (1.2)$$

sendo válida para a faixa de $-36^\circ\text{C} \leq T_w \leq -15^\circ\text{C}$, $5^\circ\text{C} \leq T_a \leq 15^\circ\text{C}$, $3,22 \text{ g/kg} \leq \omega_a \leq 8,47 \text{ g/kg}$, e $1 \text{ m/s} \leq u_a \leq 2,5 \text{ m/s}$.

Para levar em conta a temperatura da superfície da placa, Hermes *et al.* (2009) introduziram um terceiro coeficiente na correlação proposta por Hayashi *et al.* (1977). A correlação resultante foi ajustada contra dados experimentais dos próprios autores, em que se obteve a seguinte expressão exponencial,

$$\rho_f = 207 \exp(0,266 T_f - 0,0615 T_w) \quad (1.3)$$

sendo válida para a faixa de $-15^\circ\text{C} \leq T_w \leq -5^\circ\text{C}$, $16^\circ\text{C} \leq T_a \leq 22^\circ\text{C}$, $0,5 \leq \phi_a \leq 0,8$, e $u_a = 0,7 \text{ m/s}$. Onde T_a é a temperatura do ar e u_a a velocidade da corrente de ar.

A correlação de Hayashi *et al.* (1977) foi também revisitada por Wang *et al.* (2012), que propuseram dois fatores multiplicativos para que as temperaturas do ar e da superfície da geada fossem levadas em conta,

$$\rho_f = 650 \exp(0,277 T_f) \cdot c_1 \cdot c_2 \quad (1.4)$$

onde,

$$c_1 = 0,70132 - 0,11346 T_w - 0,00203 T_w^2 \quad (1.5)$$

$$c_2 = 1,4333 - 0,17389 T_a + 0,00722 T_a^2 \quad (1.6)$$

sendo válida para a faixa de $-16^\circ\text{C} \leq T_w \leq -8^\circ\text{C}$, $11^\circ\text{C} \leq T_w \leq 19^\circ\text{C}$, $0,42 \leq \phi_a \leq 0,8$, e $u_a = 5 \text{ m/s}$.

Recentemente, Kandula (2012) propôs a seguinte correlação adimensional com base em dados experimentais extraídos de Hermes *et al.* (2009):

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 0,5 \left(\frac{T_f - T_w}{T_m - T_w} \right) \exp \left(- \left(0,376 + 1,5 \left(1 - \left(\frac{T_f - T_w}{T_m - T_w} \right) \right) \right) \right) \left(1 - \sqrt{\frac{Re}{Re_c}} \right) \quad (1.7)$$

onde T_m é a temperatura de congelamento da água, e $Re_c = 10^5$ é o valor do número de Reynolds para a transição de regime de escoamento laminar para turbulento.

Em todos os casos, as correlações para a densidade da geada carregam consigo um caráter empírico que limita sua aplicação à faixa dos dados experimentais empregados para obtê-las. Em adição, a maioria das correlações depende da temperatura da superfície da geada, de modo que não pode ser empregada sem que haja disponível um modelo para o cálculo deste parâmetro.

Todos os trabalhos mencionados, com exceção de Cui *et al.* (2011), fazem uso de informações empíricas para o cálculo da densidade e da condutividade térmica da geada

A análise da literatura disponível mostra que falta uma correlação, com base física, para a densidade da geada que possa ser utilizada como um modelo semi-empírico para o cálculo da densidade da geada em aplicações típicas de refrigeração doméstica, ou seja, onde há a formação de cristais de gelo na forma de colunas. Desenvolver uma correlação semi-empírica para o cálculo da densidade da geada é um dos objetivos deste trabalho.

1.3 OBJETIVOS

O foco do trabalho está voltado à análise numérica do escoamento de ar úmido com formação de geada em canais de placas planas paralelas. Como objetivo principal do trabalho pretende-se desenvolver um modelo generalizado que seja capaz de prever a distribuição espacial e a evolução temporal do crescimento de uma camada de geada ao longo do canal.

A revisão da literatura também mostra que, embora existam diversos modelos para a formação de geada em trocadores de calor, são raros aqueles que levam em conta a distribuição espacial da geada. Desenvolver modelos para a formação da

geada em canais que levem em conta tanto os efeitos espaciais como morfológicos da geada também é objetivo do presente trabalho.

A fim de atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos, que definem a metodologia de trabalho e dão um caráter inédito a ele, serão perseguidos:

- Elaborar um modelo totalmente teórico para prever o escoamento de ar úmido com transferência de calor e massa a fim de prever o crescimento não-uniforme e não-homogêneo de uma camada de geada ao longo de um canal de placas paralelas;
- Estabelecer, com base na teoria de crescimento e adensamento de geada, uma metodologia para computar a densidade da geada, ao longo do tempo, em uma ampla faixa de aplicação e sem dependência da temperatura da superfície da geada;
- Validar o modelo matemático contra dados experimentais confiáveis obtidos da literatura.

1.4 METODOLOGIA

O trabalho de modelagem consiste em desenvolver sub-modelos para a transferência de calor e massa tanto dentro da camada de geada como na superfície, sendo capazes de prever o crescimento e o adensamento da geada ao longo de um canal de placas paralelas. Os modelos são resolvidos tanto por métodos analíticos como por métodos numéricos, dependendo da natureza das equações envolvidas. Os resultados do modelo são validados contra dados experimentais da literatura aberta em placas planas (HERMES *et al.*, 2009) e canais (LENIC *et al.*, 2009; LÜER e BEER, 2000).

Uma equação evolutiva é proposta para a determinar a densidade da geada ao longo do tempo, enquanto um modelo de crescimento é proposto para determinar a espessura da camada de geada ao longo do canal.

Como metodologia de modelagem, procurou-se responder às seguintes perguntas:

- Quais as características do escoamento que se deseja simular?

- Que fenômenos considerar e quais simplificações adotar?
- Com que grau de confiabilidade o modelo é capaz de reproduzir a realidade?
- Qual a sensibilidade do modelo aos parâmetros físicos envolvidos?

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esse documento foi estruturado da seguinte maneira. O presente capítulo traz uma breve introdução ao escopo do trabalho, onde foram expostos a motivação, a revisão da literatura, os objetivos a serem perseguidos e a metodologia adotada. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária ao estudo de formação de geada em superfícies. O Capítulo 3 apresenta o modelo matemático desenvolvido a partir de conceitos fundamentais de escoamento com transferência de calor e massa, bem como os modelos para crescimento e adensamento temporal da camada de geada. O Capítulo 4, por sua vez, trata do método de solução do modelo matemático. No Capítulo 5 são discutidos os resultados do trabalho e os avanços obtidos, enquanto o Capítulo 6 sumariza as conclusões finais do trabalho e propõe recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 NUCLEAÇÃO

Quando há interação do vapor d'água presente no ar e um substrato sólido a uma temperatura inferior à temperatura de orvalho, há condensação do vapor na forma de gotas ou filme. Caso a temperatura da superfície seja menor que 0°C, o condensado pode sofrer solidificação. Assim, se a temperatura da superfície estiver abaixo do ponto de orvalho e se este for menor que 0°C, haverá a dessublimação do vapor d'água ocorrendo a nucleação de cristais de gelo, que constituem um meio poroso definido como geada. Enquanto o gelo é uma estrutura sólida e maciça, a geada é uma estrutura bastante porosa e irregular, formada por pequenos cristais de gelo preenchidos por ar úmido. O processo de formação de geada necessita de maior quantidade de energia para ser deflagrado, se comparado ao o processo de formação de gelo (condensação e solidificação), visto que necessita de um maior resfriamento a partir do ponto de orvalho (super-resfriamento). Por se tratar de um meio poroso, a geada não só possui uma densidade menor que a do gelo, como também uma condutividade térmica menor.

A nucleação é a primeira etapa no processo de formação de geada, sendo classificada como homogênea ou heterogênea (FLETCHER, 1970). A nucleação homogênea ocorre no núcleo da água sem interação com outras superfícies, enquanto a heterogênea requer a interação de moléculas da água com substratos sólidos (partículas em suspensão ou superfícies). A energia livre necessária para que ocorra a nucleação é dada por:

$$G = U + pV - TS \quad (2.1)$$

Escrevendo a equação acima na forma infinitesimal e fazendo uso da relação de Gibbs, $dU - TdS + pdV = 0$, obtém-se:

$$dG = Vdp - SdT \quad (2.2)$$

Para um gás ideal, $pV=nRT$, tal que a energia latente necessária para a mudança de fase de um embrião (aglomerado de moléculas de água), processo que ocorre a temperatura constante, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta G_{\text{lat}} = -n_i RT_e \ln\left(\frac{p_\infty}{p_{\text{sat}}(T_e)}\right) \quad (2.3)$$

onde $n_i = \rho_i V/M$ é o número de moléculas presentes em um embrião, ρ_i representa a densidade do gelo sólido, V o volume do embrião e M a massa molar da água, de forma que a equação anterior pode ser reescrita como segue, aproximando a razão das pressões por razão de umidades:

$$\Delta G_{\text{lat}} \cong -\frac{\rho_i V R T_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_e)}\right) \quad (2.4)$$

onde T_e é a temperatura do embrião, ω_a a umidade absoluta do ar e $\omega_{\text{sat}}(T_e)$ a umidade absoluta na temperatura de saturação do embrião. A energia total necessária para que a nucleação ocorra tem, além da parcela latente, uma parcela sensível que depende das interações energéticas que ocorrem na superfície:

$$\Delta G_{\text{tot}} = \Delta G_{\text{lat}} + \Delta G_{\text{sup}} \quad (2.5)$$

Considerando um embrião esférico de raio r , a energia livre total para que ocorra a nucleação homogênea, além da parcela latente representada pela equação (2.4), é dada por Piucco (2008):

$$\Delta G_{\text{tot}} = -\frac{\rho_i V R T_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_e)}\right) + \gamma_{\text{ag}} A_{\text{ag}} \quad (2.6)$$

onde $A_{\text{ag}} = 4\pi r^2$ e $V = 4\pi r^3/3$, como mostrado pela Figura 6, de modo que a equação (2.6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta G_{\text{tot}} = -\frac{4\pi}{3} r^3 \frac{\rho_i R T_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_e)}\right) + \gamma_{\text{ag}} 4\pi r^2 \quad (2.7)$$

Da equação (2.7), pode-se concluir que há um valor de raio crítico do embrião, r^* , que implica em um máximo valor de energia livre necessária para que ocorra a nucleação homogênea. Ele é obtido por:

$$\frac{d(\Delta G_{\text{tot}})}{dr} = 0 = -4\pi r^2 \frac{\rho_i RT_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_e)}\right) + \gamma_{ag} 8\pi r \quad (2.8)$$

tal que:

$$r^* = \frac{2\gamma_{ag}}{\frac{\rho_i RT_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_e)}\right)} \quad (2.9)$$

Voltando à equação (2.7):

$$\Delta G_{\text{tot}}^* = \frac{\frac{16\pi}{3} \gamma_{ag}^3}{\left[-\frac{\rho_i RT_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_e)}\right)\right]^2} \quad (2.10)$$

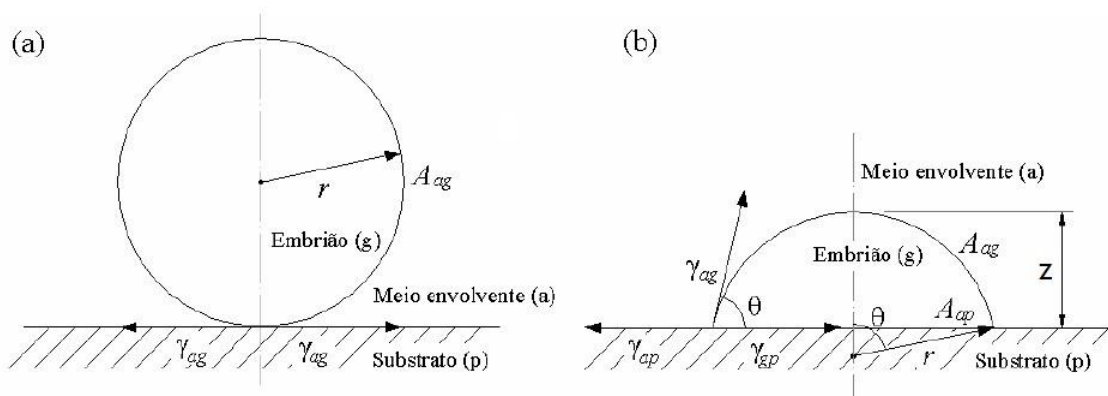


FIGURA 6 - ESQUEMAS DA NUCLEAÇÃO HOMOGÊNEA (A) E HETEROGÊNEA (B).
Fonte: Adaptado pelo autor, a partir de Piucco, 2008

Na nucleação heterogênea, existem agindo sobre o embrião tensões superficiais em três interfaces (ag, gp e ap), o que reduz tanto a sua área lateral como o seu volume, se comparado com a nucleação homogênea, o que adiciona um termo resultante do balanço de energia superficial na interface do substrato, com

temperatura T_w , reduzindo a barreira de energia que precisa ser transposta para que a nucleação ocorra (ver Figura 6):

$$\Delta G_{\text{tot}} = -\frac{\rho_i V R T_w}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_e)}\right) + \gamma_{\text{ag}} A_{\text{ag}} + (\gamma_{\text{gp}} - \gamma_{\text{ap}}) A_{\text{gp}} \quad (2.11)$$

Considerando que, no equilíbrio termodinâmico, o sistema tende a atingir uma condição de mínima energia livre, o embrião se ajusta à menor área superficial possível para um determinado volume, devido aos efeitos de superfície. Logo, é razoável assumir um formato esférico para o embrião no caso da nucleação homogênea, e um formato de calota esférica, no caso da nucleação heterogênea, como ilustra a Figura 6. (FLETCHER, 1970; HOBBS, 1973).

Através de um balanço de energia na interface é possível obter a relação do ângulo de contato da superfície $\theta = (\gamma_{\text{ap}} - \gamma_{\text{gp}}) \gamma_{\text{ag}}$. Como neste caso, $V = \pi z^2(3r-z)/3$, $A_{\text{ag}} = 2\pi r z$ e $A_{\text{gp}} = \pi r^2 \text{sen}^2(\theta)$, com $z = r(1 - \cos\theta)$, segue que:

$$\Delta G_{\text{tot}}^* = \frac{\frac{4\pi}{3} \gamma_{\text{ag}}^3}{\left[-\frac{\rho_i R T_w}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_e)}\right)\right]^2} (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) \quad (2.12)$$

A análise da equação (2.12) mostra que a variação tanto da temperatura da superfície do evaporador como da umidade absoluta presente no ar são fatores predominantes na nucleação da geada, que estão intimamente relacionados às condições de operação do refrigerador.

Volmer e Flood (1934), por observação experimental, perceberam que para que haja o desencadeamento de uma nucleação homogênea é preciso uma taxa mínima de 2,2 embriões/cm²s. Já para a nucleação heterogênea, Becker e Doering (1935) propuseram uma função exponencial para a taxa de nucleações de novos embriões,

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_{\text{tot}}^*}{k T_w}\right) \quad (2.13)$$

onde $I_0=10^{29} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ é a constante cinética de dessublimação e $k=1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ é a constante de Boltzmann.

Piucco (2008) resolveu as equações anteriores e expressou os resultados graficamente fazendo uso do conceito de grau de super-resfriamento, que é definido como a diferença entre a temperatura de orvalho, $T_{\text{sat}}(\omega_a)$, do ar e da superfície fria, T_w . Se o grau de super-resfriamento for grande o suficiente para superar a barreira proposta por Volmer e Flood (1934), ocorrerá a nucleação de geada. A Figura 7 traça os limites em que ocorre a nucleação de novos embriões de água e de geada em função do ângulo de contato ao qual associa o grau de super-resfriamento necessário para que haja a formação da geada. Como se observa na Figura 8 é possível associar o grau de super-resfriamento com a diferença de umidade absoluta ($\Delta(\omega_{\text{sup}})$), chamada de grau de supersaturação, em uma carta psicrométrica, de modo que há, para cada grau de supersaturação, um grau de super-resfriamento equivalente.

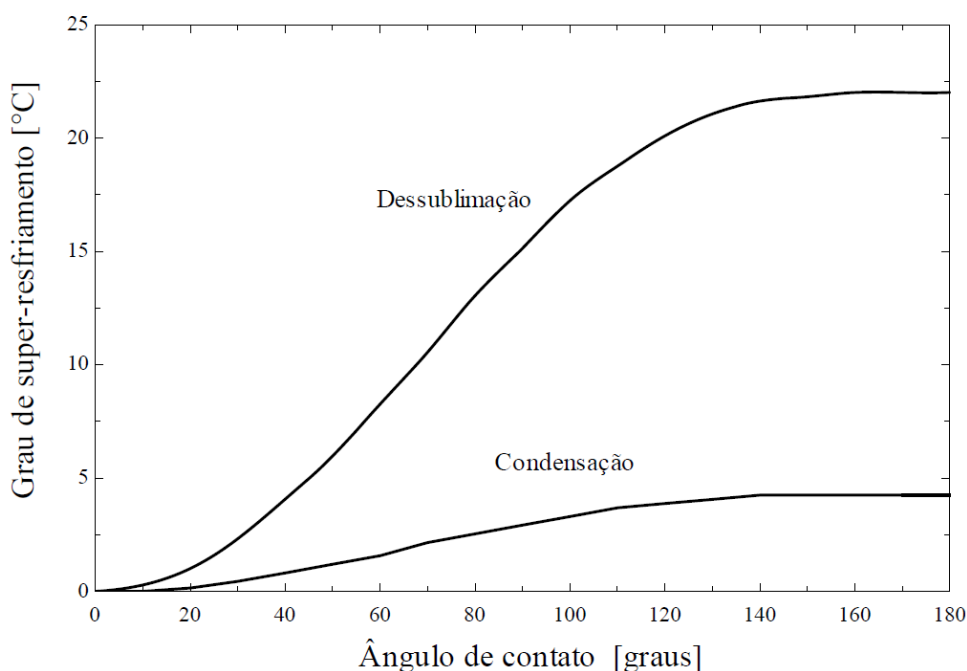


FIGURA 7 - GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO PARA A TEMPERATURA DE ORVALHO DE 0°C
Fonte: Piucco (2008)

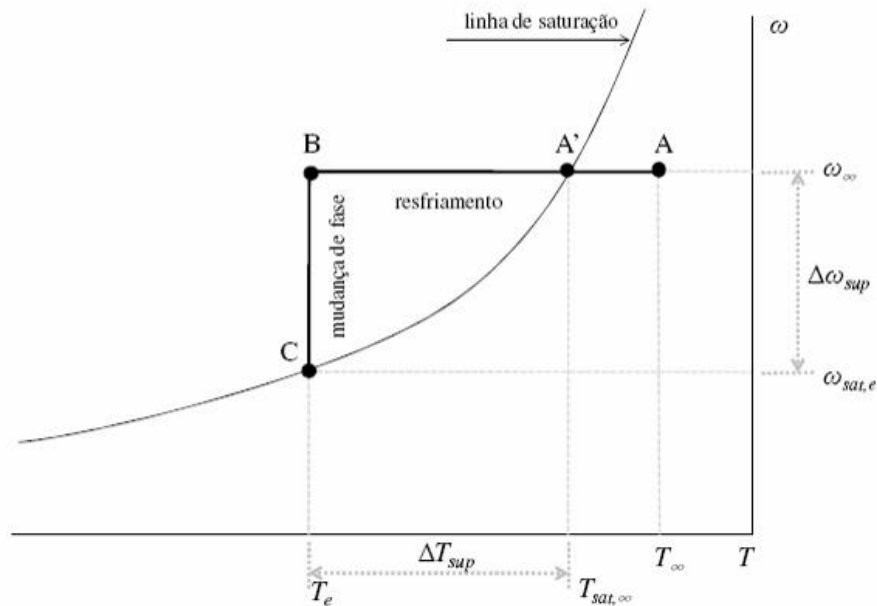


FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO DE NUCLEAÇÃO EM UMA CARTA PSICROMÉTRICA
Fonte: Piucco (2008)

2.2 CRESCIMENTO

Depois que a nucleação de embriões tem início, ocorre a adesão de novas moléculas gerando o crescimento de cristais de geada. Tais cristais crescem e adensam o meio poroso ao longo do tempo, devido à difusão de massa para dentro da camada.

Diferentemente do fenômeno da nucleação, o crescimento da geada é bidimensional, pois depende de sucessivas nucleações heterogêneas sobre a superfície dos cristais já formados (FLETCHER, 1970). Para um embrião de altura z e raio r , pode-se determinar a energia livre total necessária para uma nucleação sobre um cristal da seguinte forma,

$$\Delta G_{\text{tot}} = \pi r^2 z \frac{\rho_i R T_e}{M} \ln \left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_f)} \right) + \gamma_{\text{ag}} 2\pi r z \quad (2.14)$$

De maneira análoga ao processo de nucleação sobre um substrato, a energia livre de formação atinge seu valor máximo, ΔG_{tot}^* , para um raio mínimo do embrião, r^* , que é obtido derivando-se a equação anterior em relação ao raio e igualando a zero,

$$\frac{d(\Delta G_{\text{tot}})}{dr} = 2\pi r z \frac{\rho_i RT}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_f)}\right) + \gamma_{\text{ag}} 2\pi z = 0 \quad (2.15)$$

obtendo-se,

$$r^* = \frac{2\gamma_{\text{ag}}}{\frac{\rho_i RT}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_f)}\right)} \quad (2.16)$$

que fornece o seguinte ΔG_{tot}^* ,

$$\Delta G_{\text{tot}}^* = \frac{\pi z \gamma_{\text{ag}}^2}{\frac{\rho_i RT}{M} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat}}(T_f)}\right)} \quad (2.17)$$

Desconsiderando-se os efeitos de transporte de massa e de energia até o local de crescimento, a taxa de formação de embriões sobre cristais de geada pode ser estimada através da equação (2.13). Tal aproximação, contudo, tem-se mostrado muito restritiva (PIUCCO, 2008), de modo que a taxa de crescimento da geada será determinada através de uma abordagem macroscópica, baseada nos princípios de conservação de massa e energia. (HERMES *et al.*, 2009).

2.3 ADENSAMENTO

O crescimento irregular dos cristais de geada dá origem a um meio poroso onde o vapor d'água se difunde. Considerando a difusão como unidimensional e tratando a dessublimação como uma reação química homogênea de primeira ordem, pode-se analisar a distribuição de vapor no interior da camada de geada através da seguinte expressão. (BAEHR e STEPHAN, 1996),

$$\rho D_{\text{ef}} \frac{d^2 \omega}{dy^2} + \dot{\omega} = 0 \quad (2.18)$$

onde D_{ef} simboliza a difusividade efetiva do vapor d'água no meio poroso e $\dot{\omega}$ é o termo de dessublimação. Como a dessublimação do vapor d'água pode ser modelada como uma reação de primeira ordem, o termo de geração pode ser definido como uma função de um coeficiente de dessublimação, $\dot{\omega} = -\rho\alpha\omega$, com sinal negativo, indicando que o vapor d'água é transferido do ar úmido para o sólido.

Resolvendo analiticamente a equação (2.18) para uma condição de superfície impermeável em $y = 0$, ou seja, $\omega = \omega_{\text{sat}}(T_w)$ e $d\omega/dy=0$, e supondo α e D_{ef} constantes, tem-se como resultado a seguinte distribuição de umidade ao longo da camada de geada. (BAEHR e STEPHAN, 1996),

$$\omega = \omega_{\text{sat}}(T_w) \cosh \sqrt{\frac{\alpha \delta^2}{D_{\text{ef}}}} \quad (2.19)$$

onde δ é a espessura da camada de geada e o termo $\sqrt{\alpha \delta^2 D_{\text{ef}}^{-1}}$ é o número de Hatta, que elevado ao quadrado, representa a razão entre as escalas de tempo características de difusão, $t_{\text{dif}} = \delta^2 / D_{\text{ef}}$ e de dessublimação, $t_{\text{des}} = 1/\alpha$,

$$\text{Ha}^2 = \frac{t_{\text{dif}}}{t_{\text{des}}} = \frac{\alpha \delta^2}{D_{\text{ef}}} \quad (2.20)$$

O coeficiente de dessublimação é obtido em função da relação entre as umidades absolutas nas superfícies da geada e do substrato, como sugerido por Lee *et al.* (1997),

$$\alpha = \frac{D_{\text{ef}}}{\delta^2} \left[\text{arc cosh} \left(\frac{\omega_{\text{sat}}(T_f)}{\omega_{\text{sat}}(T_w)} \right) \right]^2 \Rightarrow \text{Ha} = \text{arc cosh} \left(\frac{\omega_{\text{sat}}(T_f)}{\omega_{\text{sat}}(T_w)} \right) \quad (2.21)$$

Deve-se notar que no início do crescimento δ é pequeno, de modo que o coeficiente de absorção possui um valor elevado, indicando uma alta taxa de crescimento. Após o crescimento da camada, o coeficiente α tende a diminuir como reflexo do aumento da resistência à difusão de massa.

2.4 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica mostra os fundamentos dos processos de formação de nucleação, crescimento e adensamento da camada de geada. Foi mostrado, através da teoria clássica da nucleação, em que condições pode-se deflagrar o processo de dessublimação do vapor d'água contido no ar úmido. Através de modelos existentes na literatura para o cálculo da espessura e densidade da camada de geada, mostrou-se que estes são fortemente dependentes de condições de operação existentes, *i. e.* super-resfriamento e temperatura de superfície.

3 MODELO MATEMÁTICO

3.1 GENERALIDADES

O modelo matemático proposto é apresentado neste capítulo, em que são utilizados os princípios fundamentais da Mecânica dos Fluidos e da Transferência de Calor e Massa para modelar os processos de crescimento e adensamento da camada de geada quando um escoamento de ar úmido se desenvolve tanto ao longo de uma placa plana como em um canal de placas planas paralelas isotérmicas.

O modelo, de um modo geral, tem como base as seguintes hipóteses simplificativas:

- Todos os fenômenos são modelados como quase-estáticos e unidimensionais, exceto o crescimento e adensamento da camada de geada;
- O ar úmido é modelado como fluido newtoniano e considerado uma mistura de gases ideais, já que a pressão parcial do vapor d'água é baixa em relação à pressão atmosférica. Assim as propriedades podem ser estimadas com base na psicrometria;
- Os efeitos de convecção natural são desconsiderados, face à baixa relação entre Gr/Re^2 ($\sim 10^{-2}$);
- A dissipação viscosa foi desprezada em virtude da baixa relação entre Ec/Re ($\sim 10^{-8}$);
- A pressão é uniforme no interior da camada; (HERMES *et al.*, 2009)
- O transporte de massa e energia para o meio poroso é totalmente difusivo, i.e. a geada foi considerada impermeável ao escoamento; (HERMES *et al.*, 2009)
- A analogia de Lewis para a transferência de calor e massa é aplicável, com $Le=1$ (HERMES, 2012);
- A espessura da camada de geada é considerada uniforme ao longo cada volume de controle.

3.2 MODELO DE CRESCIMENTO E ADENSAMENTO

O modelo de crescimento e adensamento se baseia em um balanço de massa na camada de geadas, dado por:

$$m'' = \frac{d}{dt} \int_0^{\delta} \rho \, dy \quad (3.1)$$

onde $m'' = h_m(\omega_a - \omega_f)$ é o fluxo de massa de vapor do ar úmido para o meio poroso, ρ_f é a densidade média da camada de geadas de espessura δ e h_m é o coeficiente convectivo de transferência de massa, que está relacionado ao coeficiente convectivo de transferência de calor, h_c , através da analogia de Lewis, dada por:

$$\frac{Nu}{Pr^{1/3}} = \frac{Sh}{Sc^{1/3}} \Rightarrow h_m = \frac{h_c}{c_p Le^{2/3}} \quad (3.2)$$

onde Le é o número adimensional de Lewis. Definindo a densidade média da geadas por,

$$\rho_f = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \rho \, dy \quad (3.3)$$

pode-se escrever,

$$\frac{d}{dt}(\delta \rho_f) = \rho_f \frac{d\delta}{dt} + \delta \frac{d\rho_f}{dt} \quad (3.4)$$

Na equação acima, enquanto o primeiro termo do lado direito representa a taxa de crescimento temporal da geadas, o segundo termo representa a taxa de adensamento da camada. Conhecendo-se o fluxo de massa total da geadas e a sua densidade, combina-se as equações (3.1) e (3.4) para se obter a taxa de crescimento da camada de geadas:

$$\frac{d\bar{\delta}}{dt} = \frac{m''}{\rho_f} - \frac{\bar{\delta}}{\rho_f} \frac{d\rho_f}{dt} \quad (3.5)$$

Através da seguinte integração temporal, a espessura da camada de geada pode ser obtida:

$$\bar{\delta}(t+\Delta t) = \bar{\delta}(t) + \int_0^t \left(\frac{m''}{\rho_f} - \frac{\bar{\delta}}{\rho_f} \frac{d\rho_f}{dt} \right) dt \quad (3.6)$$

Como o fluxo de massa de vapor d'água para dentro da camada depende do estado termodinâmico da superfície da geada, balanços de massa e de energia na camada de geada devem ser realizados para a determinação desta propriedade, como mostrado a seguir.

3.3 BALANÇO DE CALOR E MASSA NA CAMADA DE GEADA

Para calcular o estado termodinâmico na superfície da geada, balanços de massa de vapor e energia na camada de geada são realizados. Assim, aplicando-se o princípio da conservação de energia ao volume de controle ilustrado na Figura 10, ou seja, somando-se as parcelas sensível e latente, obtém-se:

$$q''_{y+\Delta y/2} - q''_{y-\Delta y/2} + (m''_{y+\Delta y/2} - m''_{y-\Delta y/2})i_{sv} = 0 \quad (3.7)$$

Dividindo-se ambos os lados por Δy , no limite onde $\Delta y \rightarrow 0$, obtém-se:

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{q''_{y+\Delta y/2} - q''_{y-\Delta y/2}}{\Delta y} + \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{(m''_{y+\Delta y/2} - m''_{y-\Delta y/2})i_{sv}}{\Delta y} = 0 \quad (3.8)$$

logo,

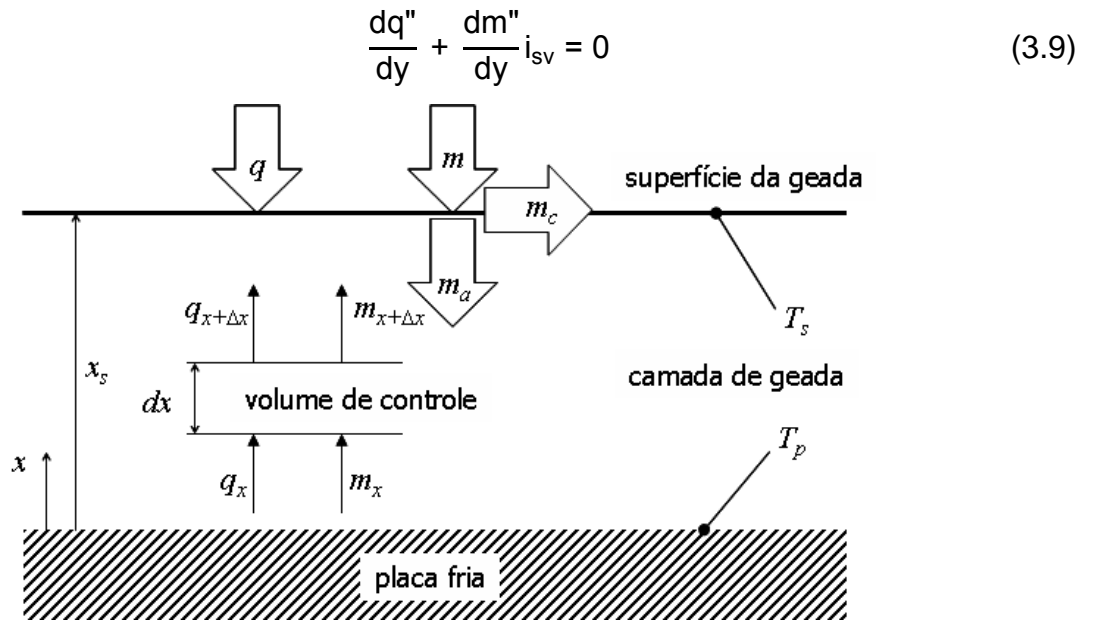


FIGURA 9 - BALANÇO DE CALOR E MASSA DENTRO DA CAMADA DE GEADA
 FONTE: Piucco, 2008

Ou seja, a variação do fluxo de calor sensível ao longo da espessura da camada de geada é igual à taxa com que o vapor d'água sofre dessublimação. A variação temporal do fluxo de massa de vapor d'água é obtida aplicando-se um o princípio de conservação da massa, tal que:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} \rho dy \right) = m''_{y-\Delta y/2} - m''_{y+\Delta y/2} \quad (3.10)$$

Dividindo ambos os lados por Δy , no limite onde Δy tende a zero, chega-se a:

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{m''_{y-\Delta y/2} - m''_{y+\Delta y/2}}{\Delta y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta y} \frac{d}{dt} \left(\int_{y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} \rho dy \right) \quad (3.11)$$

Sabendo que o termo a direita da equação acima corresponde à variação temporal da densidade da geada,

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta y} \frac{d}{dt} \left(\int_{y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} \rho dy \right) = \frac{d\rho_f}{dt} \quad (3.12)$$

e

$$\lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{m''_{y-\Delta y/2} - m''_{y+\Delta y/2}}{\Delta y} = -\frac{dm''}{dy} \quad (3.13)$$

logo,

$$\frac{dm''}{dy} = -\frac{d\rho_f}{dt} \quad (3.14)$$

Voltando ao balanço de energia da equação (3.9), obtém-se:

$$\frac{dq''}{dy} = \frac{d\rho_f}{dt} i_{sv} \quad (3.15)$$

Invocando as leis de Fick e de Fourier para difusão de massa e calor, respectivamente, no interior do meio poroso, tem-se:

$$m'' = -\rho D_{ef} \frac{d\omega}{dy} \quad (3.16)$$

$$q'' = -k_{ef} \frac{dT}{dy} \quad (3.17)$$

onde D_{ef} e k_{ef} são respectivamente a difusividade efetiva do vapor d'água na camada de geada e a condutividade térmica da geada, sendo ambas dependentes das características do meio poroso. Logo,

$$\frac{dm''}{dy} = -\rho D_{ef} \frac{d^2\omega}{dy^2} \quad (3.18)$$

$$\frac{dq''}{dy} = -k_{ef} \frac{d^2T}{dy^2} \quad (3.19)$$

Portanto, as variações da umidade e da temperatura no interior da camada de geada podem ser obtidas substituindo as equações anteriores nas expressões para dm''/dy e dq''/dy , tal que:

$$\rho D_{ef} \frac{d^2 \omega}{dy^2} = \frac{d\rho_f}{dt} \quad (3.20)$$

$$k_{ef} \frac{d^2 T}{dy^2} = - \frac{d\rho_f}{dt} i_{sv} \quad (3.21)$$

Considerando-se a superfície da placa impermeável, $\left. \frac{d\omega}{dy} \right|_{y=0} = 0$, e assumindo uma condição de saturação na superfície da geada, $\omega(y = \delta) = \omega_{sat}(T_f)$, a equação de conservação da massa pode ser resolvida. A equação de conservação da energia, por sua vez, é resolvida considerando-se a temperatura da placa prescrita e uniforme, ou seja, $T(y=0)=T_w$, bem como a condição de continuidade do fluxo de calor na superfície da geada:

$$k_{ef} \frac{dT}{dy} = q'' + \rho_f \frac{d\delta}{dt} i_{sv} \quad (3.22)$$

Uma vez que o estado termodinâmico da superfície da geada depende da pressão local, que é a pressão atmosférica ao nível do mar (101,325 kPa), da umidade absoluta, que é função apenas da temperatura em virtude da condição de saturação, e da temperatura local, esta grandeza passa a ser a única incógnita do problema. A temperatura local da camada de geada pode ser obtida a partir da integração da equação (3.21). Integrando-a uma vez obtém-se:

$$\frac{dT}{dy} = \frac{i_{sv}}{k_{ef}} \frac{d\rho_f}{dt} y + c_1 \quad (3.23)$$

Da condição de contorno na superfície da geada, obtém-se:

$$c_1 = \frac{q''}{k_{ef}} + \frac{i_{sv}}{k_{ef}} \left(\rho_f \frac{d\delta}{dt} \right) + \frac{i_{sv}}{k_{ef}} \left(\delta \frac{d\rho_f}{dt} \right) = \frac{q'' + m'' i_{sv}}{k_{ef}} \quad (3.24)$$

Integrando a equação (3.21) uma segunda vez, obtém-se:

$$T(y) = -\frac{i_{sv}}{k_{ef}} \frac{d\rho_f}{dt} \frac{y^2}{2} + c_1 y + c_2 \quad (3.25)$$

Da condição de contorno de temperatura constante na superfície da placa, obtém-se $c_2 = T_w$. Assim, a temperatura na superfície da geada é obtida fazendo-se $T_f = T(y = \delta)$:

$$T_f = T_w + \frac{q'' + m'' i_{sv}}{k_{ef}} \delta - \frac{i_{sv}}{k_{ef}} \left(\delta \frac{d\rho_f}{dt} \right) \frac{\delta}{2} \quad (3.26)$$

Assim, com a temperatura da camada de geada conhecida, obtém-se $\omega_f = \omega_{sat}(T_f)$ que, por sua vez, é utilizada no cálculo do fluxo de massa total, m'' . Como T_f depende de m'' na equação (3.26), um processo iterativo de cálculo deve ser empregado.

Em adição ao fluxo de massa de vapor d'água, necessita-se ainda de uma equação evolutiva para a densidade da geada para que a variação temporal da espessura da camada de geada possa ser determinada. Tal equação é proposta a seguir.

3.4 EQUAÇÃO EVOLUTIVA PARA A DENSIDADE DA GEADA

Como a densidade da geada depende tanto da densidade do ar como da do cristal de gelo, ela pode ser escrita da seguinte maneira, onde ε é a porosidade da camada de geada:

$$\rho_f = \rho_a \varepsilon + \rho_i (1 - \varepsilon) = \rho_i + (\rho_a - \rho_i) \varepsilon \approx \rho_i (1 - \varepsilon) \quad (3.27)$$

Tal que, a sua variação temporal é calculada por:

$$\frac{d\rho_f}{dt} = -\rho_i \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.28)$$

Substituindo as equações (3.27) e (3.28) na equação (3.5), obtém-se:

$$\rho_i(1-\varepsilon)\frac{d\delta}{dt} - \rho_i\delta\frac{d\varepsilon}{dt} = m'' \quad (3.29)$$

Rearranjando a equação anterior, pode-se obter a taxa de crescimento temporal da camada da seguinte forma:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\frac{m''}{\rho_i} + \delta\frac{d\varepsilon}{dt}}{1-\varepsilon} \quad (3.30)$$

A equação (3.30) mostra que o problema está em desenvolver um modelo evolutivo para a porosidade da geada. Uma vez que os cristais de geada formados em condições de supersaturação e superfície típicas possuem uma morfologia predominantemente formada por colunas (SILVA, 2012), o modelo evolutivo para a porosidade foi obtido considerando-se o seguinte balanço de energia em um único cristal de gelo, como mostra a Figura 10:

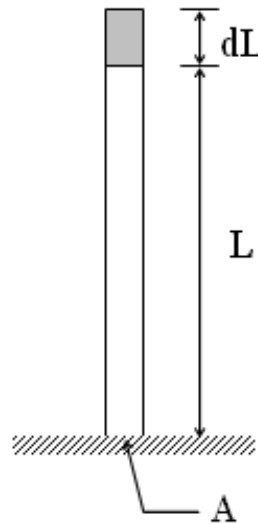


FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM CRISTAL DE GELO
FONTE: Schneider, 1978

$$dq'' = \rho_i i_{sv} dL = \frac{k_i}{L} (T_f - T_w) dt \quad (3.31)$$

onde se considerou que toda a energia necessária para que haja mudança de fase é conduzida, na forma de calor, ao longo da coluna. (SCHNEIDER, 1978).

Rearranjando a equação anterior, obtém-se a seguinte equação diferencial ordinária para o crescimento de uma coluna de gelo:

$$LdL = \frac{k_i}{\rho_i i_{sv}} (T_f - T_w) dt \quad (3.32)$$

Assumindo que a variação da temperatura ao longo da coluna não varia com o tempo, a equação (3.32) pode ser resolvida analiticamente para $L(t=0)=0$. Fazendo $\lambda = (k_i/\rho_i i_{sv})(T_f - T_w)$, que tem a dimensão de difusividade [m^2/s], pode-se integrar a equação (3.32),

$$\int_0^L LdL = \int_0^t \lambda dt \quad (3.33)$$

obtendo-se:

$$L = \sqrt{2\lambda t} \quad (3.34)$$

A porosidade da geada é definida como a razão entre o volume de ar úmido em relação ao volume total, de forma que:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_i}{V} \quad (3.35)$$

Notando-se que $V_i = 1 - A_b L N_e$, onde A_b é a área da base da coluna, L o comprimento da coluna, V o volume do meio poroso e N_e é o número de embriões nucleados na superfície por unidade de volume, a equação (3.35) pode ser reescrita como $1 - \varepsilon = A_b L N_e / V$, de modo que:

$$\frac{d\varepsilon}{1 - \varepsilon} = -\frac{dL}{L} = -\frac{dt}{2t} \quad (3.36)$$

Tal equação pode ser resolvida analiticamente, com o intuito de se obter uma função temporal para a variação da porosidade. Logo, integrando a equação anterior:

$$\int_1^\varepsilon \frac{d\varepsilon}{1-\varepsilon} = - \int_0^t \frac{dt}{2t} \quad (3.37)$$

obtem-se:

$$\varepsilon = 1 - c\sqrt{t} \quad (3.38)$$

onde c é uma constante a ser determinada com base em dados experimentais. No presente trabalho, foram empregados dados experimentais de Hermes *et al.* (2009) para placa plana, obtidos em condições de teste típicas de refrigeração doméstica.

Os dados foram transcritos na Tabela 4 para a porosidade da geada, embora os dados tenham sido originalmente publicados para a densidade da geada.

TABELA 4 - DADOS EXPERIMENTAIS DE HERMES *ET AL.* (2009)

Teste	T _a (°C)	φ	T _w (°C)	ε→1h	ε→2h
1	22	80%	-15	85,3%	77,7%
2	22	80%	-10	80,6%	72,5%
3	22	80%	-5	75,6%	65,4%
4	22	50%	-15	90,3%	85,8%
5	22	50%	-10	87,1%	83,0%
6	22	50%	-5	86,1%	81,1%
7	16	80%	-15	90,8%	86,3%
8	16	80%	-10	88,7%	83,4%
9	16	80%	-5	85,2%	79,2%
10	16	50%	-15	91,2%	88,4%
11	16	50%	-10	90,9%	87,4%
12	16	50%	-5	87,9%	85,2%

Considerando-se que a porosidade no instante inicial tem valor unitário e aplicando-se o ajuste da equação (3.38) a cada uma das 12 condições (24 pontos) de Hermes *et al.* (2009), foram obtidas as constantes c para cada condição, como mostra a Tabela 5. Observa-se que, em todos os casos, o maior erro de ajuste ficou em $R^2 = 0,99$, o que sugere que a equação (3.38) fornece uma boa base física para o modelo ajustado. As curvas ajustadas são mostradas na Figura 11, onde se observa graficamente que o ajuste proposto se adequa de maneira eficaz aos dados experimentais.

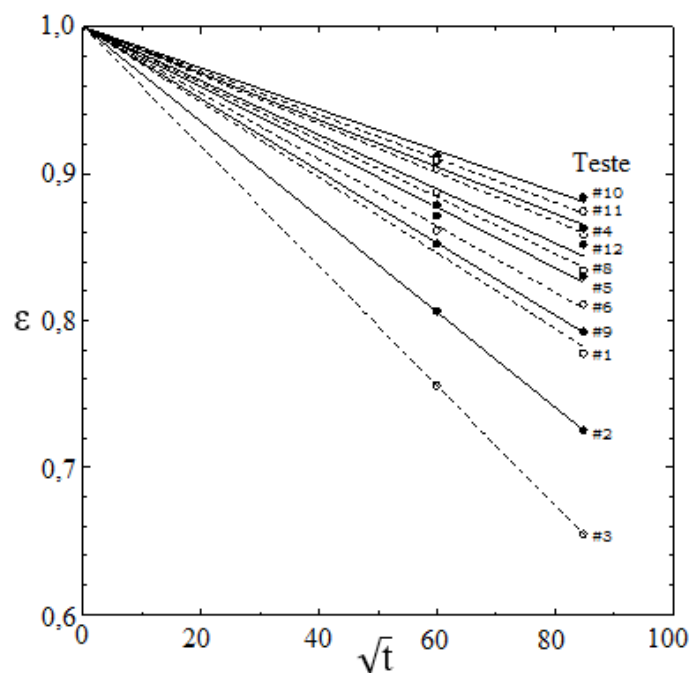


FIGURA 11 - AJUSTE DA CONSTANTE C PARA OS 24 PONTOS EXPERIMENTAIS DE HERMES *ET AL.* (2009)

Para expressar a constante c em função de parâmetros de operação, um segundo ajuste foi realizado considerando-se o seguinte grupo adimensional proposto por Hermes (2012), que consiste no número de Jakob modificado,

$$Ja = \frac{c_p(T_{\text{sat}}(\omega_a) - T_w)}{i_{\text{sv}}(\omega_a - \omega_{\text{sat}}(T_w))} \quad (3.39)$$

o qual representa uma relação entre o calor sensível e o calor latente envolvidos no processo de mudança de fase do vapor d'água. A Figura 12 mostra a variação da

constante c de acordo com o número de Jakob modificado, onde um comportamento exponencial pode ser observado.

TABELA 5 - VALORES DA CONSTANTE C PARA AS 12 CONDIÇÕES DE HERMES *ET AL.* (2009)

Teste	c	R^2	θ
1	0,0025	0,999	1,033
2	0,00307	1,000	1,157
3	0,00389	1,000	1,299
4	0,00163	1,000	0,778
5	0,00195	0,996	0,884
6	0,00238	0,999	1,005
7	0,00176	0,995	0,822
8	0,00211	0,995	0,932
9	0,0026	1,000	1,057
10	0,00128	0,998	0,631
11	0,00151	1,000	0,729
12	0,00181	0,99	0,84

Adotando-se, portanto, um ajuste exponencial à curva, obtém-se a seguinte expressão:

$$c = c_0 \exp\left(\frac{c_1}{Ja}\right) \quad (3.40)$$

onde as constantes do ajuste são $c_0 = 0,000448$ e $c_1 = 1,663$.

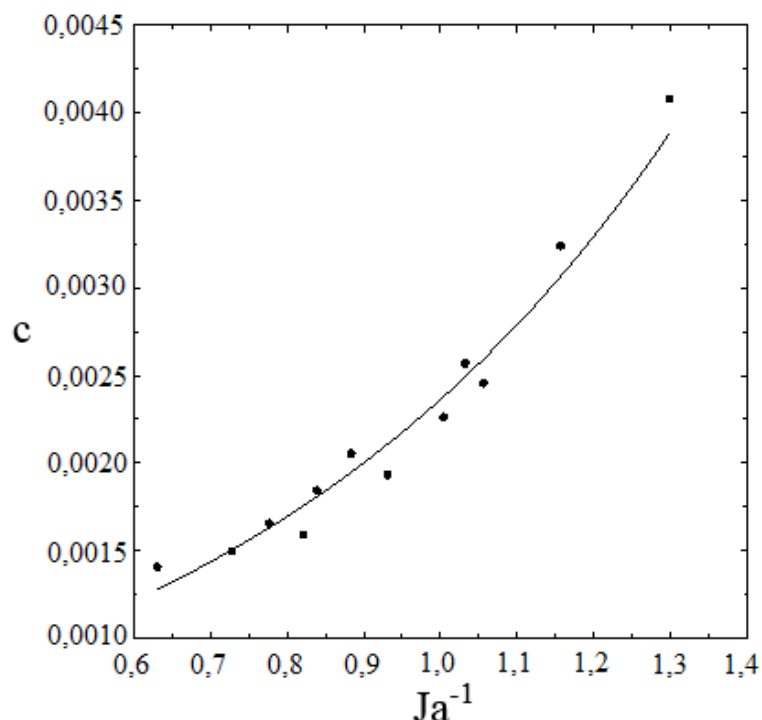


FIGURA 12 - RELAÇÃO FUNCIONAL ENTRE C E JA

A Figura 13 compara as previsões da equação (3.27) utilizando a equação (3.38) com os dados experimentais de Hermes *et al.* (2009), onde é possível verificar que a correlação proposta reproduz os resultados experimentais em uma faixa de erro de $\pm 10\%$. As previsões das equações (3.38) a (3.40) também foram incluídas na Figura 13, sendo possível verificar que a correlação proposta por Hermes *et al.* (2009) representa os dados experimentais dentro de uma faixa de erros de $\pm 15\%$. O modelo de Kandula (2012) prevê uma densidade menor da camada de geada, enquanto a correlação de Yang e Lee (2006) mostra o comportamento oposto, prevendo uma densidade maior do que as obtidas pelos dados experimentais. As correlações de Hayashi (1977) e Wang *et al.* (2012), sendo a segunda baseada na primeira, mostraram as piores previsões, com diferenças maiores que 50% quando comparadas contra os dados experimentais.

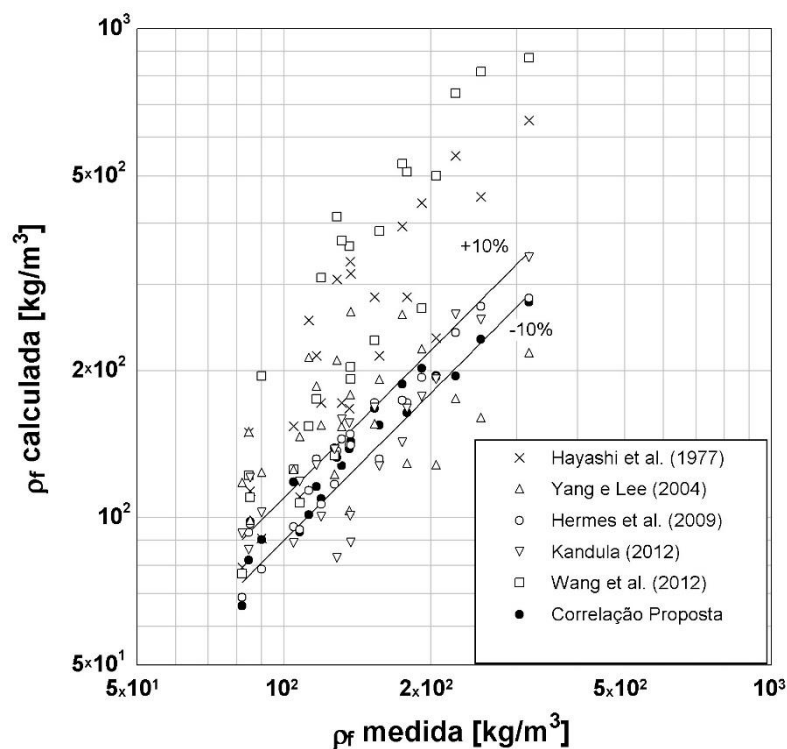


FIGURA 13 - COMPARAÇÃO ENTRE AS DENSIDADES DA GEADA AJUSTADA E MEDIDA

Derivando a equação (3.38) em relação ao tempo, pode-se chegar à seguinte função para a variação temporal da porosidade da geada,

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{c}{2\sqrt{t}} \quad (3.41)$$

Substituindo as equações (3.41) e (3.38) na equação (3.30), obtém-se a seguinte equação evolutiva para a taxa de crescimento da camada da geada em função do tempo.

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{m'' - \rho_i \frac{c\delta}{2\sqrt{t}}}{\rho_i c \sqrt{t}} \quad (3.42)$$

Assim, a espessura da camada da geada pode ser calculada a partir da seguinte integração temporal:

$$\delta(t+\Delta t) = \delta(t) + \int_0^t \left(\frac{m'' - \rho_i \frac{c\delta}{2\sqrt{t}}}{\rho_i c \sqrt{t}} \right) dt \quad (3.43)$$

Uma vez que há uma interdependência não-linear entre δ e m'' , a integração representada na equação (3.43) deve ser realizada numericamente, como será discutido no próximo capítulo.

3.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NA SUPERFÍCIE

O modelo de transferência de calor e massa será aplicado a duas geometrias distintas: placa plana horizontal e canal de placas paralelas isotérmicas, que emulam as geometrias comumente encontradas nas aletas dos evaporadores.

3.5.1 Placas Planas

Para o caso de formação de geada em placas planas horizontais, em que tanto as condições do ar como sua velocidade são praticamente uniformes, os fluxos de calor e massa são obtidos respectivamente por:

$$q'' = h_c(T - T_f) \quad (3.44)$$

$$m'' = \frac{h_c}{c_p Le^{2/3}} (\omega - \omega_f) \quad (3.45)$$

sendo o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície da geada h_c obtido a partir de correlações empíricas para o número de Nusselt para escoamentos laminares:

$$Nu_L = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3.46)$$

ou turbulentos,

$$Nu_L = 0,037Re_L^{0,8}Pr^{0,43} \quad (3.47)$$

Onde $Re_L = \rho u_\infty L / \mu$ é o número de Reynolds baseado no comprimento da placa e $Pr = c_p \mu / k_{ef}$ é o número de Prandtl. O coeficiente de transferência de calor por convecção é calculado como $h_c = k Nu_L / L$.

3.5.2 Canais de Placas Planas Paralelas

No caso dos canais de placas paralelas as propriedades do escoamento (temperatura, umidade e velocidade) sofrem variação à medida que o ar úmido escoo pelo canal, como mostra a Figura 14. Neste caso, é necessário um modelo para o cômputo da distribuição de temperatura e umidade ao longo da direção x , o que dá um caráter pseudo-bidimensional ao modelo.

Os perfis de temperatura e umidade ao longo do canal são obtidos respectivamente através de balanços de massa e energia no escoamento.

$$\dot{m} c_p \frac{dT}{dx} = Ph_c (T - T_f) \quad (3.48)$$

$$\dot{m} \frac{d\omega}{dx} = h_m P (\omega - \omega_f) \quad (3.49)$$

onde as condições na entrada do canal (T_a e ω_a) são conhecidas. Aqui, P é o perímetro, W é a largura do canal na direção perpendicular à figura, enquanto as outras dimensões do canal são a altura H e o comprimento L . As equações anteriores são idênticas, de modo que podem ser escritas para uma variável genérica qualquer φ para representar a temperatura ou a umidade,

$$\frac{d\varphi}{dx} = \xi (\varphi_f - \varphi) \quad (3.50)$$

onde $\xi = h_c P / \dot{m} c_p$.

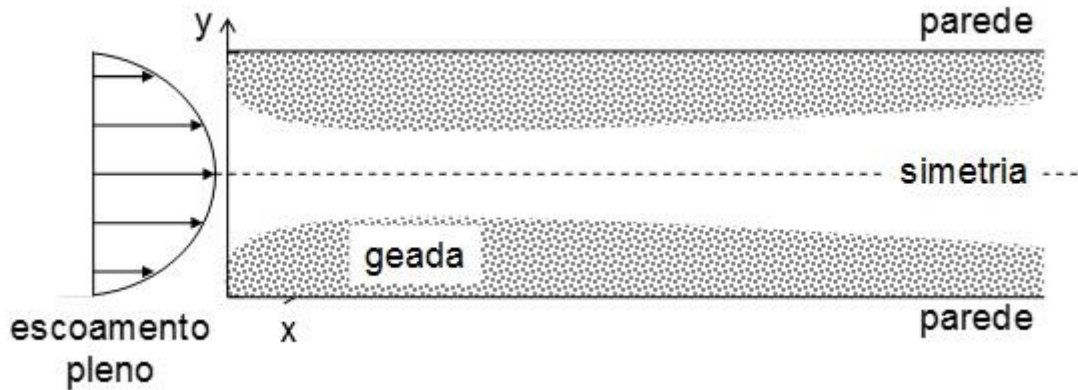


FIGURA 14 - FORMAÇÃO DE GEADA EM CANAIS DE PLACAS PLANAS

Adotando-se a seguinte adimensionalização,

$$\theta = \frac{\varphi - \varphi_f}{\varphi_0 - \varphi_f} \quad (3.51)$$

em que φ_0 se refere à condição conhecida na entrada do canal. Portanto, pode-se mostrar que:

$$d\varphi = -(\varphi_k - \varphi_{k-1}) d\theta \quad (3.52)$$

Substituindo $d\varphi$ na equação (3.50), obtém-se:

$$\frac{d\theta}{dx} = -\xi\theta \quad (3.53)$$

Dividindo-se o canal em pequenos volumes de controle não-sobrepostos, como ilustra a Figura 15, e assumindo que a temperatura da superfície da geada é uniforme em cada um desses volumes de controle, a equação (3.53) pode ser integrada analiticamente de $k-1$ até k ,

$$\int_{k-1}^k \frac{d\theta}{\theta} = - \int_{k-1}^k \xi dx \quad (3.54)$$

obtendo-se:

$$\frac{\theta_k}{\theta_{k-1}} = \exp(-\xi dx) \quad (3.55)$$

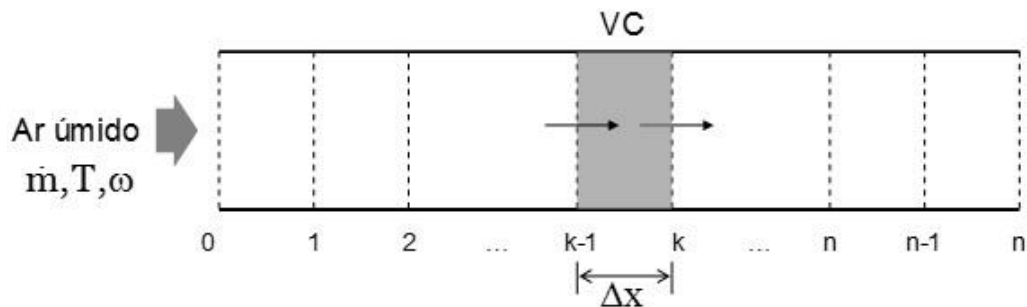


FIGURA 15 - CANAL DIVIDIDO EM PEQUENOS VOLUMES DE CONTROLE

Reconhecendo que,

$$\theta_{k-1} = 1 \quad (3.56)$$

$$\theta_k = \frac{\varphi_k - \varphi_f}{\varphi_{k-1} - \varphi_f} \quad (3.57)$$

pode-se escrever a equação (3.55) como:

$$\varphi_k = \varphi_f - (\varphi_f - \varphi_{k-1}) \exp(-\xi dx) \quad (3.58)$$

Observando-se que $A_{s,k} = 2W\Delta x$ é a área de transferência de calor e massa da seção referente a um volume de controle, obtém-se $\xi\Delta x = \text{Nut}_k$, onde Nut_k se refere ao número de unidades de transferência da seção k do volume de controle. Assim, as equações para T e ω podem ser escritas da seguinte forma:

$$T_k = T_f - (T_f - T_{k-1}) \exp(-\text{Nut}_k) \theta_{k-1} \quad (3.59)$$

$$\omega_k = \omega_f - (\omega_f - \omega_{k-1}) \exp(-\text{Nut}_k) \quad (3.60)$$

Os fluxos de calor e massa em cada seção são, respectivamente, calculados por:

$$q''_k = \frac{\dot{m}c_p}{A_{s,k}} (T_{k-1} - T_k) \quad (3.61)$$

$$m''_k = \frac{\dot{m}}{A_{s,k}} (\omega_{k-1} - \omega_k) \quad (3.62)$$

No entanto, das equações (3.59) e (3.60), tem-se que:

$$T_k = T_f - (T_f - T_{k-1}) (1 - \exp(- Nut_k)) \quad (3.63)$$

$$\omega_k = \omega_f - (\omega_f - \omega_{k-1}) (1 - \exp(- Nut_k)) \quad (3.64)$$

onde $(1 - \exp(- Nut_k))$ representa a efetividade de transferência de calor e de massa em cada seção. Assim, os fluxos de calor e massa podem ser calculados respectivamente por:

$$q''_k = \frac{(1 - \exp(- Nut_k))\dot{m}c_p}{A_{s,k}} (T_f - T_{k-1}) \quad (3.65)$$

$$m''_k = \frac{(1 - \exp(- Nut_k))\dot{m}}{A_{s,k}} (\omega_f - \omega_{k-1}) \quad (3.66)$$

Com base nos fluxos locais, as taxas de transferência de calor sensível, latente e total no canal são calculadas por:

$$\dot{Q}_{sen} = \sum_{k=1}^n q''_k A_{s,k} \quad (3.67)$$

$$\dot{Q}_{lat} = \dot{m}_w i_{sv} \quad (3.68)$$

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{sen} + \dot{Q}_{lat} \quad (3.69)$$

onde \dot{m}_w é a taxa total de transferência de massa de vapor d'água da fase vapor para a fase sólida, sendo calculada por:

$$\dot{m}_w = \sum_{k=1}^n m''_k A_{s,k} \quad (3.70)$$

Outro parâmetro importante consiste na perda de carga ao longo de cada seção do escoamento, sendo calculada pela seguinte expressão em função do estrangulamento do canal ao longo do tempo, (KAYS e LONDON, 1964)

$$p_k = p_{k-1} - \frac{f}{2} u_c^2 \rho \frac{A_{s,k}}{A_{c,k}} \quad (3.71)$$

onde u_c é a velocidade do ar na seção estrangulada, sendo calculada por:

$$u_c = \frac{u_f}{\sigma} \quad (3.72)$$

tal que, σ representa o grau de obstrução do canal, sendo calculado como a razão entre a área da seção estrangulada e a área de face:

$$\sigma = \frac{A_{c,k}}{A_f} \quad (3.73)$$

enquanto u_f é a velocidade média na face do canal, sendo calculada através de:

$$u_f = \frac{\dot{m}}{\rho A_f} \quad (3.74)$$

A variação total de pressão ao longo do canal é então calculada como segue:

$$\Delta p = \sum_{k=1}^n (p_{k-1} - p_k) = p_0 - p_n \quad (3.75)$$

Para escoamentos laminares, o coeficiente de transferência de calor e o fator de atrito são obtidos respectivamente por Shah e London, (1978):

$$\text{Nu}_{D_h} = 7,541(1 - 2,610\text{AR} + 4,970\text{AR}^2 - 5,119\text{AR}^3 + 2,702\text{AR}^4 + 0,548\text{AR}^5) \quad (3.76)$$

Em que, AR é a razão de aspecto do canal, definida da seguinte forma:

$$\text{AR} = \frac{H_c}{W} \quad (3.77)$$

$$H_c = H - 2\delta \quad (3.78)$$

$$A_c = H_c W \quad (3.79)$$

$$D_h = \frac{4A_c \Delta x}{A_s} = 2H_c \quad (3.80)$$

onde H_c é o espaçamento efetivo entre as placas, considerando a geada formada simetricamente nas duas placas, D_h é o diâmetro hidráulico do canal e A_c é a área de passagem do escoamento pelo canal.

Shah e London (1978) também propuseram a seguinte correlação empírica para o fator de atrito de escoamentos laminares em canais:

$$f = \frac{1}{\text{Re}_{D_h}} \frac{24}{(1 - 1,355\text{AR} + 1,947\text{AR}^2 - 1,701\text{AR}^3 + 0,956\text{AR}^4 - 0,254\text{AR}^5)} \quad (3.81)$$

Para escoamentos turbulentos, é utilizada a segunda equação de Petukhov modificada por Gnielinski (1976) para o cálculo do número de Nusselt:

$$\text{Nu}_{D_h} = \frac{(f/8)\text{Re}_{D_h}\text{Pr}}{1,07 + 12,7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (3.82)$$

A correlação acima é válida para $0,5 \leq \text{Pr} \leq 2000$ e $10^4 \leq \text{Re}_{D_h} \leq 5 \cdot 10^6$. Já para o fator de atrito para escoamentos turbulentos em canais, uma boa aproximação é obtida utilizando a equação explícita de Petukhov (1970) para superfícies lisas, dada por:

$$f = (0,790 \ln \text{Re}_{D_h} - 1,64)^{-2} \quad (3.83)$$

3.6 CÔMPUTO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

3.6.1 Propriedades Termofísicas do Ar

As propriedades termofísicas do ar úmido foram correlacionadas apenas em função da temperatura. A difusividade do vapor d'água no ar foi obtida de Lee *et al.* (1997), para uma faixa de temperatura de -45,6 a 15,6 °C. O seguinte ajuste linear foi empregado:

$$D = 2,2165 \cdot 10^{-5} + 1,3787 \cdot 10^{-7} T \quad (3.84)$$

onde D é dado em (m²/s) e T em (°C). Os valores obtidos pelo ajuste são comparados com os dados de Lee *et al.* (1997) na Figura 16, com boa concordância.

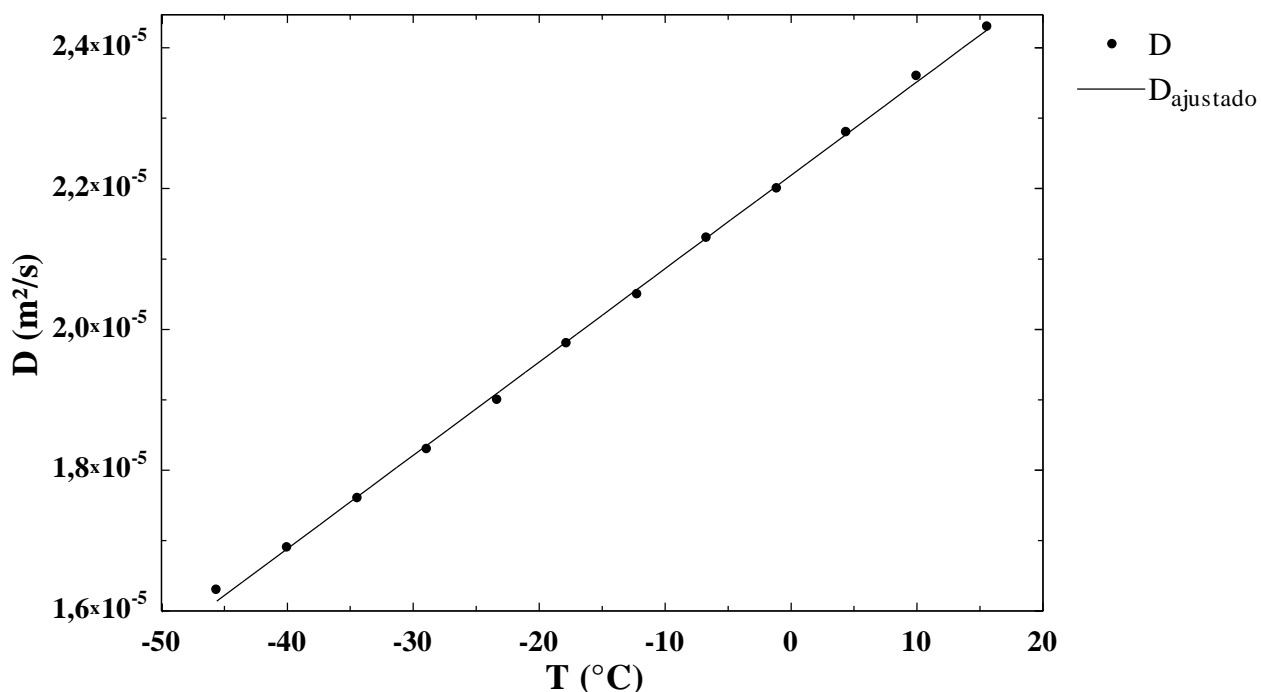


FIGURA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFUSIVIDADES AJUSTADA E MEDIDA.

A condutividade térmica do ar seco foi ajustada em função da temperatura.

$$k = 2,3635 \cdot 10^{-2} + 7,5632 \cdot 10^{-5} T(^{\circ}\text{C}) \quad (3.85)$$

Os resultados do ajuste são comparados com os dados experimentais na Figura 17, com uma boa concordância.

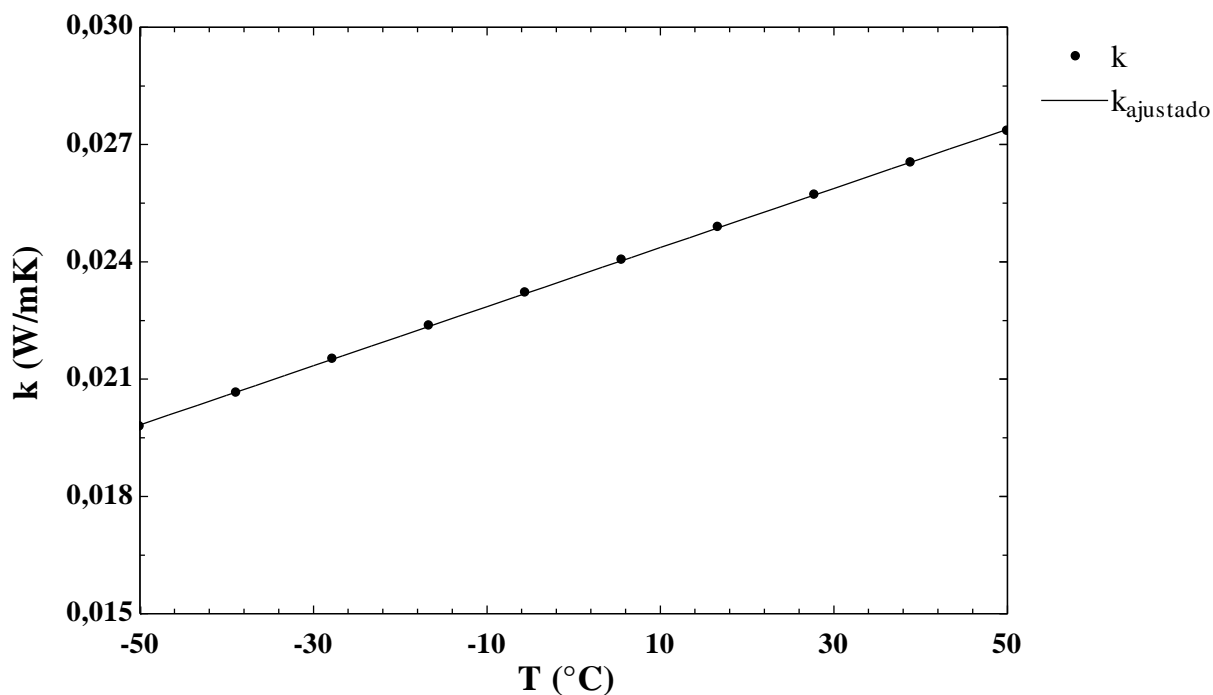


FIGURA 17 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CONDUTIVIDADES TÉRMICA AJUSTADA E MEDIDA.

A viscosidade específica do ar seco foi também obtida através de um ajuste linear, como segue.

$$\mu = 1,729 \cdot 10^{-2} + 4,891 \cdot 10^{-8} T(^{\circ}\text{C}) \quad (3.86)$$

Os resultados do ajuste são comparados com os dados experimentais na Figura 18, onde foi observada uma boa concordância

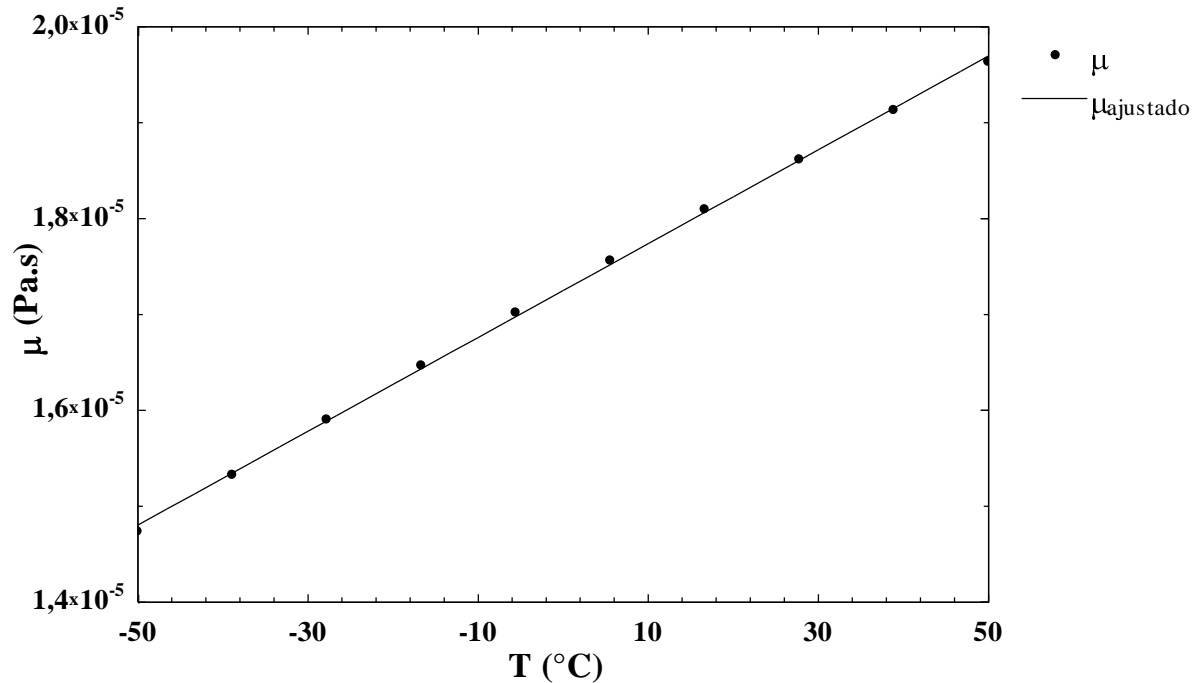


FIGURA 18 - COMPARAÇÃO ENTRE AS VISCOSIDADES ABSOLUTAS AJUSTADAS E MEDIDA.

A densidade do ar seco é calculada assumindo um modelo de gás ideal,

$$\rho = \frac{P_{\text{atm}} - \phi P_{\text{sat}}}{R_a T} \quad (3.87)$$

onde $R_a=287$ é a constante do ar seco em (J/kgK).

A umidade absoluta é calculada a partir dos conceitos básicos de psicrometria, de forma que,

$$\omega = 0,622 \frac{\phi P_{\text{sat}}}{P_{\text{atm}} - \phi P_{\text{sat}}} \quad (3.88)$$

onde ϕ é a umidade relativa e $P_{\text{atm}}=101325$ Pa é a pressão atmosférica ao nível do mar.

3.6.2 Propriedades Termofísicas do Meio poroso

Serão testados três modelos de correlações para a condutividade térmica efetiva do meio poroso (linear, série e paralelo). A primeira é a correlação linear proposta por Hermes (2012) com base no trabalho de Lee *et al.* (1997) e trata a condutividade térmica como uma função linear da densidade da geada, como segue:

$$k_f = k_{f0} + \beta \rho_f \quad (3.89)$$

onde $k_{f0} = 0,1312$ e $\beta = 0,0003$.

A correlação em série é mostrada por Bejan (1994), como segue:

$$k_f = k_i(1-\varepsilon) + k_{ar}\varepsilon \quad (3.90)$$

E a correlação em paralelo é calculada por (NA e WEBB, 2003):

$$\frac{1}{k_f} = \frac{(1-\varepsilon)}{k_i} + \frac{\varepsilon}{k_a} \quad (3.91)$$

O número de Lewis, que relaciona a razão entre as difusividades térmicas e mássicas no meio poroso, será avaliado de três formas distintas, $Le=1$, $Le= \alpha/D$ e $Le= \alpha/D_{ef}$, onde D_{ef} é a difusividade mássica efetiva de vapor d'água no ar dentro da camada de geada, sendo calculada da seguinte maneira:

$$D_{ef} = \frac{\varepsilon D}{\tau} \quad (3.92)$$

em que τ é a tortuosidade do meio poroso, ou seja, um número adimensional que indica a dificuldade de um escoamento em percorrer o meio poroso, sendo nesse trabalho calculada pela correlação de Zehnder. (NA e WEBB, 2003):

$$\frac{\varepsilon}{\tau} = 1 - \sqrt{1-\varepsilon} \quad (3.93)$$

3.7 SÍNTESE DO MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático parte dos fundamentos de Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor e Massa para chegar a um conjunto de equações capazes de prever a formação de geada em placa plana e canal de placas planas paralelas. Um modelo semi-empírico, de caráter inédito, foi proposto para a densidade da geada e empregado para obter uma equação evolutiva para a espessura da camada de geada ao longo do tempo.

Balanços de massa e de energia ao longo da superfície da camada da geada foram adicionalmente empregados para calcular as condições de contorno para o modelo de crescimento e adensamento. O modelo precisa de uma solução numérica, como será mostrado a seguir.

4 MÉTODO DE SOLUÇÃO

4.1 GENERALIDADES

As equações do modelo matemático para prever o crescimento não-uniforme da camada de geada ao longo de um canal de placas paralelas são resolvidas através de dois laços principais: o laço iterativo espacial e o laço temporal. O primeiro resolve, através de substituições sucessivas, os balanços de energia e massa em cada volume de controle a fim de obter os campos de temperatura e umidade, necessários ao cômputo da taxa de crescimento da geada pela equação (3.30). Já o laço temporal integra numericamente a equação evolutiva da espessura da camada de geada pela equação (3.43). No caso de placas planas, apenas o laço temporal se faz necessário. A seguir, os procedimentos computacionais tanto para o laço espacial como para o temporal são apresentados.

4.2 LAÇO ITERATIVO ESPACIAL

No caso dos canais de placas paralelas, o cálculo da temperatura de superfície da geada em cada volume de controle da Figura 15 é feita de maneira iterativa, uma vez que depende da espessura da geada, a qual é função dos fluxos de calor e massa, que por sua vez dependem da temperatura na superfície da geada. Para tanto, um laço iterativo se faz necessário, sendo realizado até que o erro absoluto entre a temperatura calculada e a obtida da iteração anterior seja menor que 0,01 K. Para auxiliar no processo de convergência, um coeficiente de sub-relaxação $\eta \sim 0,25$ foi adotado, de modo que:

$$T_f = \eta T_f + (1 - \eta) T_f^* \quad (4.1)$$

onde o asterisco sobrescrito indica o valor da iteração imediatamente anterior.

A solução espacial é realizada em marcha para cada um dos volumes de controle do domínio discretizado, de forma que a condição de saída de um volume de controle é utilizada como condição de entrada para o próximo. Para o primeiro volume de controle, as condições de entrada são conhecidas da condição inicial do problema. Tal aproximação permite o cálculo dos perfis de temperatura e umidade do ar ao longo do canal (direção x na Figura 14), enquanto o perfil de temperatura ao longo da camada de geada é obtido analiticamente através da equação (3.26), o que confere ao modelo um caráter bidimensional.

4.3 LAÇO TEMPORAL

Enquanto a densidade da geada é calculada diretamente pelas equações (3.27) e (3.38), onde a porosidade decresce ao longo do tempo em uma escala de $t^{0,5}$, um laço de integração temporal é necessário para obter a espessura da camada de geada em cada instante de tempo tanto para a placa plana como para o canal de placas paralelas. Neste último, tem-se uma espessura de geada para cada volume de controle, uma vez que a espessura da geada afeta a mínima área de passagem em cada seção, $A_{c,k}$, afetando os parâmetros chave de transferência de calor e de massa ao longo do canal.

Neste trabalho, optou-se pelo uso do método numérico mais simples que fosse capaz de resolver o problema. Portanto, o método de Euler explícito de 1ª ordem (PRESS *et al.*, 1995) foi adotado para resolver a equação (3.43) como segue:

$$\bar{\delta}(t+\Delta t) = \bar{\delta}(t) + \frac{m'' - \rho_i \frac{c\bar{\delta}}{2\sqrt{t}}}{\rho_i c \sqrt{t}} \Delta t \quad (4.2)$$

A exemplo da espessura da camada de geada, a massa total de geada acumulada nas paredes do canal em cada instante de tempo também foi calculada através de uma integração numérica pelo método de Euler explícito de 1ª ordem:

$$M_f^{t+\Delta t} = M_f^t + \sum \dot{m}_w \Delta t \quad (4.3)$$

4.4 REFINO DE MALHA E INCREMENTO DE TEMPO

Para resolver o escoamento através do canal de placas paralelas, uma solução computacional deve ser empregada. Isso se deve ao fato da espessura da camada de geada variar com o fluxo de massa, que, por sua vez, depende da umidade absoluta do ar que varia ao longo do canal.

A Figura 19 apresenta uma análise de refino de malha para 2, 5, 10, 50 e 100 volumes de controle, quando se observa que soluções independentes da malha são obtidas quando mais de 10 volumes de controle são empregados para o cômputo da espessura da geada no final do canal. Neste caso, empregou-se um canal com $H = 0,024\text{m}$, $L = 0,432\text{m}$, $W = 0,114\text{m}$, para as seguintes condições de operação: $u_a = 0,5\text{ m/s}$, $T_a = 20^\circ\text{C}$, $T_w = -16^\circ\text{C}$ e $\phi_a = 70\%$.

Tal resultado se deve ao fato da equação (3.50) ter sido resolvida de forma analítica assumindo-se uma temperatura de superfície da geada uniforme em cada volume de controle.

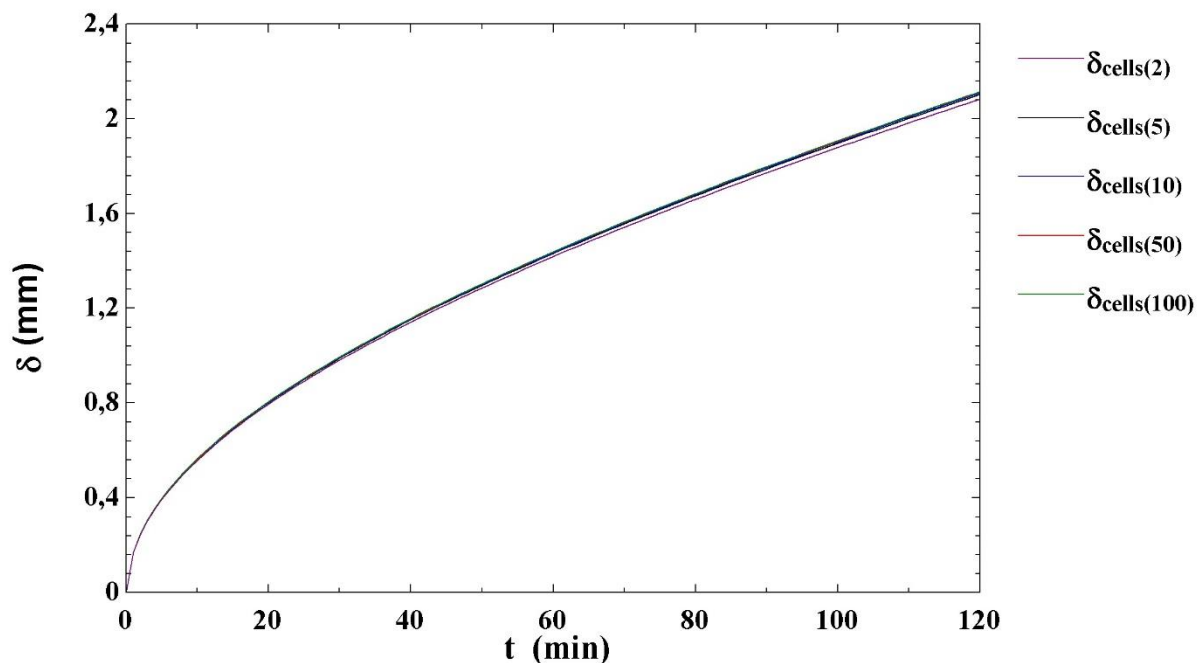


FIGURA 19 - ANÁLISE DO REFINO DE MALHA ESPACIAL

Adicionalmente, uma análise de refino de incremento temporal foi também realizada, como mostra a Figura 20. Neste caso, foram empregadas as mesmas condições geométricas e operacionais da análise anterior. Percebe-se que soluções independentes do incremento temporal podem ser encontradas para $\Delta t < 60$ segundos. Isso se deve ao fato da escala da equação (4.2) ter sido definida pela solução analítica da equação evolutiva da porosidade da geada.

Tanto sob o ponto de vista de discretização espacial como seleção de incremento de tempo para a integração temporal, o modelo proposto mostrou-se robusto para malhas grosseiras e incrementos de tempo elevados, o que se deve à estratégia semi-analítica empregada na obtenção das equações governantes e que confere ao modelo a robustez numérica constatada nas FIGURAS 19 e 20.

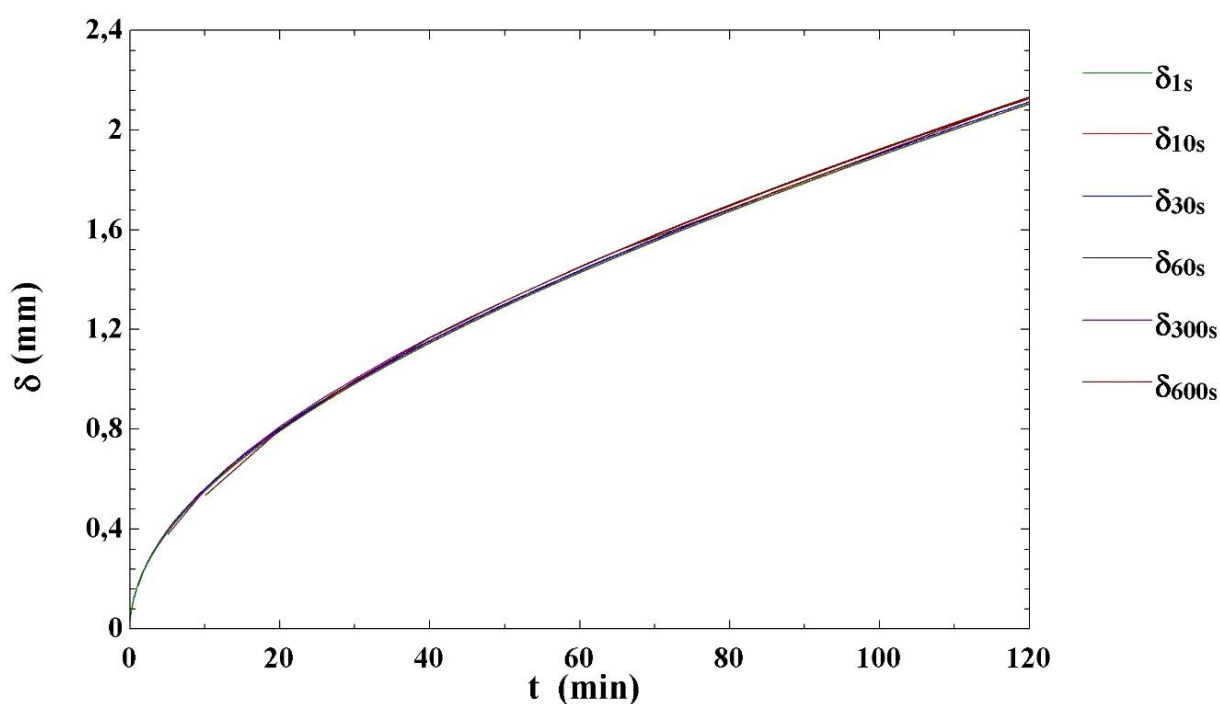


FIGURA 20 - ANÁLISE DO INCREMENTO DE TEMPO

4.5 ALGORITMO DE SOLUÇÃO

Os algoritmos de solução tanto para placas planas (sem distribuição espacial) como para canais de placas paralelas (com distribuição espacial) são ilustrados nas FIGURAS 21 e 22, respectivamente.

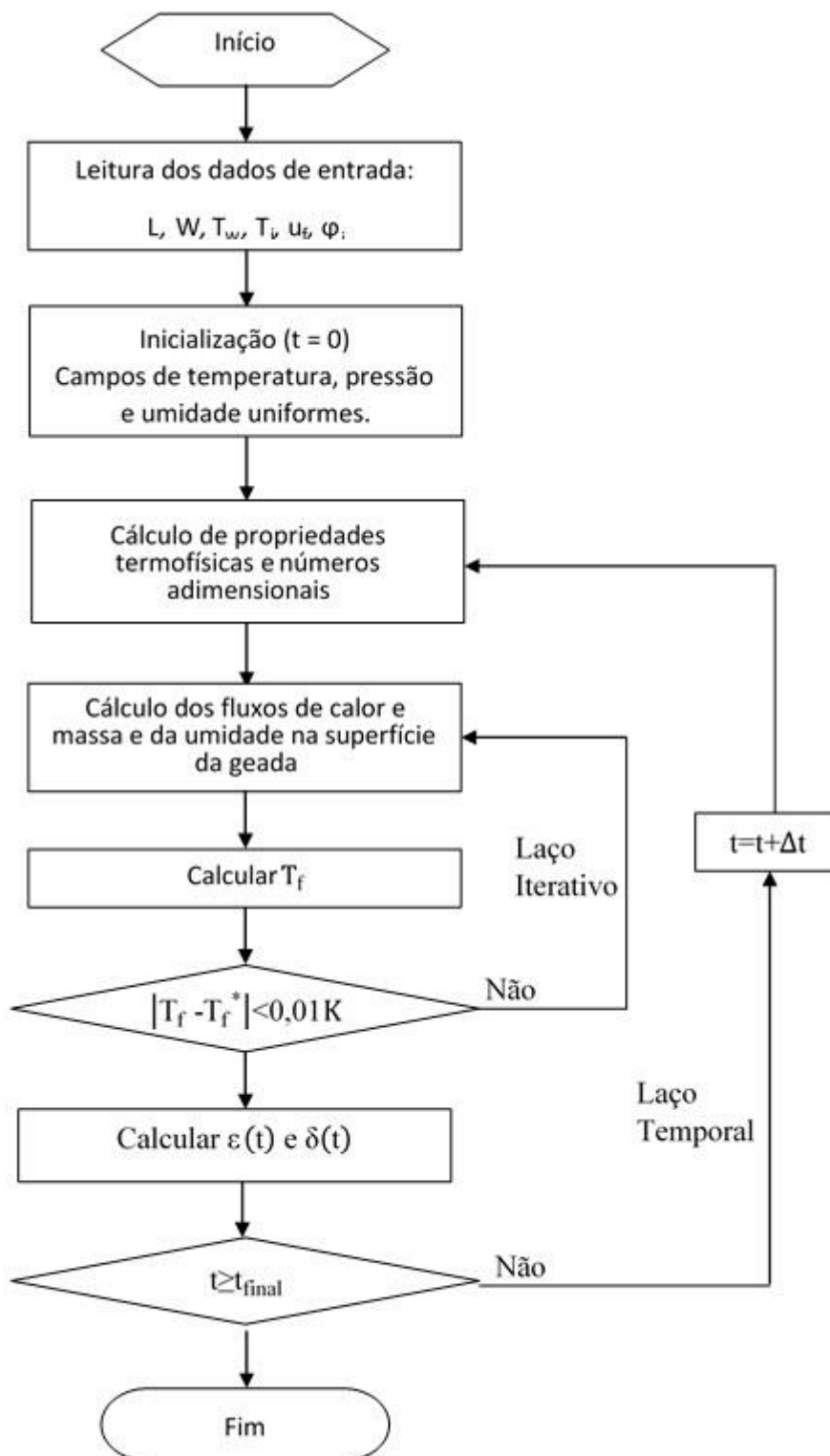


FIGURA 21 - ALGORITMO DE SOLUÇÃO PARA PLACA PLANA

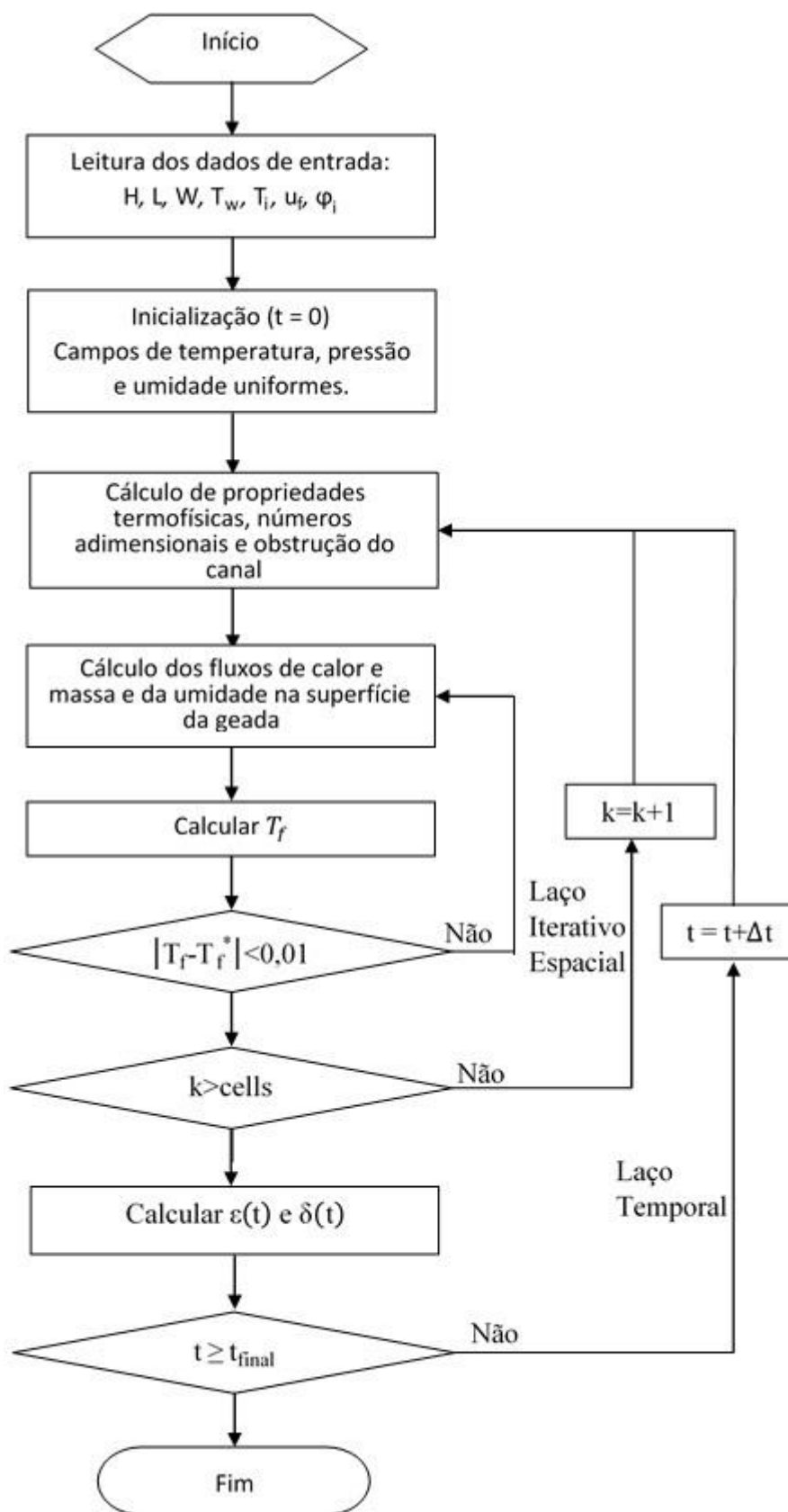


FIGURA 22 - ALGORITMO DE SOLUÇÃO PARA CANAL

4.6 SÍNTESE DO MÉTODO DE SOLUÇÃO

Enquanto a camada de geada é resolvida de forma unidimensional para a placa plana, para o escoamento em canal de placas paralelas, um procedimento de marcha ao longo dos volumes de controle se faz necessário, conferindo um caráter bidimensional ao modelo.

Os algoritmos de solução adotados no presente trabalho, sumarizados nas FIGURAS 21 e 22, mostraram-se robustos sob o ponto de vista de convergência computacional, mesmo quando malhas e incrementos de tempo grosseiros foram adotados. Isso se deve à estratégia de solução das equações governantes, que seguiu uma abordagem semi-analítica, de modo que as funções de interpolação adotadas coincidem com a solução analítica em um intervalo de solução.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, o modelo matemático, bem como o método de solução, são verificados contra dados experimentais obtidos da literatura aberta. Adicionalmente, uma análise de sensibilidade da influência dos parâmetros geométricos (H , W , L) e de operação (u , T , T_w , ϕ), sobre a razão de obstrução do canal, a massa acumulada, a taxa de calor trocado, a densidade da geada, a temperatura de superfície da geada e a perda de carga do escoamento.

5.1 VERIFICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático foi verificado e comparado com dados experimentais da literatura para a espessura da geada formada ao longo do tempo tanto em placa plana como em canais de placas paralelas.

5.1.1 Placa Plana

No caso de escoamentos sobre placas planas fez-se uso do banco de dados gerado por Hermes *et al.* (2009) obtidos para $T_i=16^\circ\text{C}$, $\phi_i=80\%$ e $u_i=1\text{ m/s}$, bem como temperaturas de superfície de -4 , -8 , -12 e -16°C . Deve-se salientar que essa base de dados é diferente daquela empregada para a obtenção da correlação para a densidade da geada, embora também seja oriunda de Hermes *et al.* (2009).

O exercício de validação do modelo para placas planas teve como objetivo selecionar os parâmetros de fechamento (condutividade térmica e difusividade efetivas) que fornecem os melhores resultados em relação aos dados experimentais.

Foram avaliados três modelos para o cálculo da condutividade térmica (linear, série e paralelo) e três métodos de cálculo para o número de Lewis ($Le=1$, $Le= \alpha/D$ e $Le= \alpha/D_{ef}$).

As discrepâncias em relação aos dados experimentais foram quantificadas através da equação (5.1) que expressa o erro RMS normalizado. A Tabela 6 compara os erros RMS entre os dados experimentais e as previsões do modelo para 5 situações distintas (i) $Le = 1$, k_f linear; (ii) $Le = 1$, k_f série; (iii) $Le = 1$, k_f paralelo; (iv) $Le = \alpha/D$, k_f linear; e (v) $Le = \alpha/D_{ef}$, k_f linear. Em todos os casos, fez-se uso da equação (3.46) para calcular o coeficiente de transferência de calor, dado que as condições do escoamento levam a um regime laminar. Os resultados mostram que os parâmetros empregados no caso (i), i.e., $Le = 1$ e $k_f = k_{f0} + \beta\rho_f$, apresentaram os menores erros em relação ao experimento, como ilustra a Figura 23.

$$RMS = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\delta} - \bar{\delta}_{exp})^2}{n}}}{\bar{\delta}_{max} - \bar{\delta}_{min}} \quad (5.1)$$

TABELA 6 - VALORES DO ERRO RMS DE COMPARAÇÃO DOS VALORES NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE HERMES ET AL. (2009).

Caso	$T_w = -4^\circ\text{C}$	$T_w = -8^\circ\text{C}$	$T_w = -12^\circ\text{C}$	$T_w = -16^\circ\text{C}$	Observação
(i)	6,7%	2,5%	3,3%	2,7%	$Le=1$, k_f linear
(ii)	9,7%	4,7%	6,3%	5,4%	$Le=1$, k_f série
(iii)	15,0%	20,4%	23,4%	23,1%	$Le=1$, k_f paralelo
(iv)	15,0%	8,7%	8,5%	7,9%	$Le=\alpha/D$, k_f linear
(v)	6,4%	6,3%	4,4%	3,3%	$Le = \alpha/D_{ef}$, k_f linear

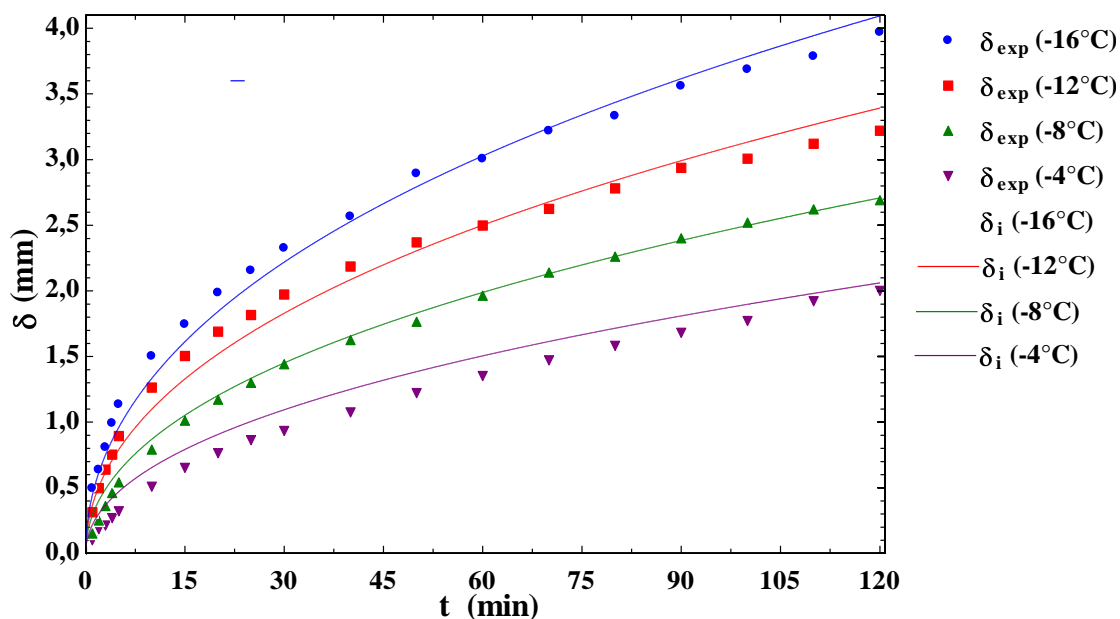


FIGURA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE HERMES *ET AL.* (2009) PARA O CASO (I) EM PLACA PLANA

A Figura 24 mostra uma comparação entre os dados experimentais e os resultados numéricos utilizando os modelos de associação em série e em paralelo para o cômputo da condutividade térmica do meio poroso, dadas respectivamente equações (3.90) e (3.91). Os resultados obtidos utilizando as condutividades em série mostraram uma melhor concordância com os dados experimentais, embora de maneira menos satisfatória que utilizando o modelo linear proposto por Hermes (2012) com base no trabalho de Lee *et al.* (1997).

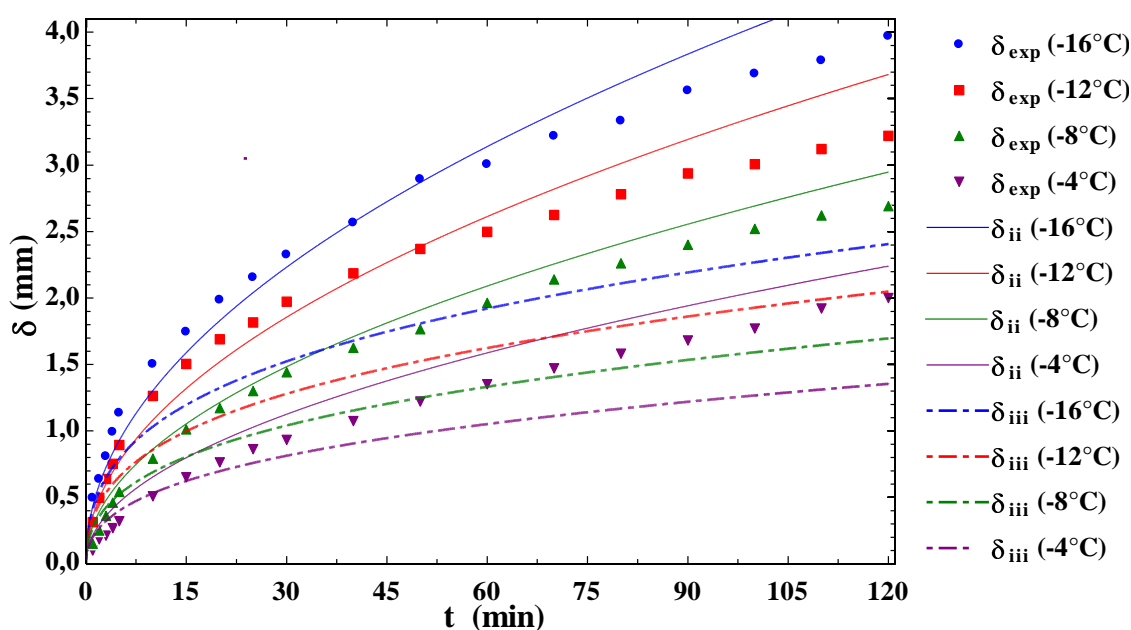


FIGURA 24 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE HERMES *ET AL.* (2009) PARA OS CASOS (II) E (III) EM PLACA PLANA

A Figura 25 mostra comparações de resultados obtidos utilizando diferentes modelos para o cômputo da tortuosidade, que impacta na difusividade efetiva e, conseqüentemente no número de Lewis. As linhas cheias representam os resultados obtidos utilizando $Le = \alpha/D$, que não leva em conta as características do meio poroso. As linhas pontilhadas, por sua vez, mostram os resultados obtidos utilizando a difusividade efetiva do vapor d'água no ar considerando os efeitos relacionados à formação do meio poroso, tal que $Le = \alpha/D_{ef}$. Observa-se que a segunda apresenta resultados mais satisfatórios, se comparada à primeira, embora com resultados piores que os obtidos empregando-se número de Lewis unitário.

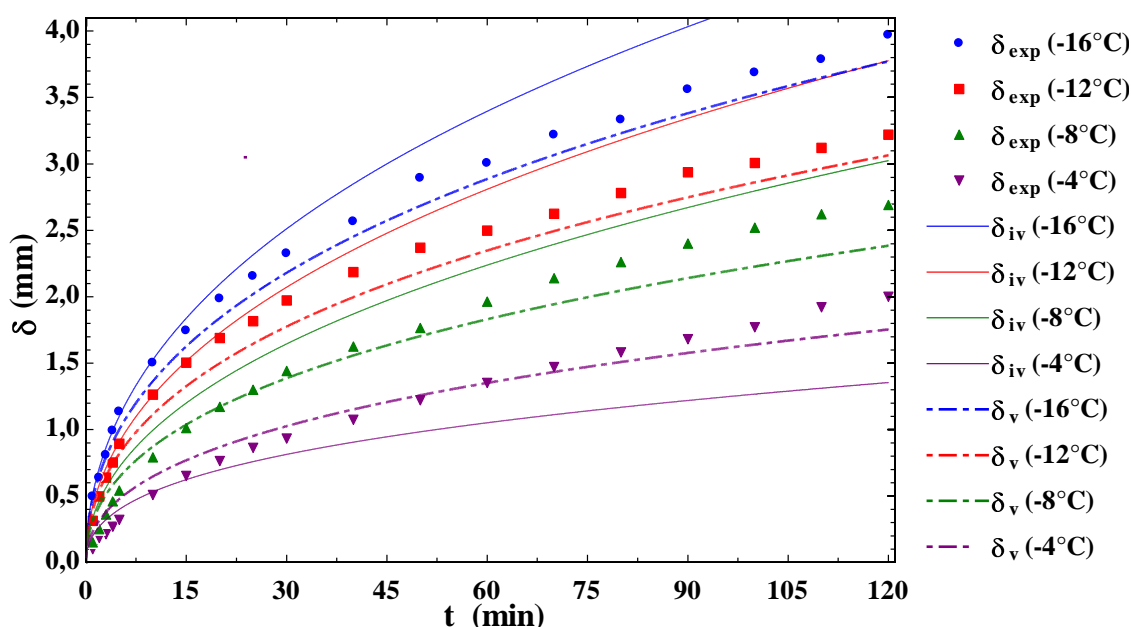


FIGURA 25 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE HERMES *ET AL.* (2009) PARA OS CASOS (IV) E (V) EM PLACA PLANA

5.1.2 Canal

Para a verificação do modelo matemático e do método de solução em canais foram utilizadas duas bases de dados experimentais na validação do modelo. A primeira validação é feita utilizando os dados de Lürer e Beer (2000) de formação de geada em um canal de placas planas paralelas com as seguintes dimensões: $W = 114$

mm; $L = 432$ mm e $H = 24$ mm. Ambos os testes são realizados com um escoamento de ar na seção de testes com $Re_{D_H} = 1500$.

Apesar do Reynolds na entrada caracterizar um regime laminar, à medida que a geada se forma no canal, reduzindo a área de passagem, há um aumento da velocidade do escoamento uma vez que a vazão de ar (i.e., velocidade de face) foi mantida constante durante o experimento. Com isso, valores de Reynolds superiores ao limite de transição laminar-turbulento (~ 2000) são observados no interior do canal. Por este motivo, optou-se pelo uso das correlações para coeficiente de transferência de calor e fator de atrito para escoamentos turbulentos equações (3.82) e (3.81), respectivamente.

A Figura 26 mostra uma comparação entre os resultados obtidos através do modelo matemático e os dados experimentais de Lüer e Beer (2000). Enquanto o caso 1 foi realizado com $\phi_a = 70\%$; $T_a = 20^\circ\text{C}$ e $T_w = -16^\circ\text{C}$, o caso 2 foi realizado com $\phi_a = 60\%$; $T_a = 20^\circ\text{C}$ e $T_w = -8^\circ\text{C}$. Em ambos os casos, onde a espessura é obtida na saída do canal, observa-se uma concordância satisfatória entre os dados experimentais, com o modelo representando adequadamente as tendências experimentais, especialmente para o caso 1. O maior erro de concordância obtido no caso 2 se deve ao fato de que a geada formada nas placas do canal não causou obstrução significativa até 60 min, de modo que o escoamento se manteve em regime de transição. A concordância foi melhorada nos últimos pontos, à medida que o canal teve sua área de passagem restringida, de modo que a velocidade do escoamento aumentou, caracterizando um regime turbulento de operação. As condições de teste e o erro RMS dos dois casos estão sumarizados na Tabela 7

A Figura 27, por sua vez, mostra uma comparação dos resultados obtidos pelo modelo matemático com os resultados experimentais de Lenic *et al.* (2009). O caso 1 foi obtido para $\phi_a = 57,07\%$; $T_a = 19,8^\circ\text{C}$ e $T_w = -20,5^\circ\text{C}$, enquanto o caso 2 foi obtido para $\phi_a = 39,22\%$; $T_a = 21,4^\circ\text{C}$ e $T_w = -19,5^\circ\text{C}$. Um fato importante a ser considerado nos dados de Lenic *et al.* (2009), é que somente a placa inferior do canal de testes foi resfriada, enquanto a superior permaneceu termicamente isolada. Portanto, a geada é formada somente na placa inferior do canal, tal que, em alguns testes, a espessura da camada de geada ultrapassa a linha de centro do canal. Ambos os testes foram realizados com um escoamento de ar entrando na seção de testes a uma velocidade

de 0,6 m/s, caracterizando um regime laminar de operação, mesmo quando há bloqueio parcial da seção transversal pela formação de geada.

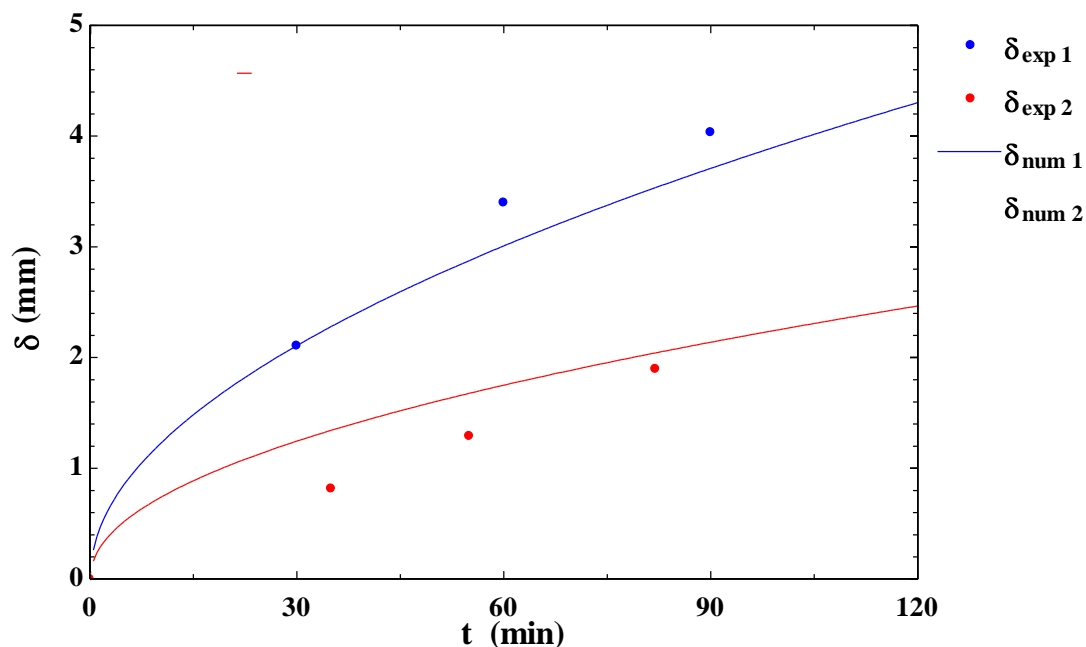


FIGURA 26 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL.

TABELA 7 - ERROS RMS OBTIDOS PELA COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO COM DADOS DE LÜER E BEER (2000).

Teste 1		Teste 2	
T_w	-16°C	T_w	-8°C
ϕ_i	70%	ϕ_i	60%
T_i	20°C	T_i	20°C
Re	1500	Re	1500
RMS	6,31%	RMS	17,65%

Os resultados numéricos para ambos os casos mostraram uma boa concordância com os dados experimentais, principalmente pelo fato do escoamento ter se mantido laminar durante a realização dos testes. As condições de teste e o erro RMS dos dois casos estão sumarizados na Tabela 8.

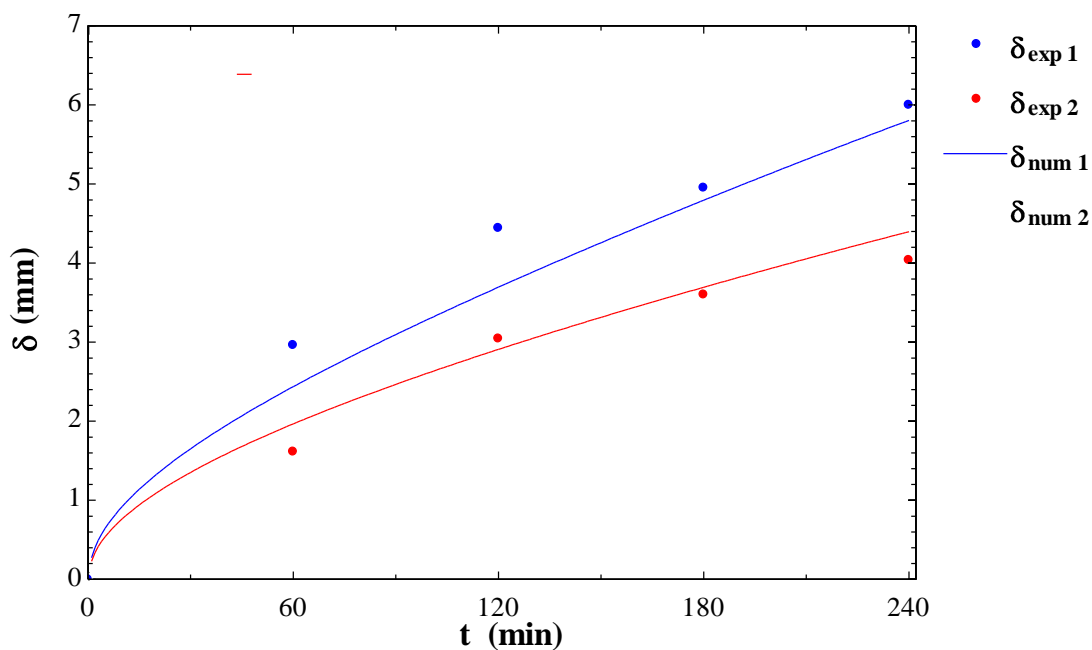


FIGURA 27 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE LENIC *ET AL.* (2009) EM CANAL

TABELA 8 - VALORES DO ERRO RMS DE COMPARAÇÃO DOS VALORES NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS DE LENIC *ET AL.* (2009).

Caso 1		Caso 2	
T_w	-20,5 °C	T_w	-19,5 °C
ϕ_a	57,07%	ϕ_a	39,22%
T_a	19,8°C	T_a	21,4°C
u_a	0,6 m/s	u_a	0,6 m/s
RMS	7,07%	RMS	5,86%

Após sua validação contra três bases de dados experimentais distintas, o modelo foi empregado para estudar os perfis de espessura, temperatura de superfície e porosidade da geada ao longo do tempo e do espaço em canais, como mostrado a seguir.

5.2 RESULTADOS

Após o exercício de validação, o modelo foi empregado para analisar o escoamento de ar úmido em canais de placas paralelas, em que as variações temporais da espessura e dos campos de temperatura e umidade na camada de geada foram analisados. A condição do caso 2 de Lüer e Beer (2000), sumarizada na TABELA 7, foi empregada nestas análises iniciais.

A Figura 28 mostra a evolução temporal da espessura da camada de geada em três pontos distintos da extensão do canal: na entrada, no meio e na saída. Observa-se que, durante todo o período analisado, a camada de geada é mais espessa na entrada do canal e menos espessa na saída, o que se deve ao fato de haver um maior gradiente de umidade entre o ar úmido e a superfície da geada na região de entrada do canal, uma vez que a umidade do ar ao longo do escoamento diminui à medida que vapor d'água é transferido para a camada de geada. Tal comportamento pode ser também percebido na Figura 29, onde as linhas representam a posição da interface entre a geada e o ar úmido ao longo nos instantes 15, 30, 60 e 120 minutos. Nesta figura é representada também a linha de simetria do canal, que seria a altura máxima que a geada pode alcançar, ocasionado o entupimento da seção de testes. Verifica-se que, após 120 min, o canal permaneceu com aproximadamente 3/4 da seção livre para a passagem do ar, indicando que a condição analisada (caso 2 de Lüer e Beer, 2000) não é crítica ao bloqueio do canal por geada.

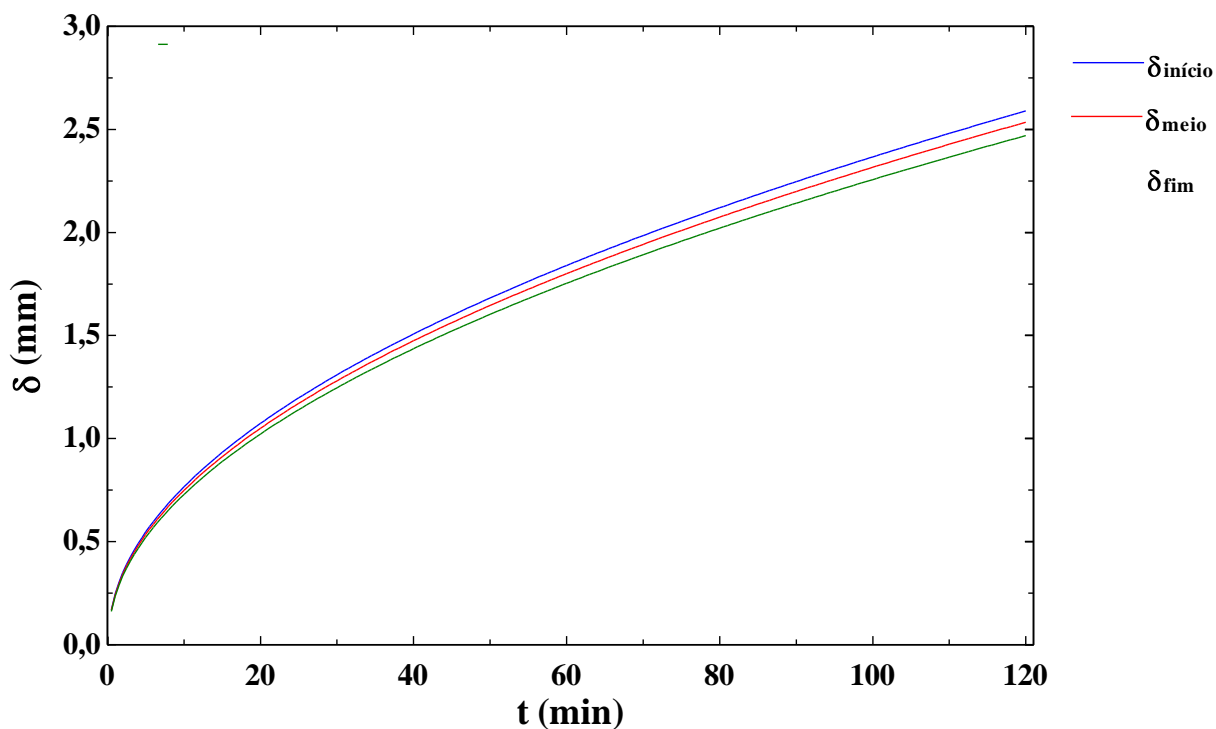


FIGURA 28 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CAMADA DE GEADA EM DIFERENTES POSIÇÕES DO CANAL NAS CONDIÇÕES DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL

As FIGURAS 30 e 31 mostram, respectivamente, as evoluções espaciais dos perfis de temperatura da fronteira e da porosidade da geada. Observa-se que, para um mesmo instante de tempo, a temperatura da geada é maior na entrada do canal uma vez que a espessura da camada também é maior, elevando a resistência à transferência de calor entre a corrente de ar e a parede. A porosidade, por outro lado, é menor na região de entrada, uma vez que o fluxo mássico de adensamento é maior nessa região em virtude do maior gradiente de umidade entre o ar úmido e a camada de geada na entrada do canal.

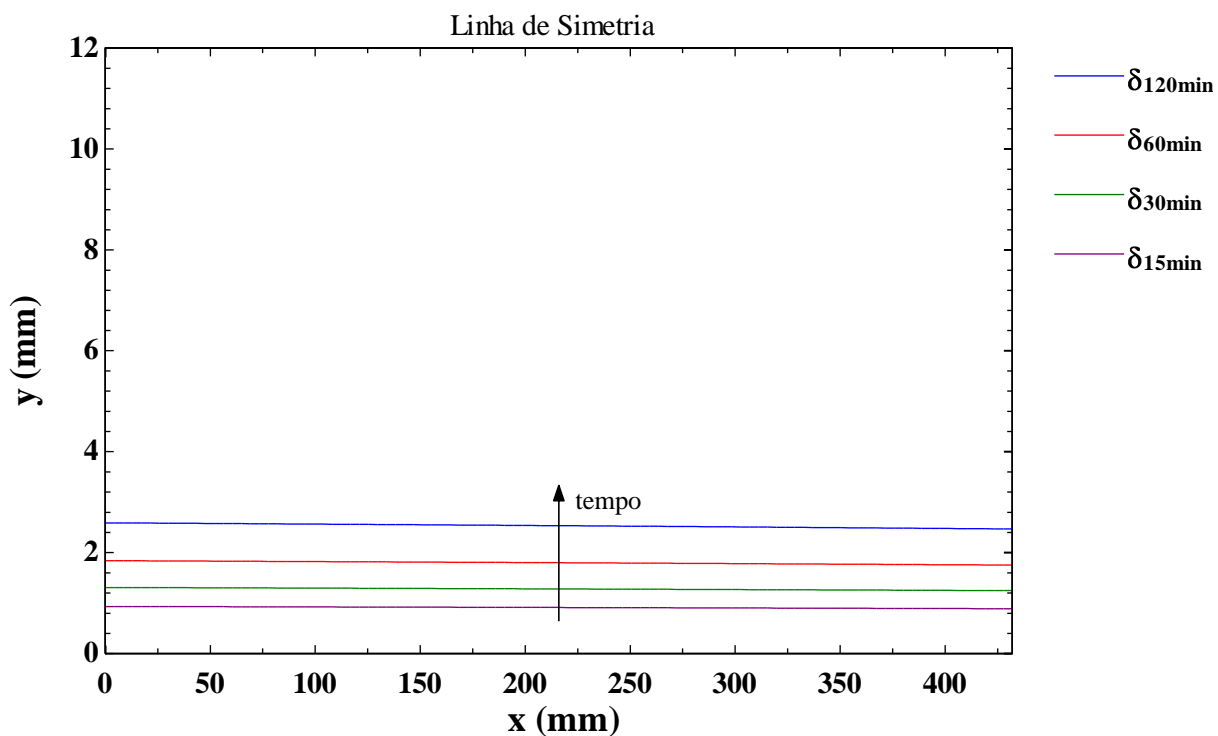


FIGURA 29 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA FRONTEIRA DA GEADA PARA AS CONDIÇÕES DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL

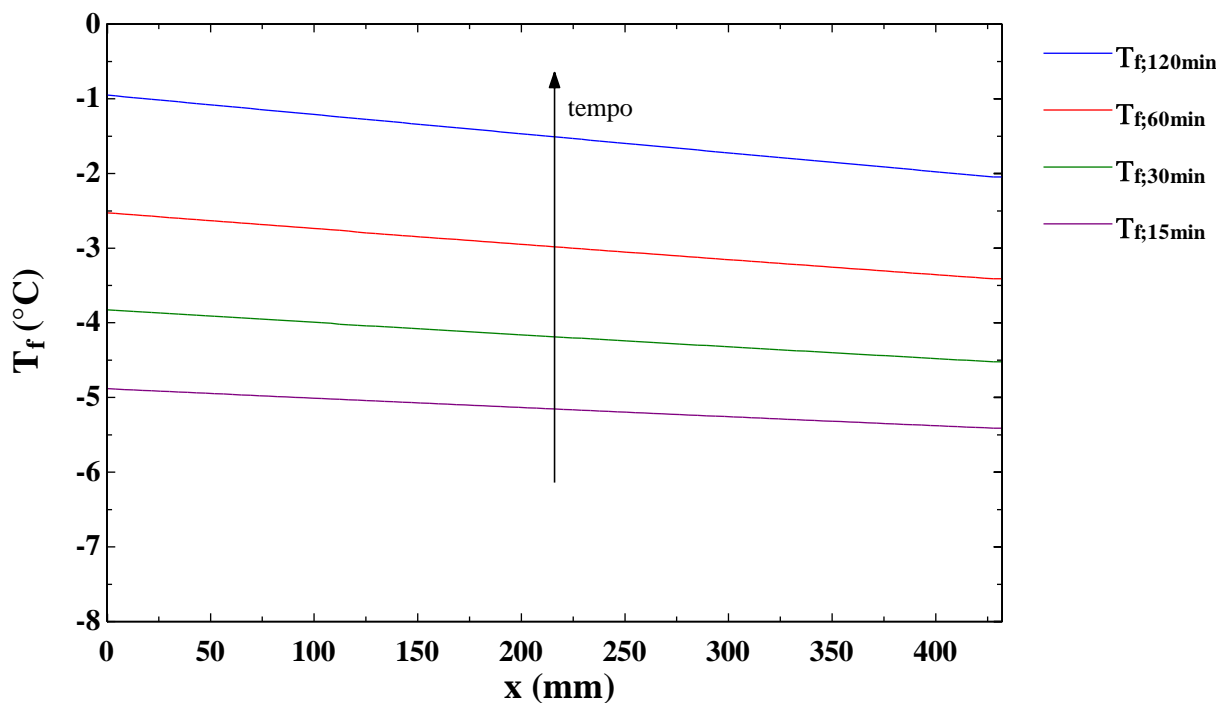


FIGURA 30 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA GEADA AS CONDIÇÕES DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL

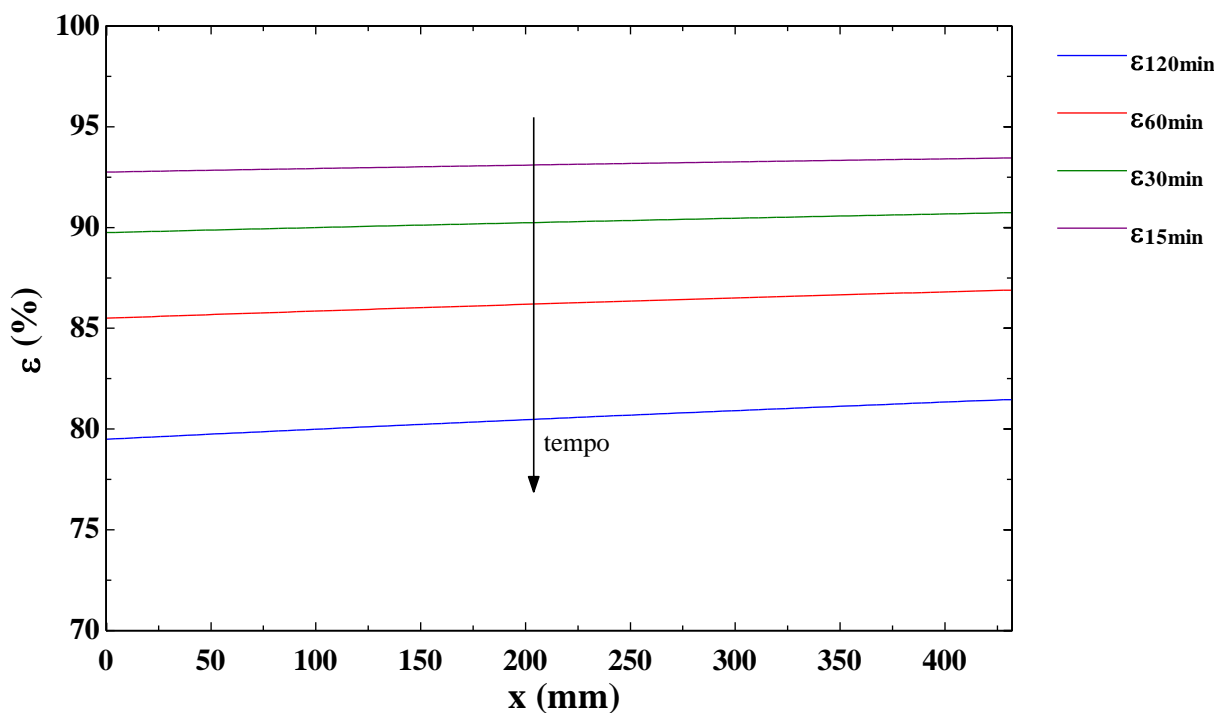


FIGURA 31 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA DENSIDADE DA GEADA PARA O TESTE 2 DE LÜER E BEER (2000) EM CANAL

As FIGURAS 32, 33, 34 e 35 ilustram os campos de temperatura ao longo de todo o canal respectivamente nos instantes de 15, 30, 60 e 120 minutos, onde se pode observar os comportamentos dos perfis unidimensionais da temperatura do ar ao longo do canal (direção x) e da temperatura da geada ao longo da camada (direção y).

Pelo lado do escoamento verifica-se a diminuição da temperatura ao longo do canal, já que o ar é resfriado pela transferência de calor para a superfície da geada, tal que o fluxo de calor vai diminuindo ao longo do canal. Com isso, a temperatura do ar na saída do canal tende a ser menor nos primeiros instantes de tempo do que ao final do teste, já que o aumento da temperatura de superfície da geada tende a diminuir a troca de calor no escoamento.

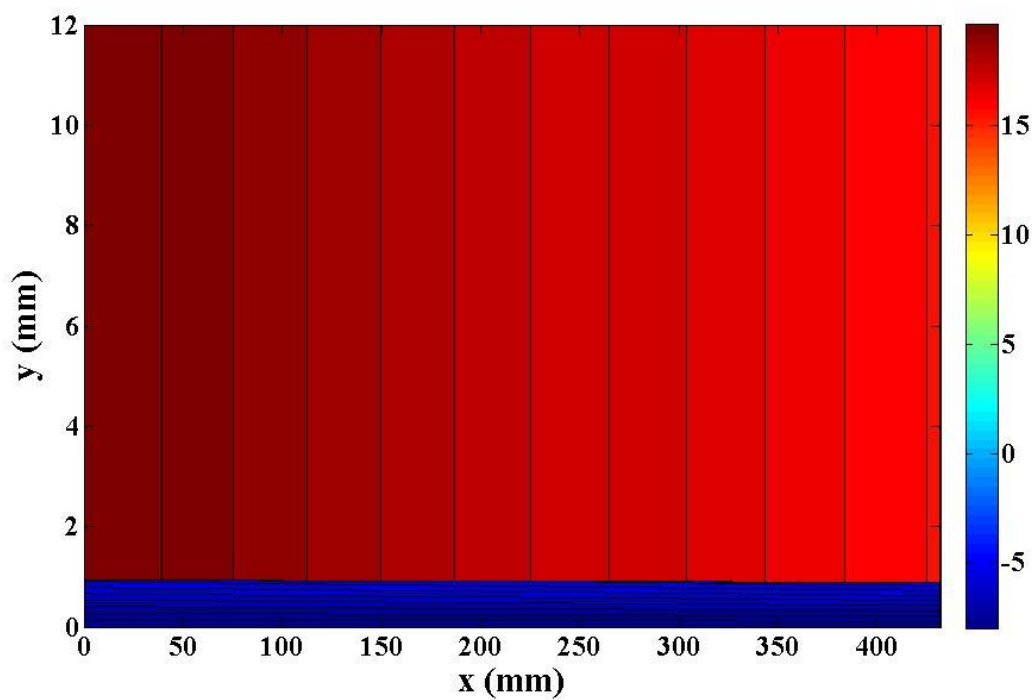


FIGURA 32 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) PARA $T = 15$ MINUTOS.

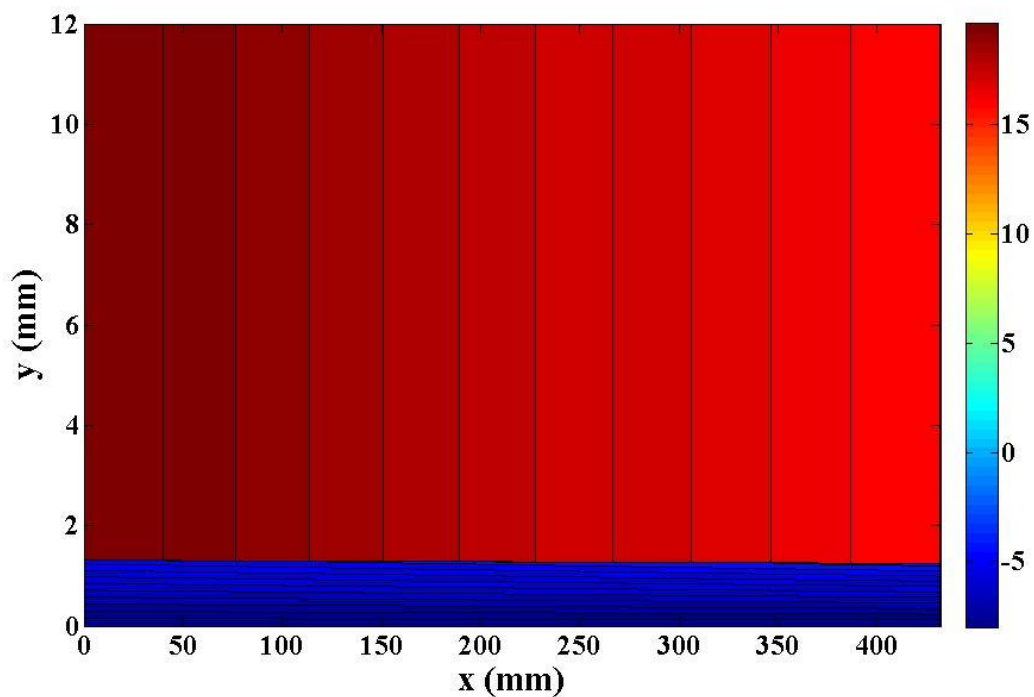


FIGURA 33 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) PARA $T = 30$ MINUTOS.

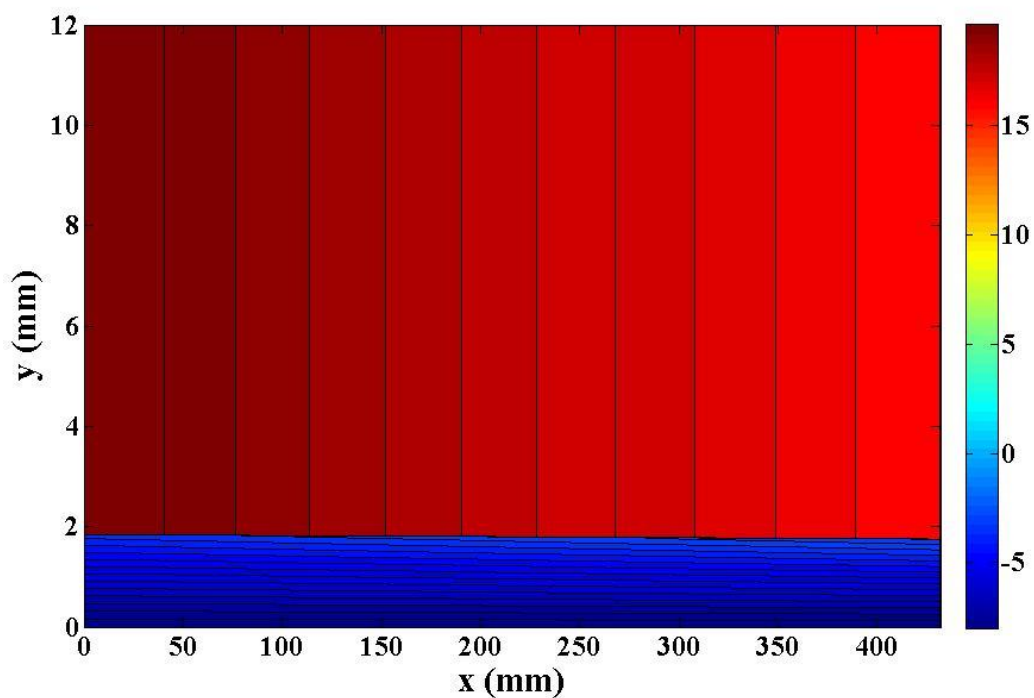


FIGURA 34 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) PARA T = 60 MINUTOS.

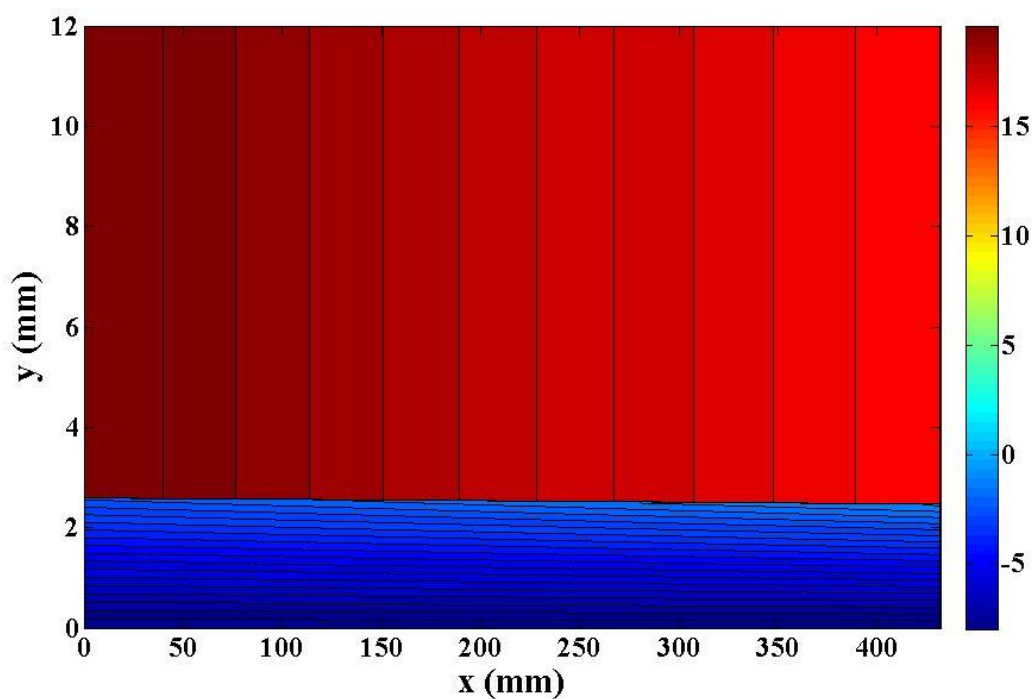


FIGURA 35 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LÜER E BEER (2000) PARA T = 120 MINUTOS.

O escoamento de ar úmido em canais foi também analisado para as condições do caso 2 de Lenic *et al.* (2009), sumarizadas na TABELA 8. As condições desse teste

se diferem das empregadas na análise anterior principalmente por apresentarem uma menor temperatura na superfície da placa resfriada. Vale lembrar que, nas análises de Lenic *et al.* (2009), somente a placa inferior foi considerada resfriada, enquanto a placa superior foi considerada adiabática.

As FIGURAS 36 e 37 mostram a evolução temporal da espessura da camada de geada. Neste caso, com a redução da temperatura de superfície tem-se um aumento do fluxo de massa de vapor d'água para dentro da camada de geada, aumentando a taxa de crescimento da camada de geada. Em adição, o fluxo de calor total também aumenta, apesar do fluxo de calor sensível decrescer rapidamente nos instantes iniciais à medida que a temperatura da geada aumenta com o aumento da espessura, como se pode observar na Figura 38.

A Figura 39 ilustra os perfis de porosidade média ao longo do tempo. Observa-se que a porosidade não alcança os valores observados nas análises anteriores, de modo que a geada formada nas condições atuais é menos densa. Isso ocorre porque o fluxo de massa de adensamento diminui com o aumento da diferença de temperatura entre o ar e a superfície da geada, o que se reflete no número de Jakob modificado da eq. (3.40).

As FIGURAS 40, 41, 42 e 43 representam os campos bidimensionais de temperatura ao longo do canal para os instantes de 30, 60, 120 e 240 minutos respectivamente. Observa-se que, em comparação aos resultados da análise anterior, como a geada é formada somente na superfície inferior, a geada tende a ser maior, além do fato de a temperatura da superfície ser mais baixa, o que acarreta em um campo de temperatura mais amplo, que mesmo em 4 horas de teste ainda não está próximo de alcançar a temperatura de 0°C na superfície da geada.

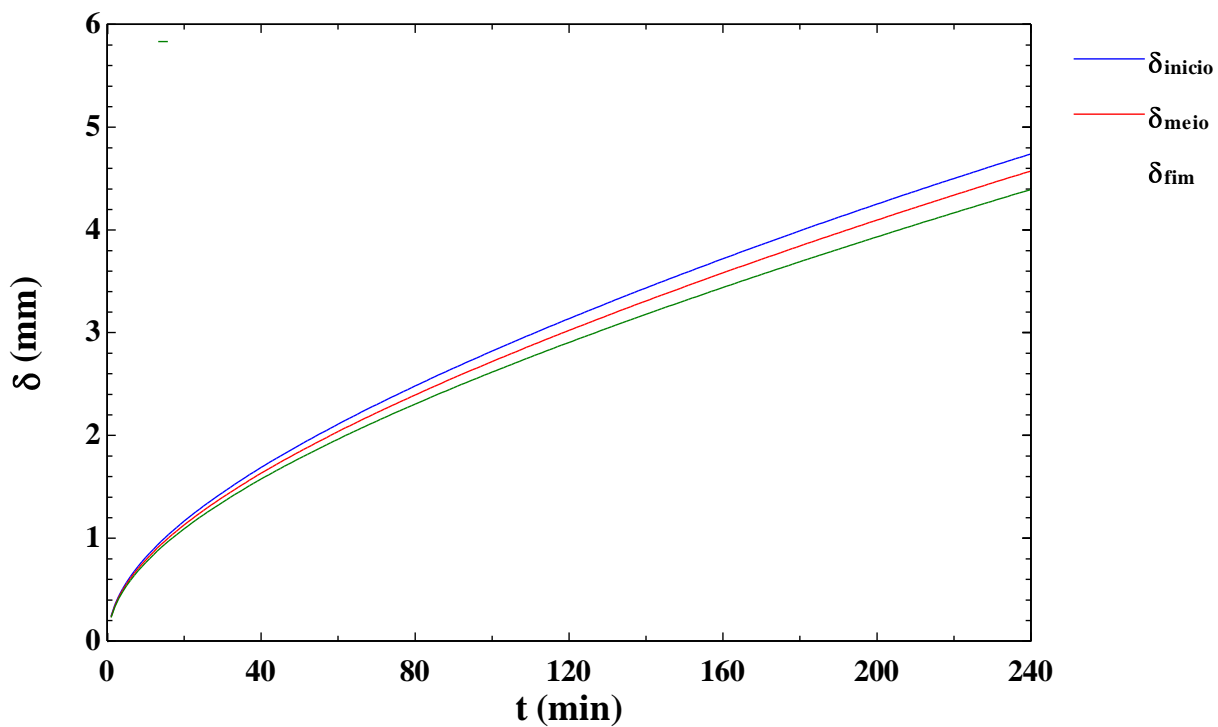


FIGURA 36 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA EM DIFERENTES POSIÇÕES PARA O CASO 2 DE LENIC *ET AL.* (2009) EM CANAL

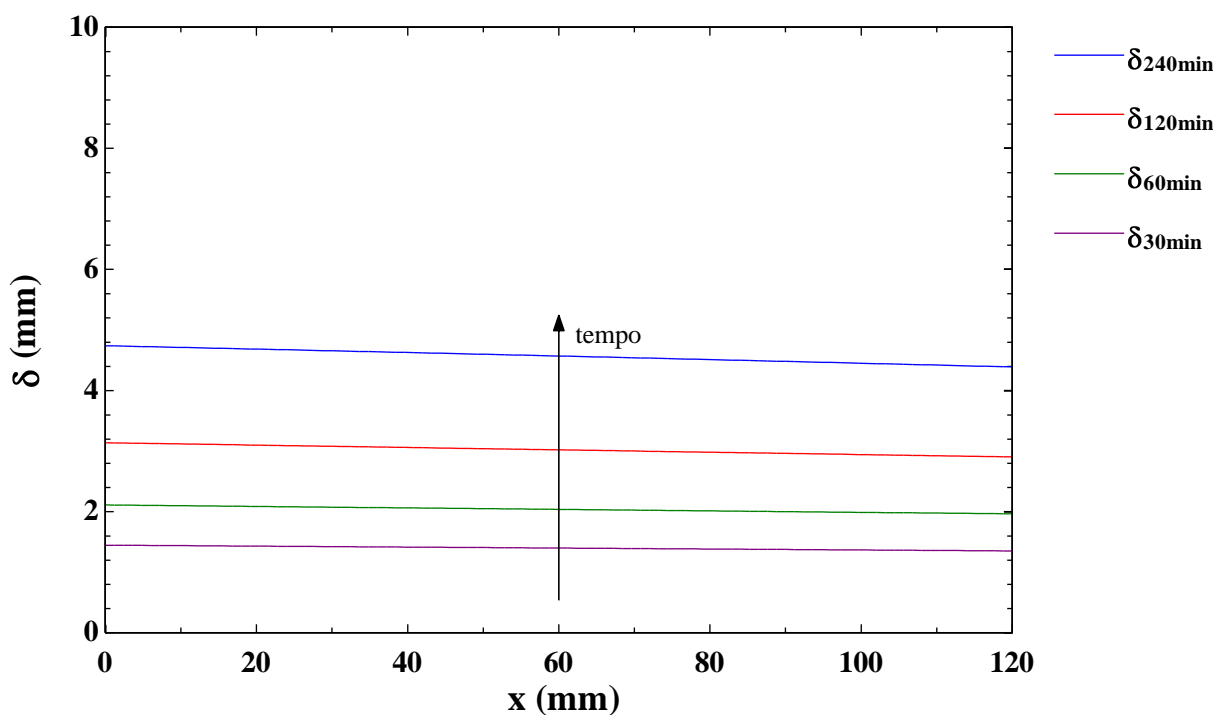


FIGURA 37 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA ESPESSURA DA GEADA PARA O CASO 2 DE LENIC *ET AL.* (2009) EM CANAL

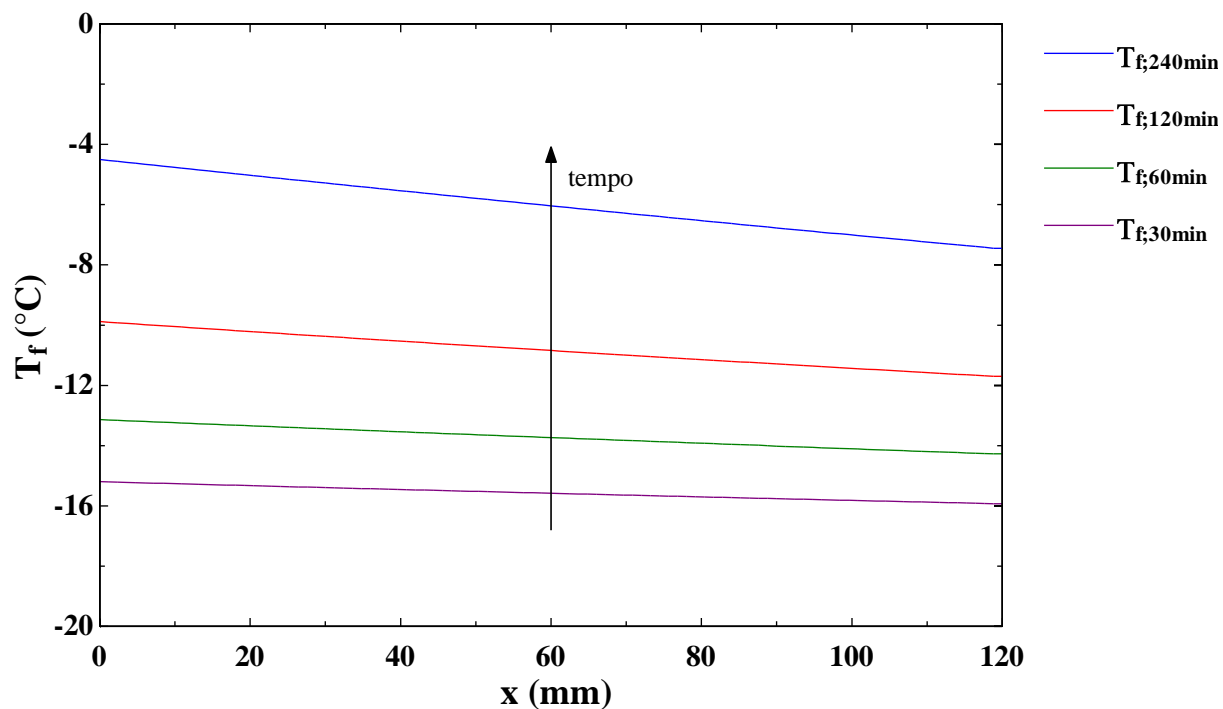


FIGURA 38 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA GEADA PARA O CASO 2 DE LENIC ET AL. (2009) EM CANAL

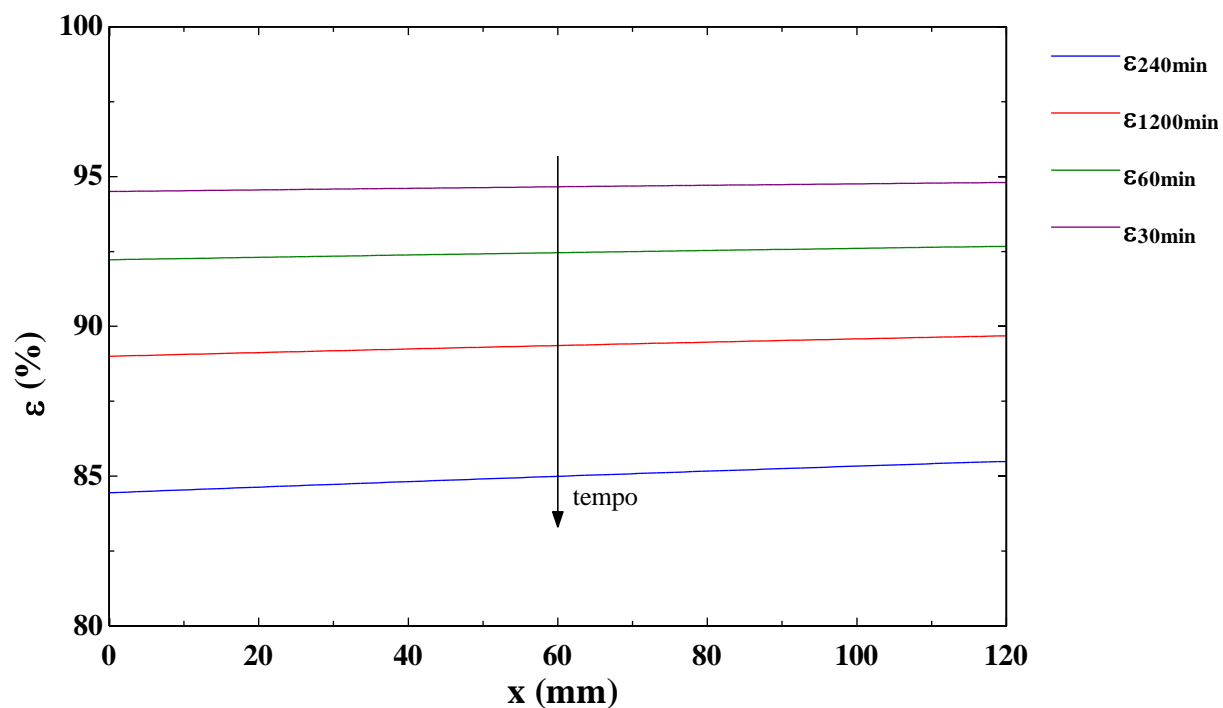


FIGURA 39 - EVOLUÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL DA POROSIDADE DA GEADA PARA O CASO 2 DE LENIC ET AL. (2009) EM CANAL

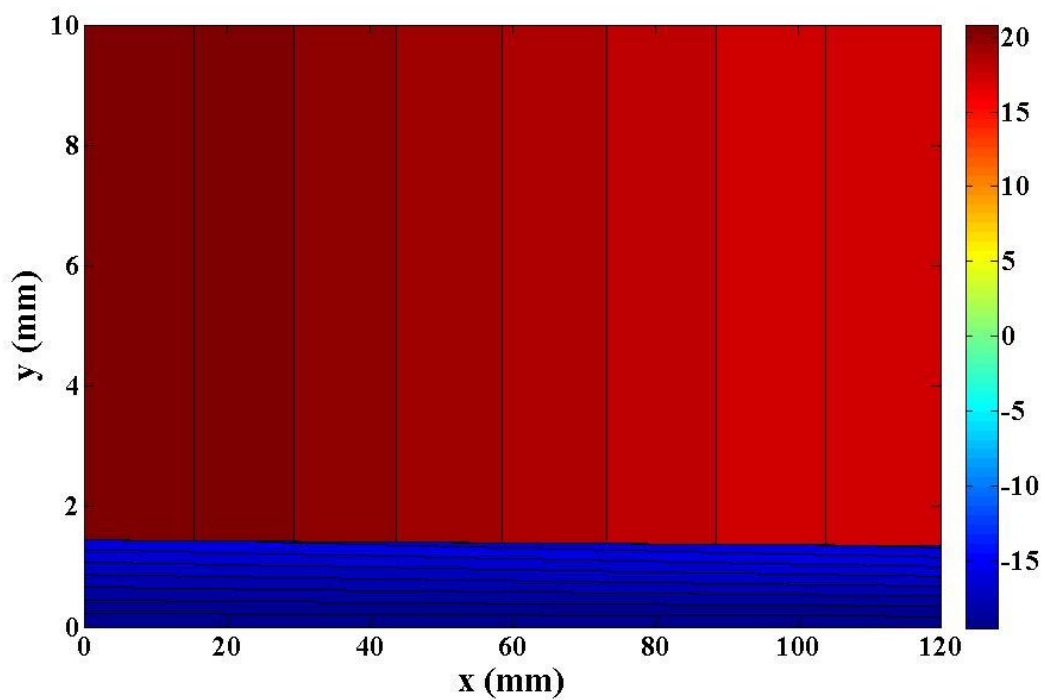


FIGURA 40 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LENIC *ET AL.* (2009) PARA EM $T = 30$ MINUTOS.

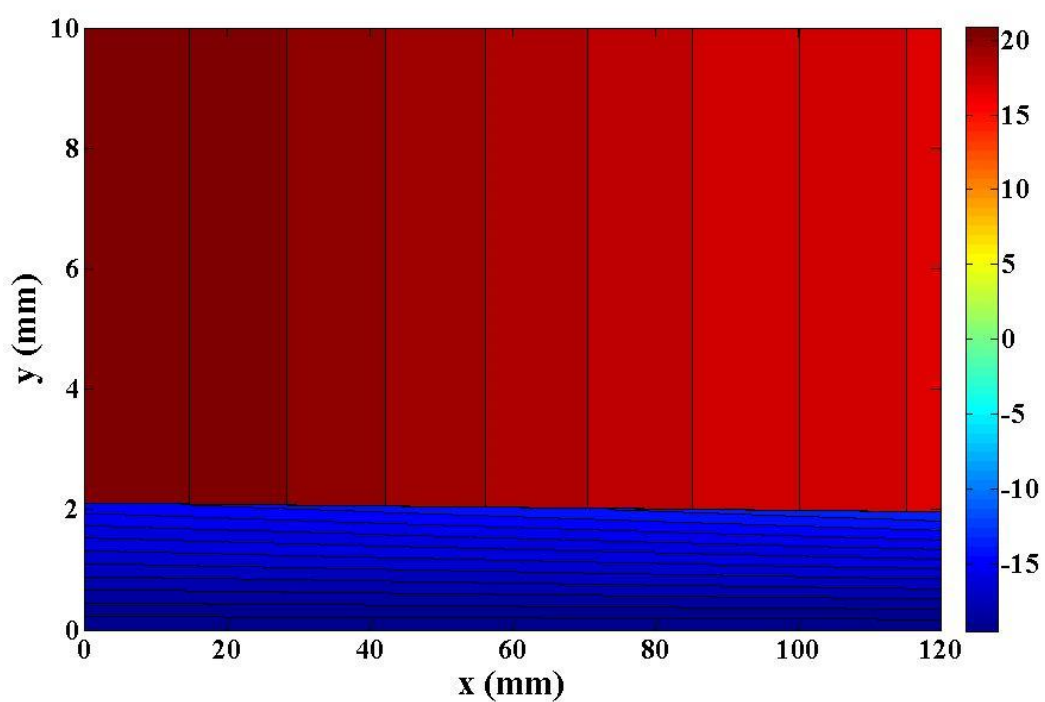


FIGURA 41 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LENIC *ET AL.* (2009) PARA EM $T = 60$ MINUTOS.

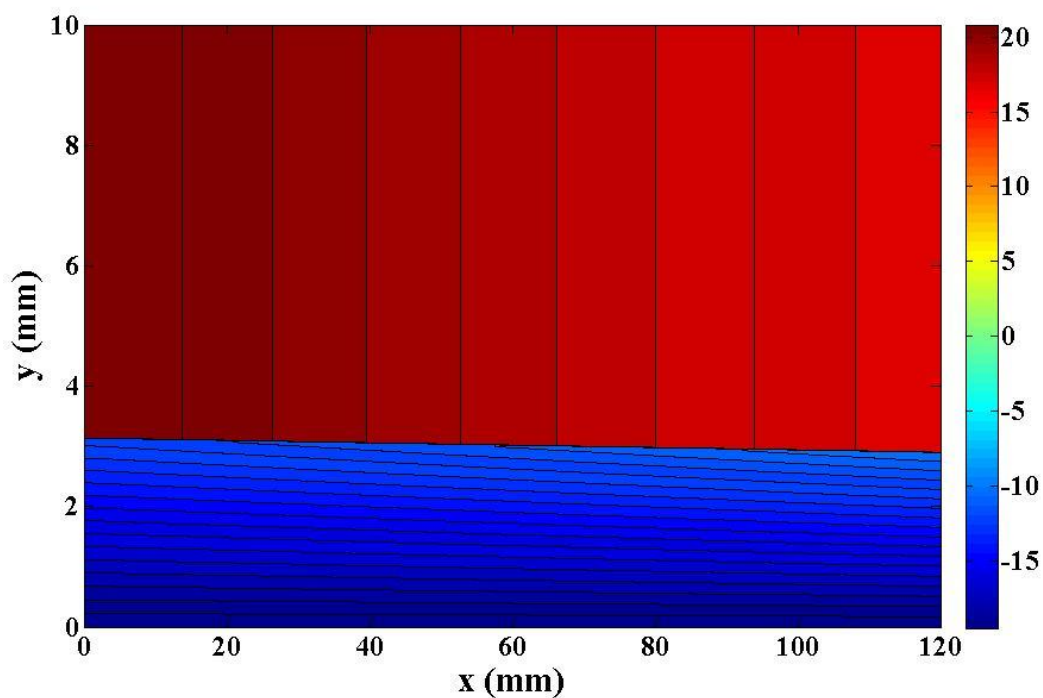


FIGURA 42 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LENIC *ET AL.* (2009) PARA EM $T = 120$ MINUTOS.

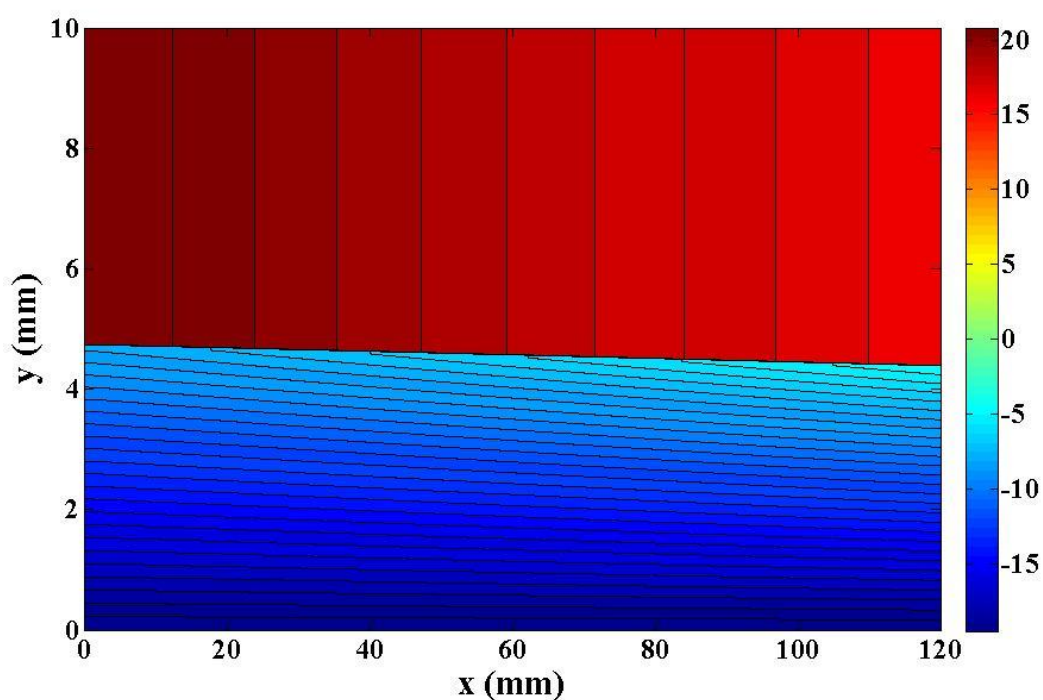


FIGURA 43 - CAMPO BIDIMENSIONAL DE TEMPERATURA AO LONGO DO CANAL PARA A CONDIÇÃO DO CASO 2 DE LENIC *ET AL.* (2009) PARA EM $T = 240$ MINUTOS.

As influências dos parâmetros de entrada dos testes sobre a evolução temporal de espessura, temperatura de superfície e densidade de geada, assim como

a influência desses parâmetros sobre alguns fatores de resposta dos testes são analisados e discutidos na próxima seção.

5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Nesta seção é explorada a sensibilidade do modelo em relação à parâmetros geométricos (espaçamento entre placas) e operacionais (umidade, temperatura de superfície, grau de super-resfriamento e velocidade do escoamento) quando cada um desses parâmetros são variados independentemente dos demais. Assim, cada parâmetro foi variado em três níveis diferentes, enquanto os demais foram mantidos constantes. Com isso, foi possível analisar de que maneira cada um deles influencia as seguintes variáveis: espessura da camada de geada, temperatura de superfície da geada, densidade da geada, taxa de calor trocado (sensível, latente e total), a massa total de geada acumulada, a perda de carga e tempo de bloqueio da seção. Salienta-se que parâmetros tais como a espessura da geada, a temperatura de superfície da geada e a densidade da geada estão sendo avaliados na saída do canal, enquanto os demais são avaliados de maneira global por toda a extensão do canal.

São mantidos fixos os parâmetros geométricos de largura e comprimento de canal, com os valores de $W = 60$ mm e $L = 40$ mm, respectivamente. Varia-se então os valores de umidade relativa, ϕ_a , em 70, 55 e 40%, os valores de temperatura de superfície, T_w da placa em -20, -15 e -10°C, os graus de super-resfriamento em ΔT_{sup} em 25, 20 e 15°C, de velocidade do escoamento u_a , em 0,7, 0,6 e 0,5 m/s, bem como para os valores de espaçamento do canal, H , em 15, 10 e 5 mm.

5.3.1 Influência da Umidade

A umidade é um dos fatores de entrada mais importante na formação de geada, pois a diferença entre a umidade absoluta carregada pelo escoamento e a umidade absoluta na superfície da geada (grau de supersaturação) indica o máximo

de geada que pode ser formada se houver condições propícias para o fenômeno. A influência da umidade de entrada é avaliada em três níveis diferentes de umidade relativa: 70%, 55% e 40%.

A Figura 44 mostra que, quanto maior é a umidade relativa do ar (e conseqüentemente a umidade absoluta, já que a temperatura e a pressão da mistura ar e vapor d'água foi mantida fixa), maior será o grau de supersaturação e maior será a espessura da geada no final no teste. Em adição, a Figura 45 mostra que a temperatura de superfície será maior no caso de maior umidade, o que se deve à maior espessura da camada de geada formada na condição de maior umidade.

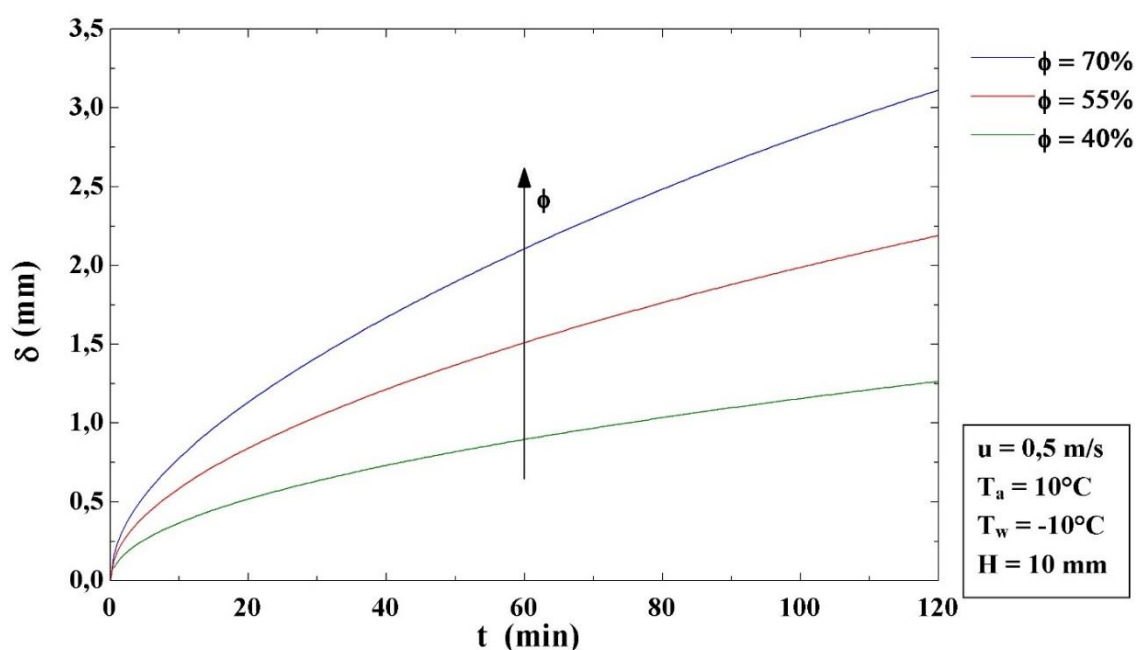


FIGURA 44 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA

A umidade influencia diretamente na densidade final da geada formada, como mostra a Figura 46. Observa-se que, quanto maior a umidade, maior é o grau de supersaturação, o que resulta em um menor número de Jakob na equação (3.39) e, conseqüentemente, em uma camada de geada mais densa e menos porosa.

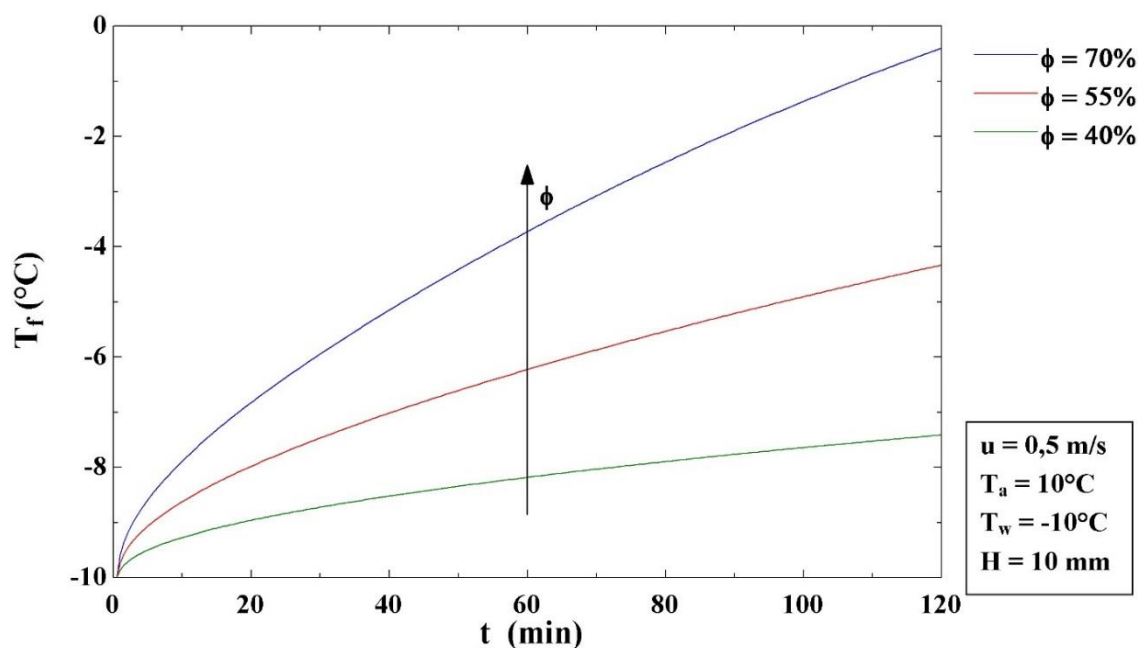


FIGURA 45 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA

A Figura 47 mostra o comportamento das taxas de transferência de calor sensível, latente e total ao longo do tempo. Nota-se que as maiores diferenças observadas entre as condições de umidade ocorrem nas taxas de calor latente, já que uma maior quantidade de vapor d'água muda de fase quando a umidade do ar é maior. A taxa de calor sensível, por sua vez, só apresenta diferenças depois de um certo intervalo de tempo, o que se deve à temperatura da superfície, que é maior para uma espessura de camada de geada maior, o que diminui a taxa de calor sensível trocado.

Note-se ainda que, quanto maior a espessura de camada da geada, maior será a razão de aspecto do canal, o que aumenta o coeficiente de transferência de calor e, conseqüentemente, as taxas de transferência de calor. Observa-se ainda que a curva de calor latente passa por um máximo, especialmente para a condição de maior umidade, o que se deve aos efeitos competitivos entre a elevação do coeficiente de transferência de calor em função da redução da área de passagem e da diminuição do fluxo de massa de vapor d'água em virtude do menor gradiente de umidade entre a corrente de ar e a superfície da geada.

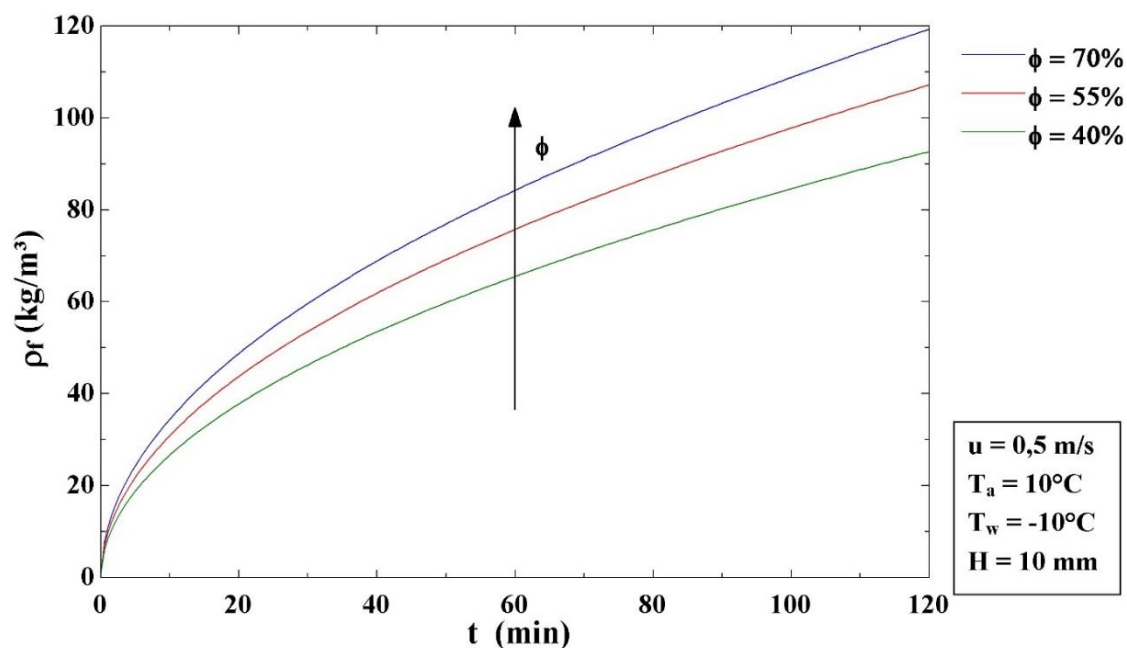


FIGURA 46 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA

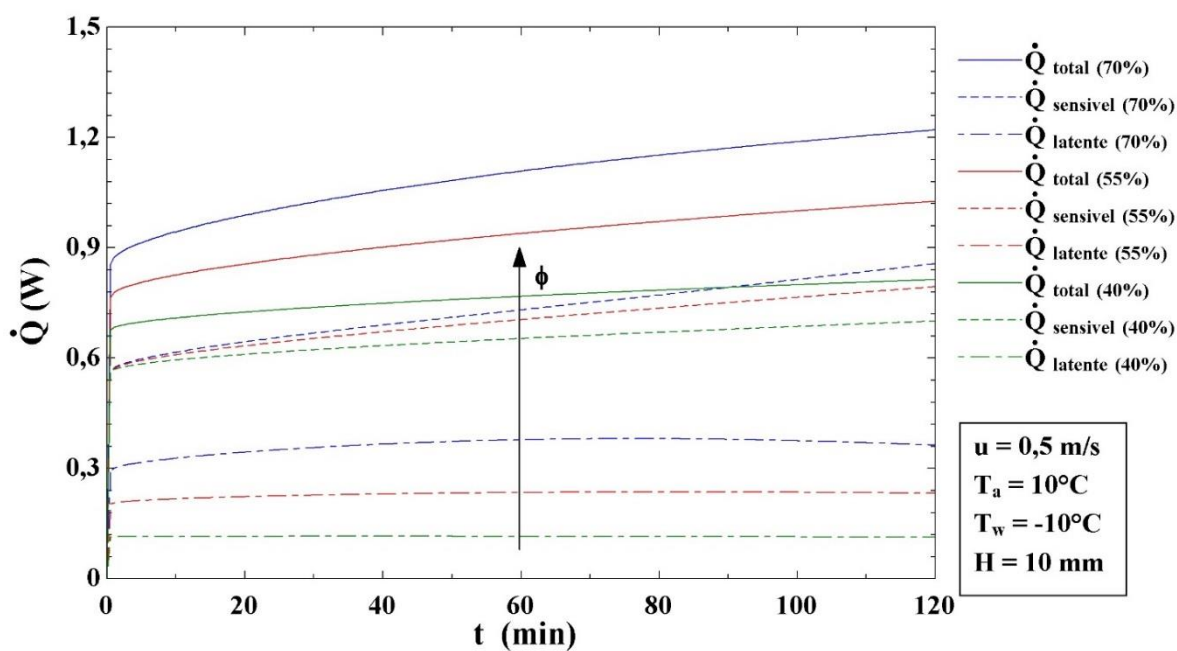


FIGURA 47 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DAS DIFERENTES TAXAS DE CALOR PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA

A Figura 48 mostra que a massa total de geada acumulada ao longo das superfícies tem um aspecto bem próximo do linear ao longo do tempo, o que se explica pelo fato de que a massa de total de geada depende tanto do fluxo de crescimento da

camada como do de adensamento, que têm comportamentos antagônicos entre si. Enquanto o primeiro diminui, o segundo cresce com o tempo. No balanço final, verifica-se uma taxa praticamente linear de acúmulo de massa. Em adição, nota-se que quanto maior a umidade, maior será a massa total acumulada de geada ao final do teste.

As FIGURAS 49 e 50 mostram respectivamente a perda de carga e a fração de passagem do canal, definida pela relação entre a área mínima de passagem e a área de face. Tais figuras são diretamente relacionadas, uma vez que, quanto maior a espessura da camada de geada, maior será o bloqueio do canal, o que aumentará a perda de carga, o que acontece para maiores quantidades de umidade. Observa-se ainda que, enquanto a área de passagem aumenta de forma praticamente linear com o aumento da umidade, a perda de carga apresenta um comportamento não-linear, que se deve à influência da área de passagem sobre a velocidade do escoamento que, para conservar a massa, aumenta à medida que a seção de passagem diminui. Como a perda de carga possui uma dependência quadrática da velocidade, ela aumenta significativamente para as condições de umidade mais altas.

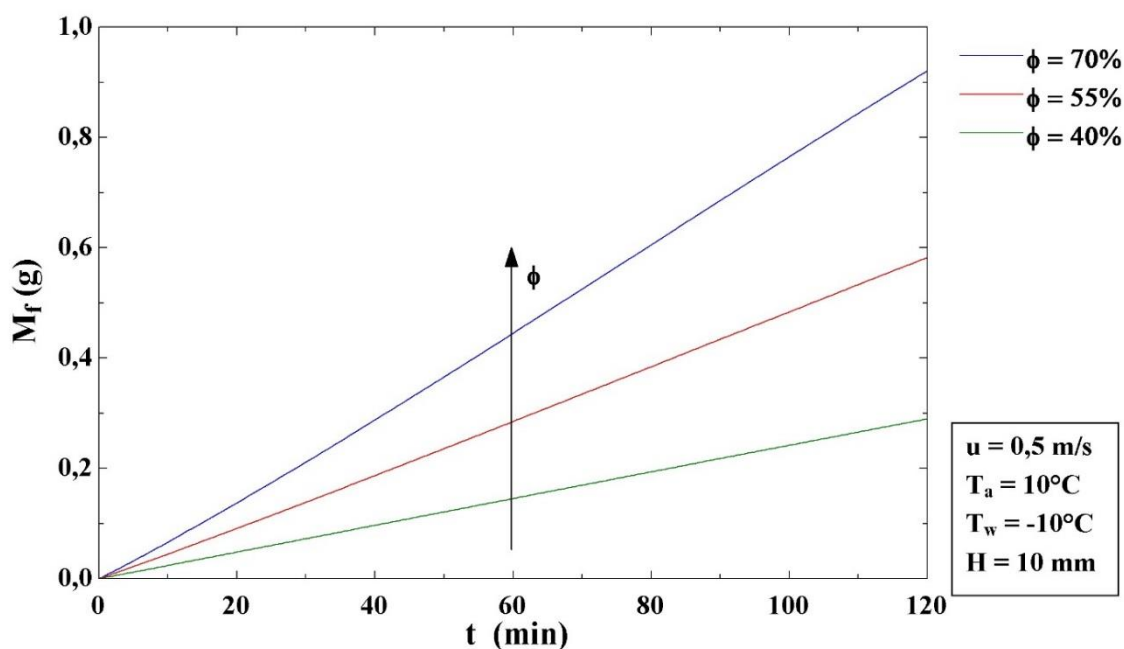


FIGURA 48 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA

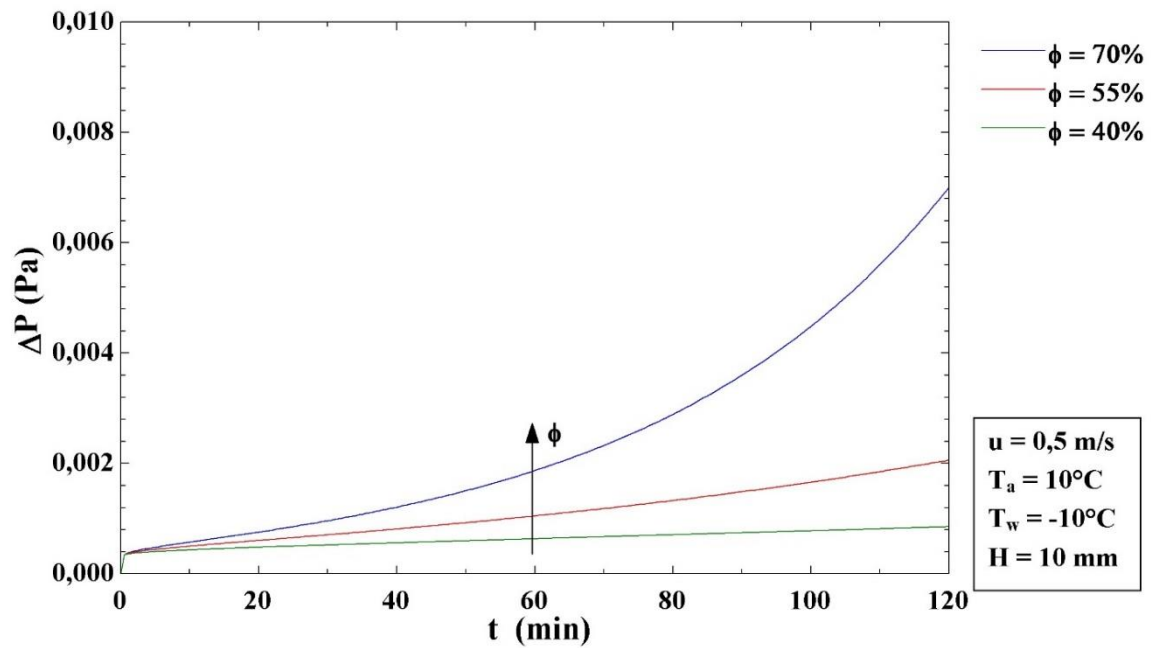


FIGURA 49 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA

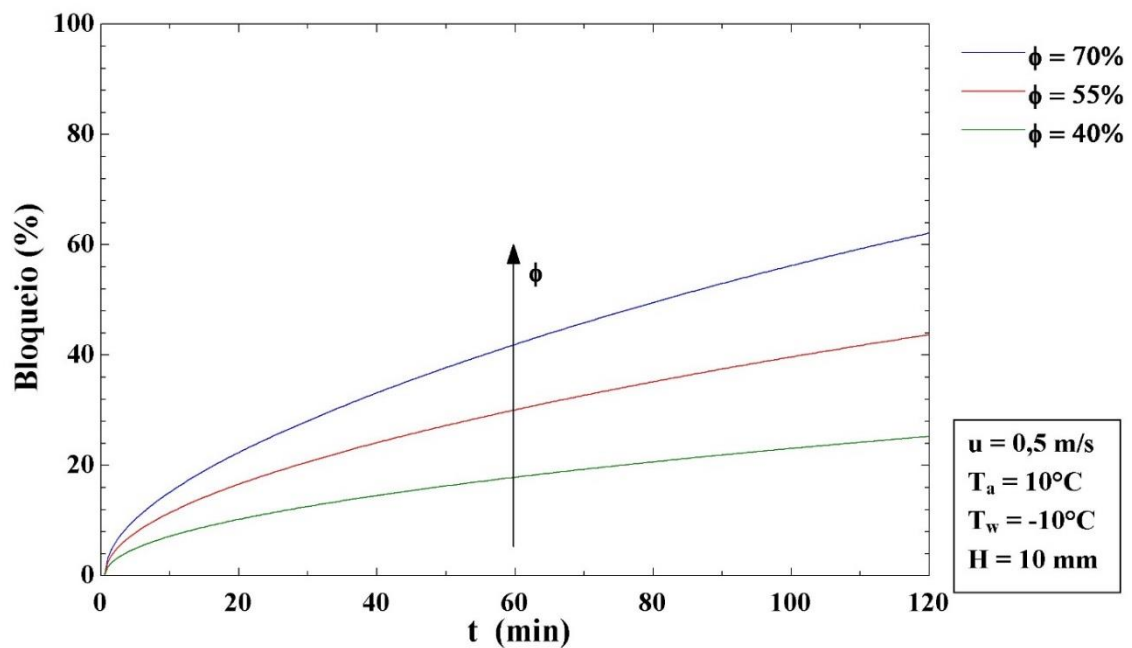


FIGURA 50 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE UMIDADE RELATIVA

5.3.2 Influência da Temperatura de Superfície da Placa Fria

A Figura 51 mostra a influência da temperatura do substrato sobre o crescimento da camada de geadas. Foram empregados três diferentes temperaturas da superfície de placa do canal: -20 , -15 e -10°C . Observa-se que, quanto menor a temperatura de superfície, maior será o grau de super-resfriamento, assim como maior será o grau de supersaturação disponível para a formação da geadas, o que acarreta em uma maior espessura de geadas para menores temperaturas de superfície.

No caso da temperatura de superfície de -20°C , indicada pela linha azul, o crescimento cessa em cerca de 80 minutos de teste. Isso acontece porque a temperatura de superfície de geadas nesse ponto alcança 0°C , o que não permite que a camada de geadas continue a crescer, contudo ainda pode existir o adensamento da mesma, o que não é visualizado pelo modelo.

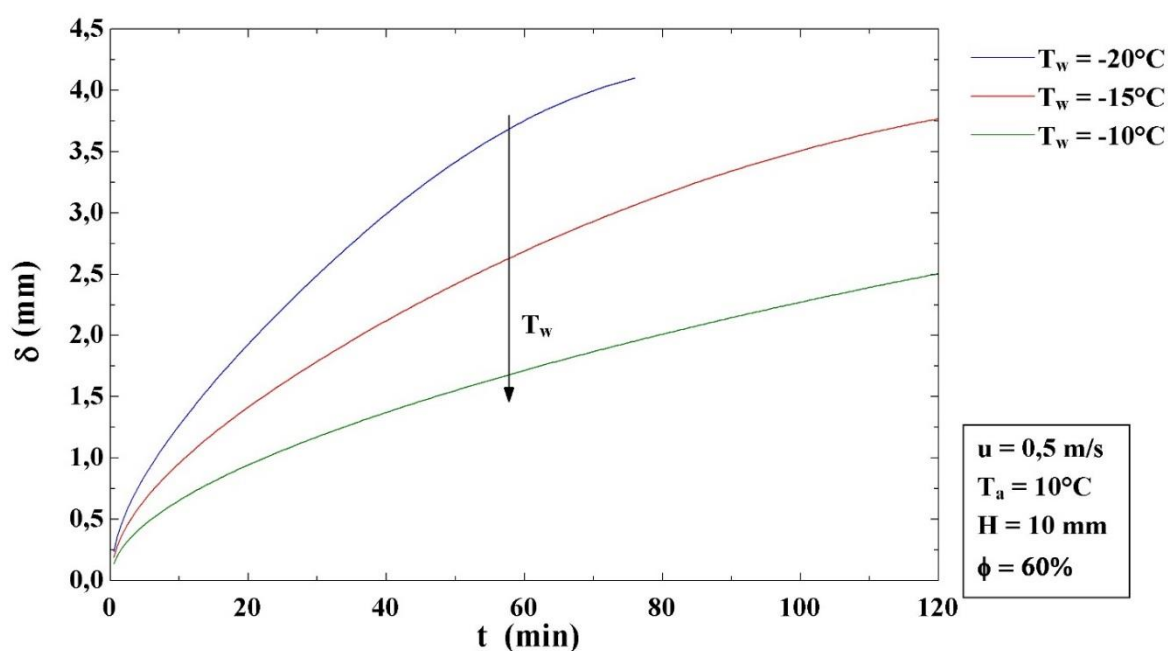


FIGURA 51 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

A Figura 52 mostra o comportamento da temperatura de superfície da geadas ao longo do tempo. Observa-se que, quanto menor é a temperatura do substrato, mais rapidamente crescerá a camada de geadas e a sua temperatura superficial. A figura mostra também que a simulação para $T_w = -20^{\circ}\text{C}$ alcança a temperatura de 0°C com antecedência em relação aos demais casos, o que explica o comportamento observado pela Figura 53, que mostra que quanto menor é a temperatura da superfície

do canal, menor também será a densidade final da geada. Isso se deve ao fato de que quanto menor é a temperatura de superfície, maior será o grau de super-resfriamento, ou seja, maior será o número de Jakob na equação (3.39), o que acarreta em uma menor densidade.

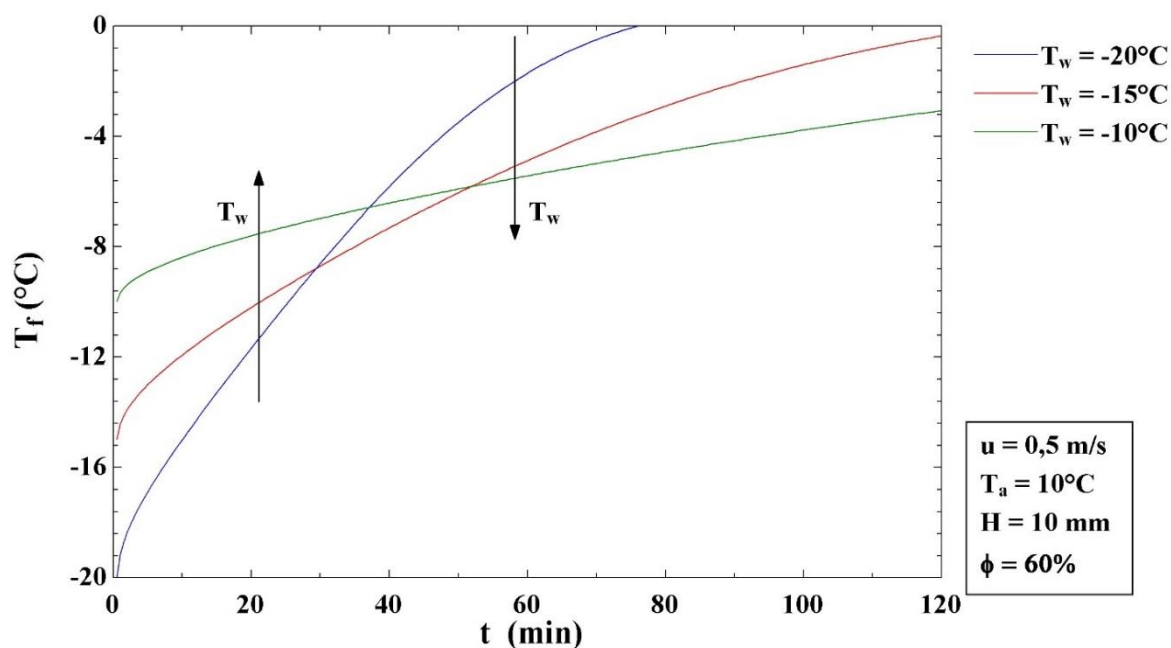


FIGURA 52 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

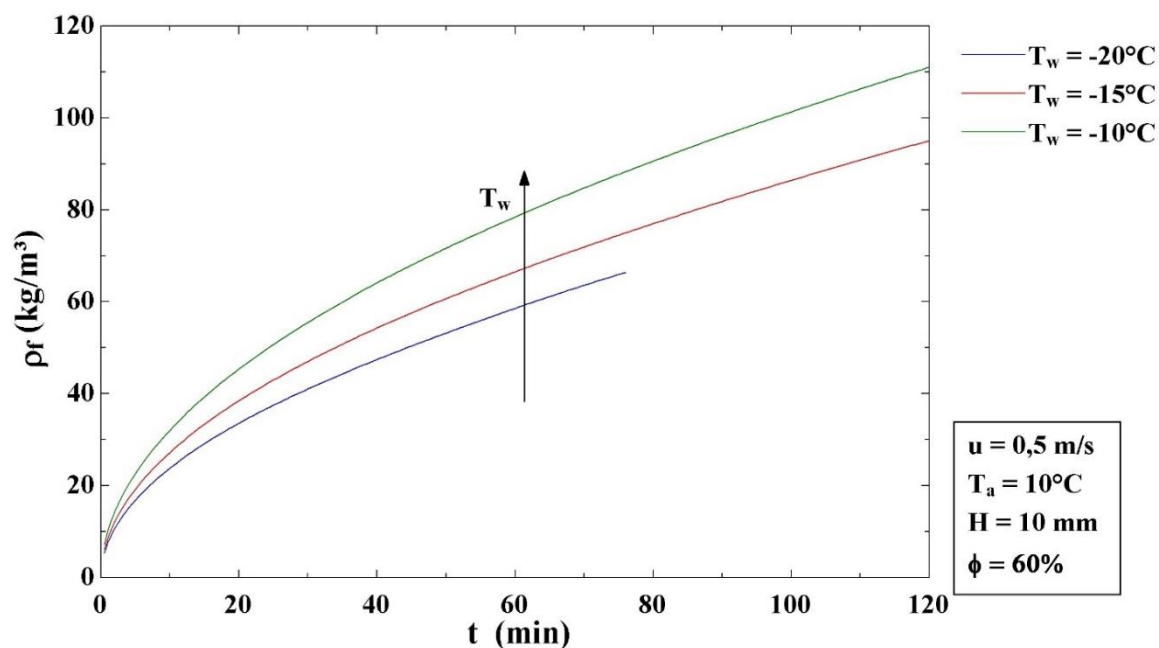


FIGURA 53 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

A Figura 54 mostra que a inflexão observada anteriormente na curva de evolução temporal do calor latente se torna mais intensa para menores temperaturas da superfície, já que os efeitos competitivos entre a taxa de crescimento da camada de geada (e do aumento do coeficiente de transferência de calor) e do fluxo de massa de vapor d'água são intensificados. Observa-se ainda que, logo após o ponto de inflexão para o calor latente, a taxa de troca de calor sensível apresenta um crescimento, o que se deve ao aumento do coeficiente de transferência de calor com o estrangulamento do canal.

A Figura 55 mostra que a massa acumulada é maior para menores temperaturas de substrato, já que a camada de geada cresce mais em tais condições. As FIGURAS 56 e 57 mostram os comportamentos da perda de carga e do bloqueio da seção. Como verificado, para baixas temperaturas de superfície há um maior crescimento da espessura da geada, o que acarreta em um maior entupimento do canal, implicando em um rápido aumento da perda de carga. É possível ver que, para o caso em que $T_w = -20^\circ\text{C}$, o bloqueio do canal chega a 80% quando a temperatura de superfície alcança 0°C .

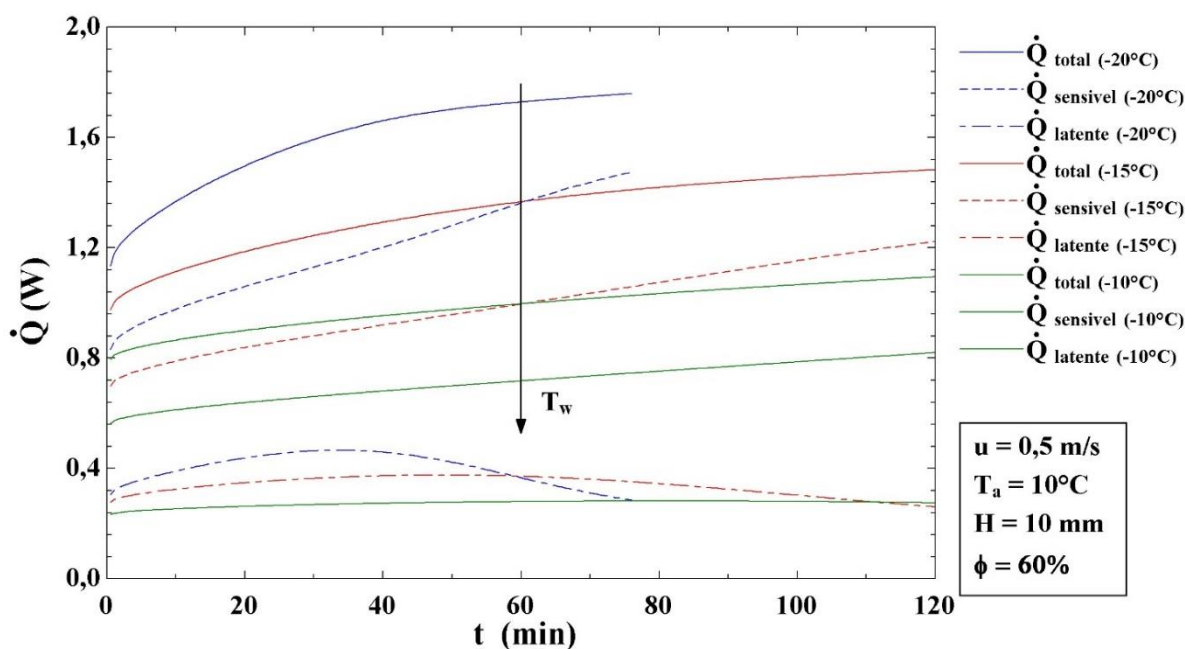


FIGURA 54 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DAS DIFERENTES TAXAS DE CALOR PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

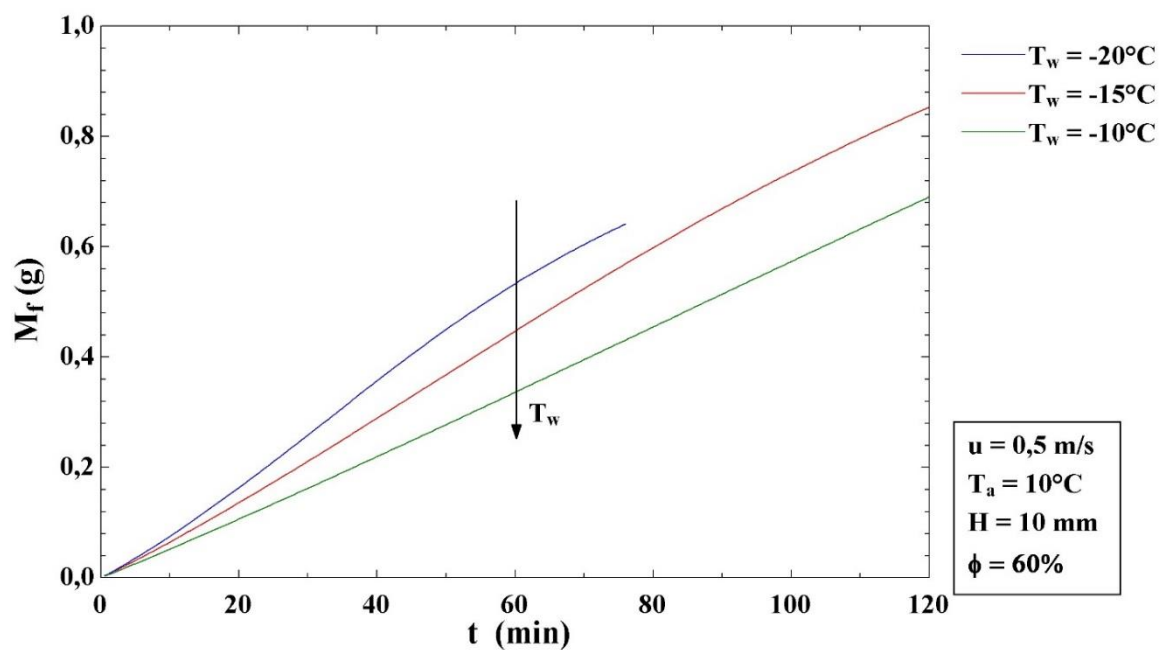


FIGURA 55 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

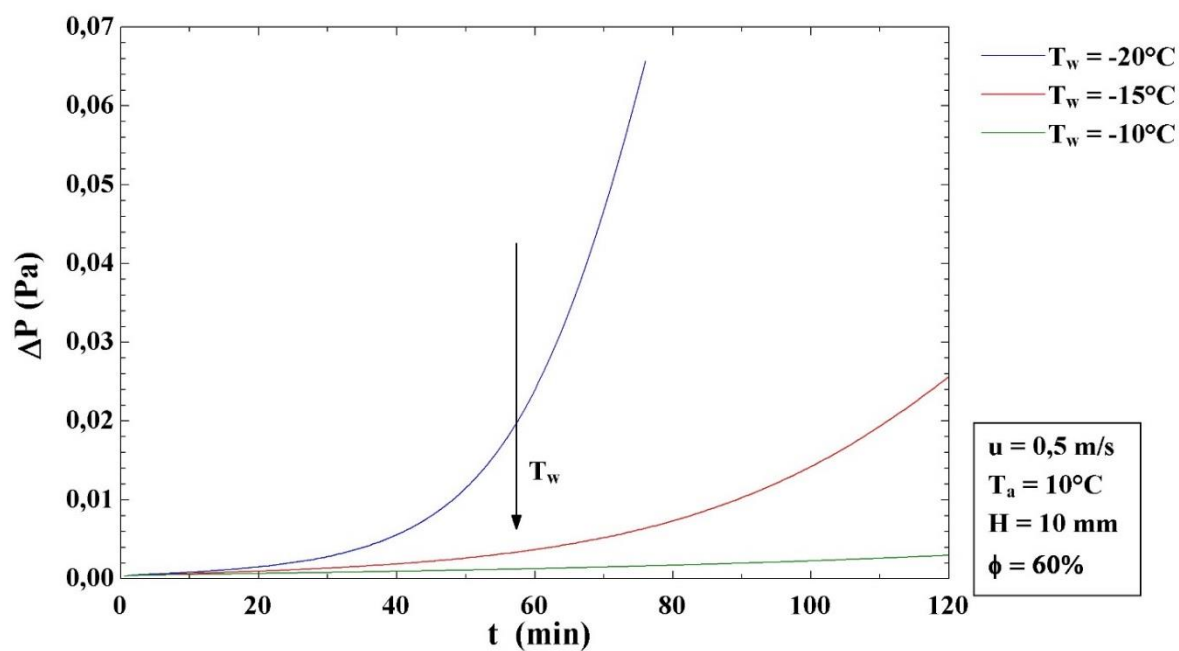


FIGURA 56 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

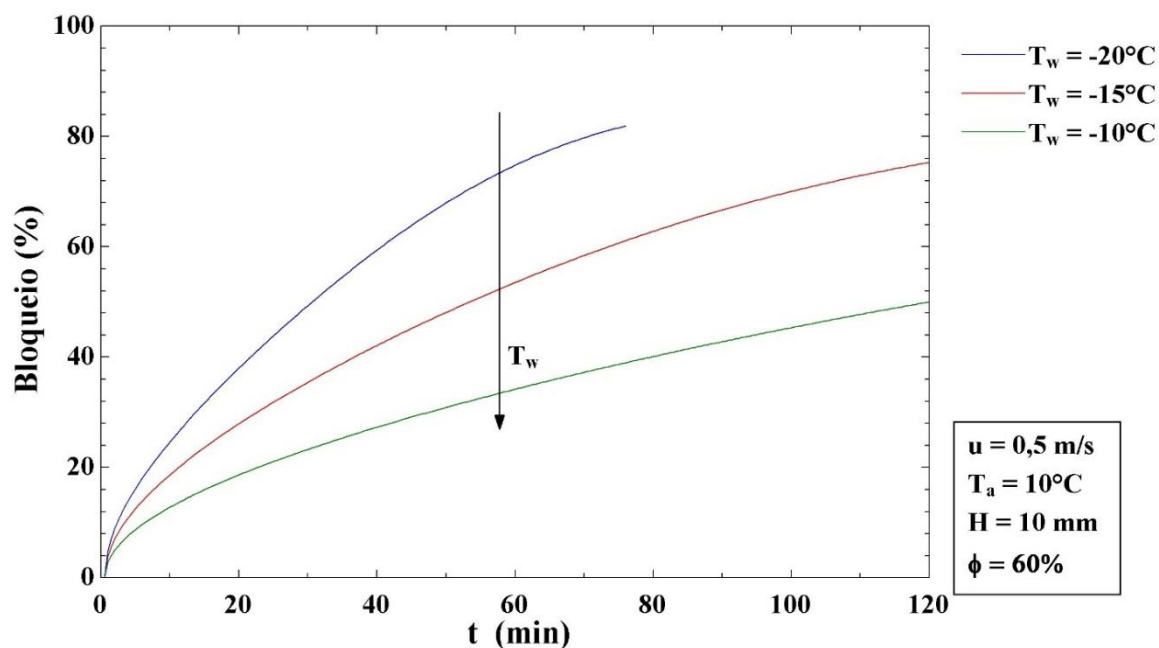


FIGURA 57 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE

5.3.3 Influência do Super-resfriamento

O grau de super-resfriamento é modificado aumentando-se a temperatura de entrada do ar do escoamento e mantendo-se fixa a temperatura da placa resfriada. Foram testados os comportamentos dos parâmetros de resposta para graus de super-resfriamento de 25°C , 20°C e 15°C .

As FIGURAS 58 e 59 mostram um comportamento semelhante àquele observado para a temperatura do substrato. Nesse caso, observa-se que, quanto maior o grau de super-resfriamento, maior será a espessura da camada de geada e, conseqüentemente, maior será a temperatura de superfície da mesma. Para a simulação utilizando um grau de super-resfriamento de 25°C houve a interrupção quando a temperatura de superfície alcançou 0°C , por volta de 70 minutos de teste.

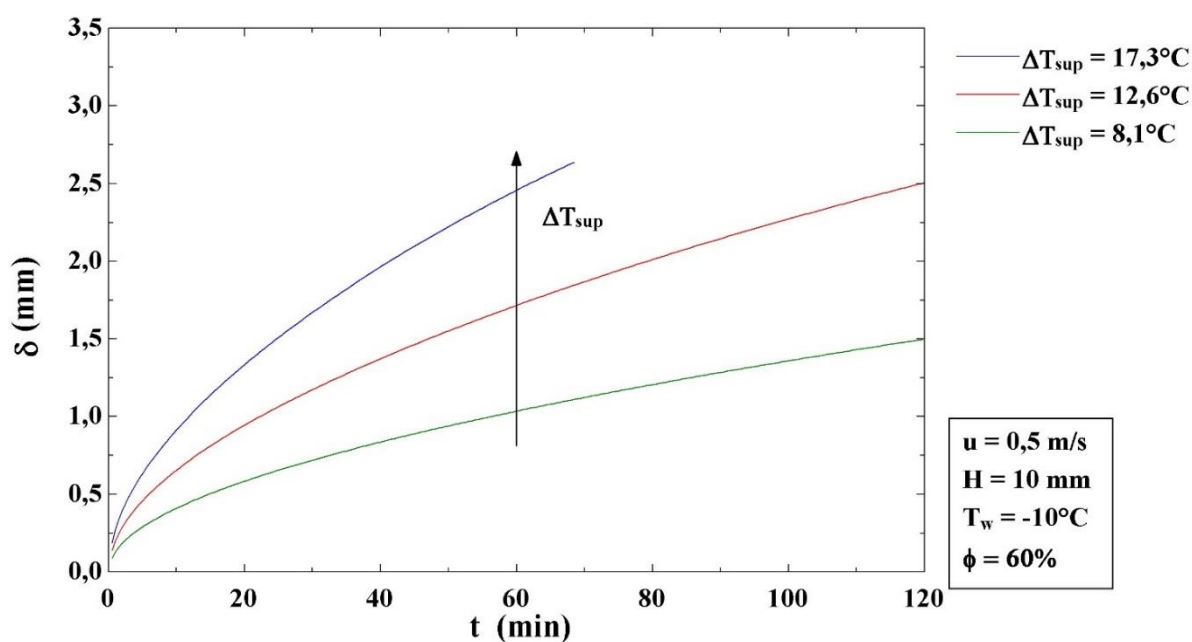


FIGURA 58 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO

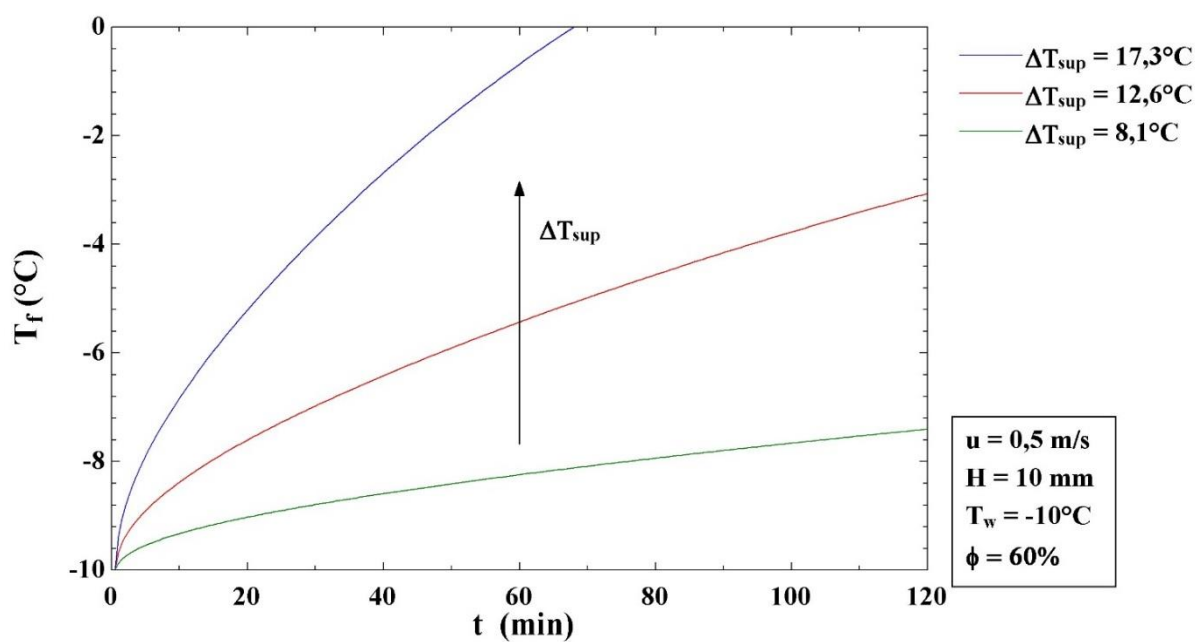


FIGURA 59 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO

Contudo, a Figura 60, que apresenta a evolução temporal da densidade da geada, mostra um comportamento diferente daquele observado na análise da temperatura de superfície. No presente caso, aumentando-se a temperatura do ar,

mas mantendo-se fixa a temperatura de superfície, a densidade de geada é maior para maiores graus de super-resfriamento. Isso pode ser explicado pelo fato de que, quanto maior a temperatura do ar, maior será a umidade absoluta carregada pelo escoamento para uma mesma umidade relativa, o que aumenta de maneira significativa o gradiente de umidade entre o ar e a superfície da geada. Isso se observa na Figura 61, a qual mostra que a taxa de calor latente não tem uma queda tão brusca, como acontecia na análise anterior, mesmo para maiores graus de supersaturação. Observa-se também na FIGURA 62 que o fluxo de massa de crescimento para o maior grau de super-resfriamento tende rapidamente a zero.

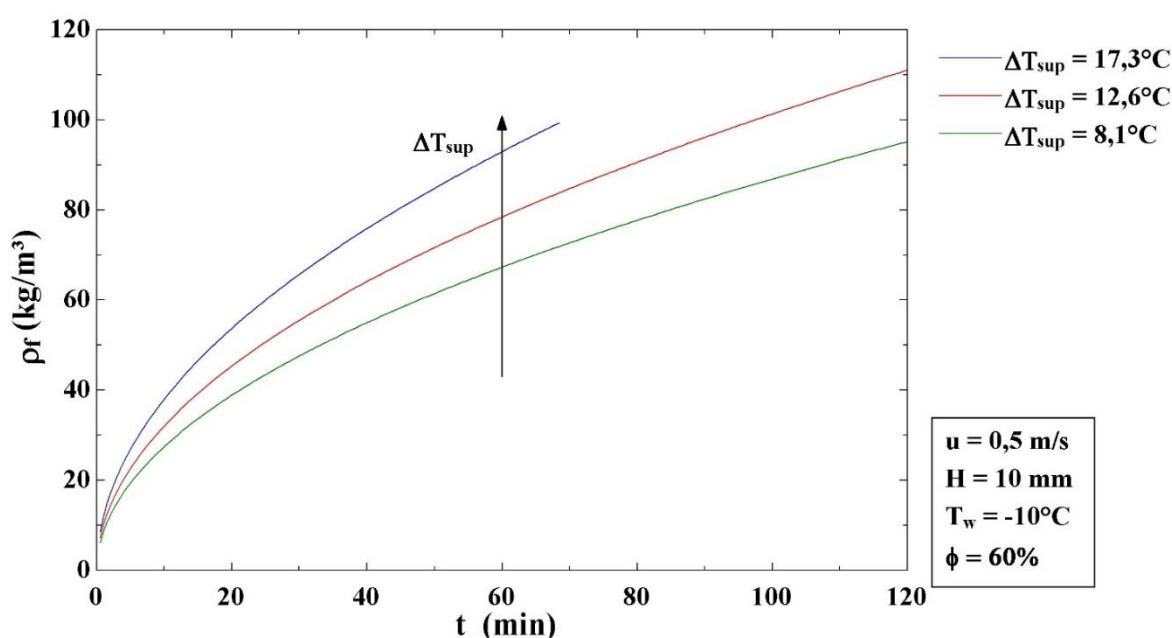


FIGURA 60 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.

A Figura 63 mostra o comportamento da massa acumulada ao longo do canal nos testes realizados, onde se observa que a massa acumulada aumenta com a temperatura do ar do escoamento, devido aos maiores fluxos de calor sensível e latente envolvidos (ver Figura 61).

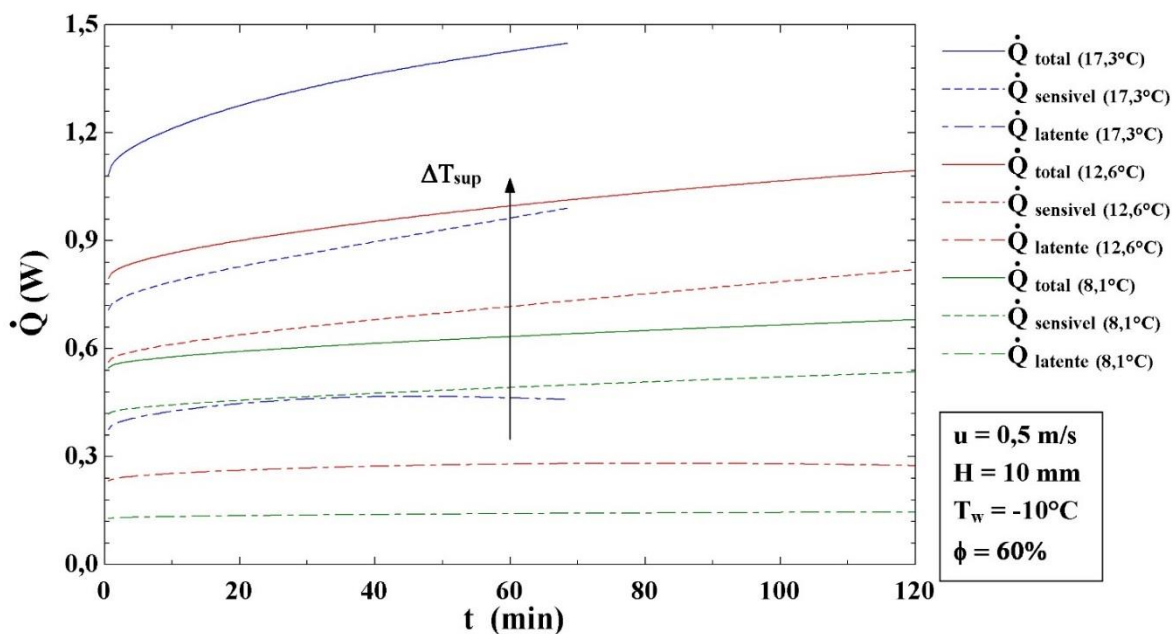


FIGURA 61 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DAS DIFERENTES TAXAS DE CALOR PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.

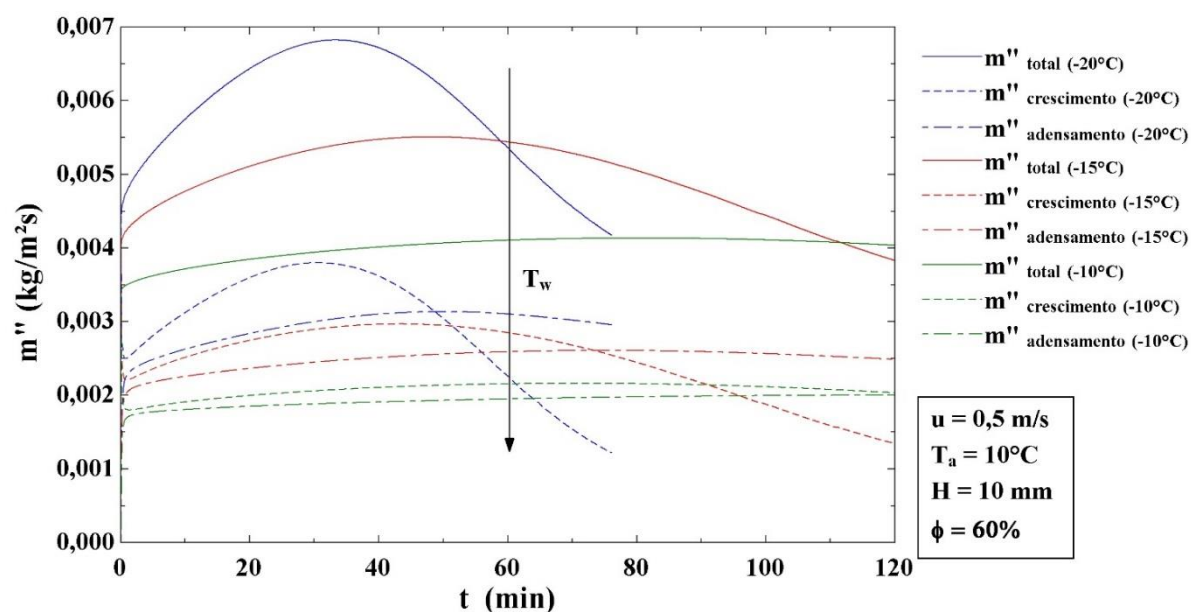


FIGURA 62 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DOS DIFERENTES FLUXOS DE MASSA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.

A influência sobre o comportamento hidrodinâmico é mostrada pela Figura 64, onde uma maior perda de carga é observada para temperatura do ar e, conseqüentemente, espessuras da camada (e fração de bloqueio, ver Figura 65) mais elevadas.

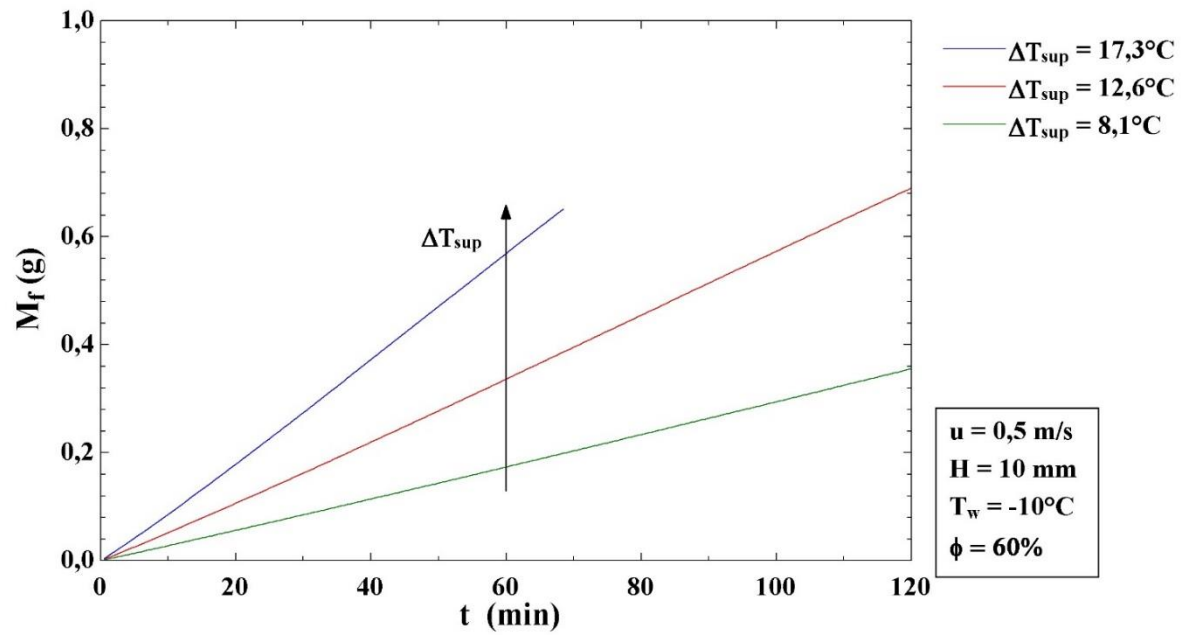


FIGURA 63 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.

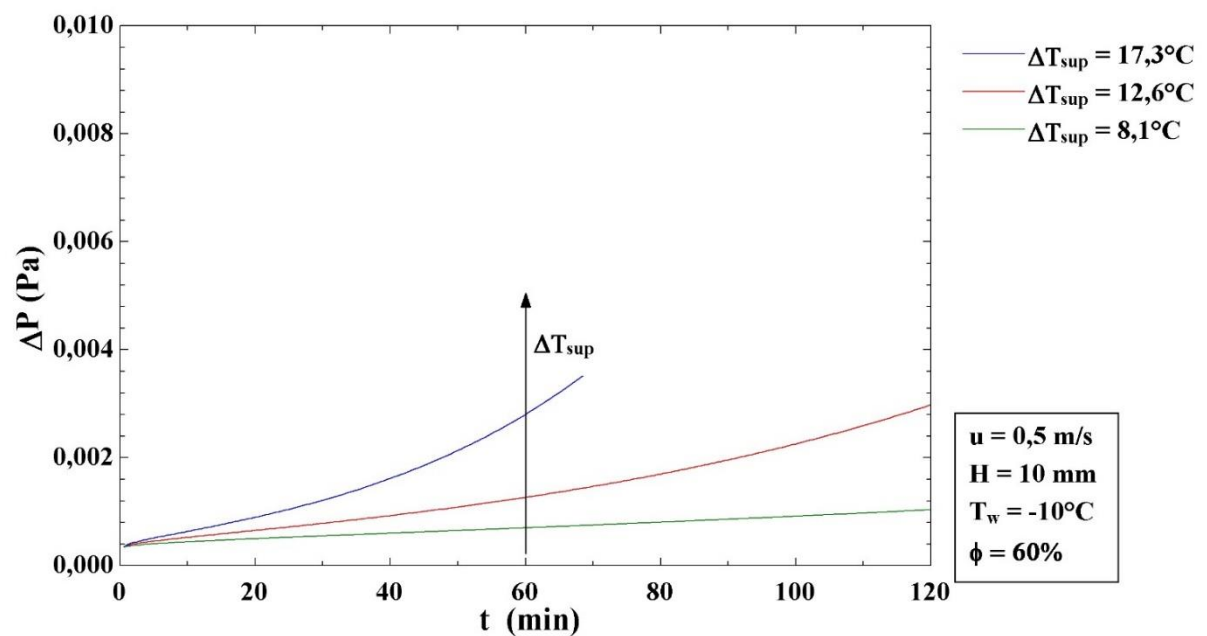


FIGURA 64 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE SUPER-RESFRIAMENTO.

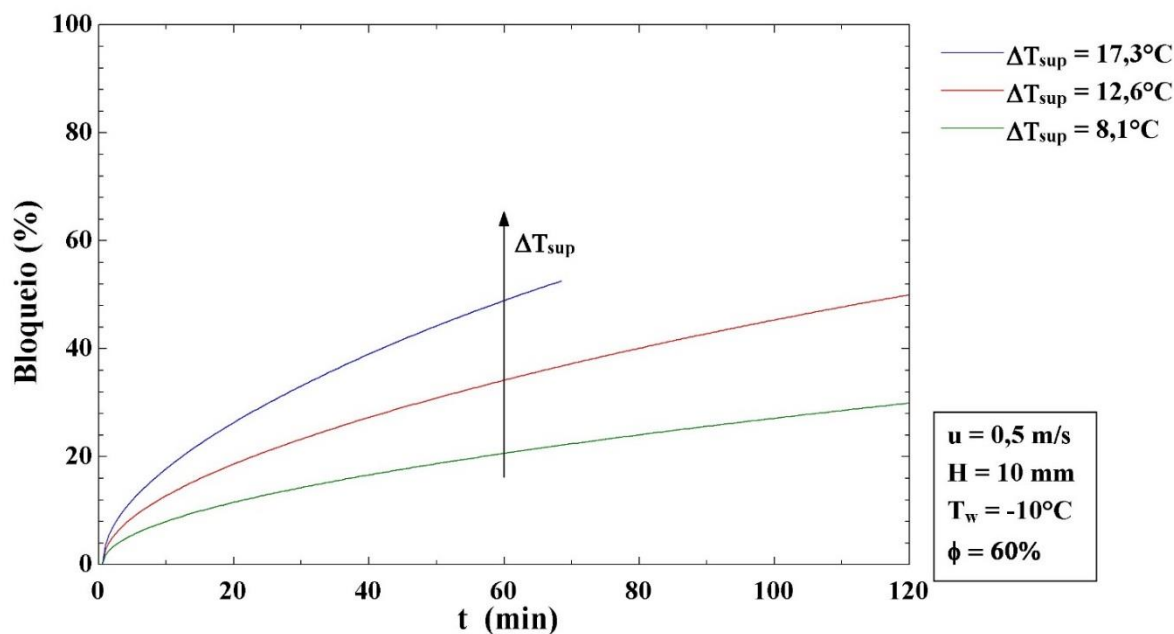


FIGURA 65 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE SÚPER-RESFRIAMENTO.

5.3.4 Influência da Velocidade

As FIGURAS 66 e 67 mostram, respectivamente, que tanto a espessura da geada como a massa acumulada praticamente não sofrem influência da velocidade. Isso se deve ao fato de que o número de Nusselt do escoamento em canal independe do número de Reynolds para o escoamento laminar. Contudo, a velocidade de face afeta a perda de carga ao longo do canal, como observado na Figura 68, apesar da fração de bloqueio não se alterar (ver Figura 69), já que Δp possui uma dependência quadrática com a velocidade, como visto na equação (3.71).

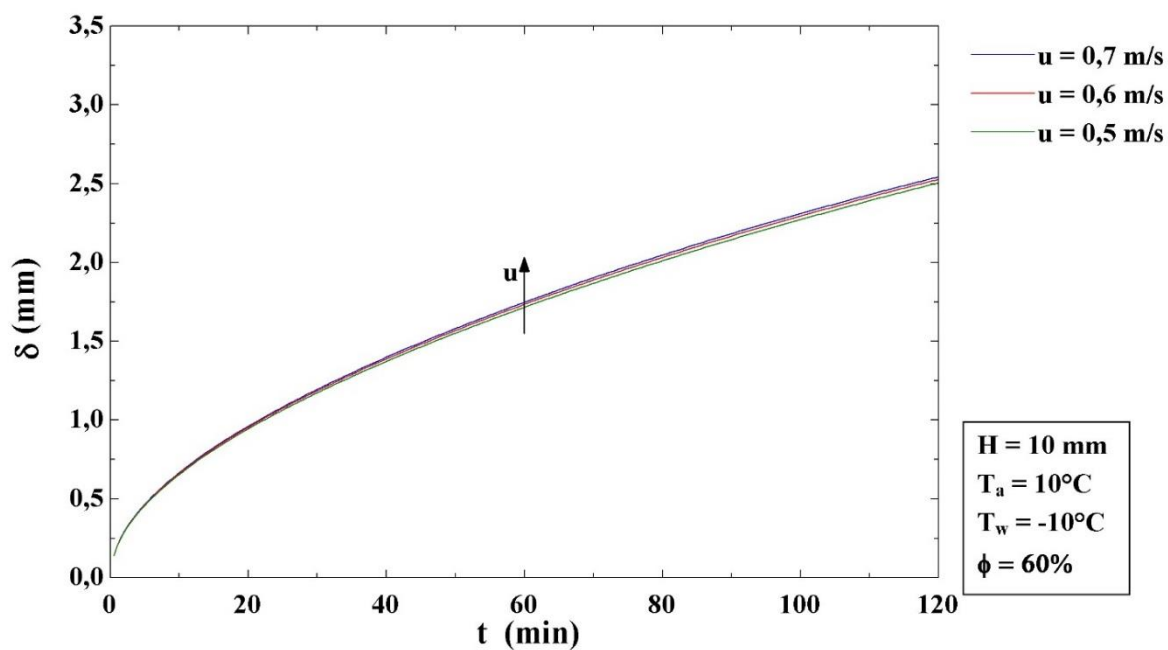


FIGURA 66 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE

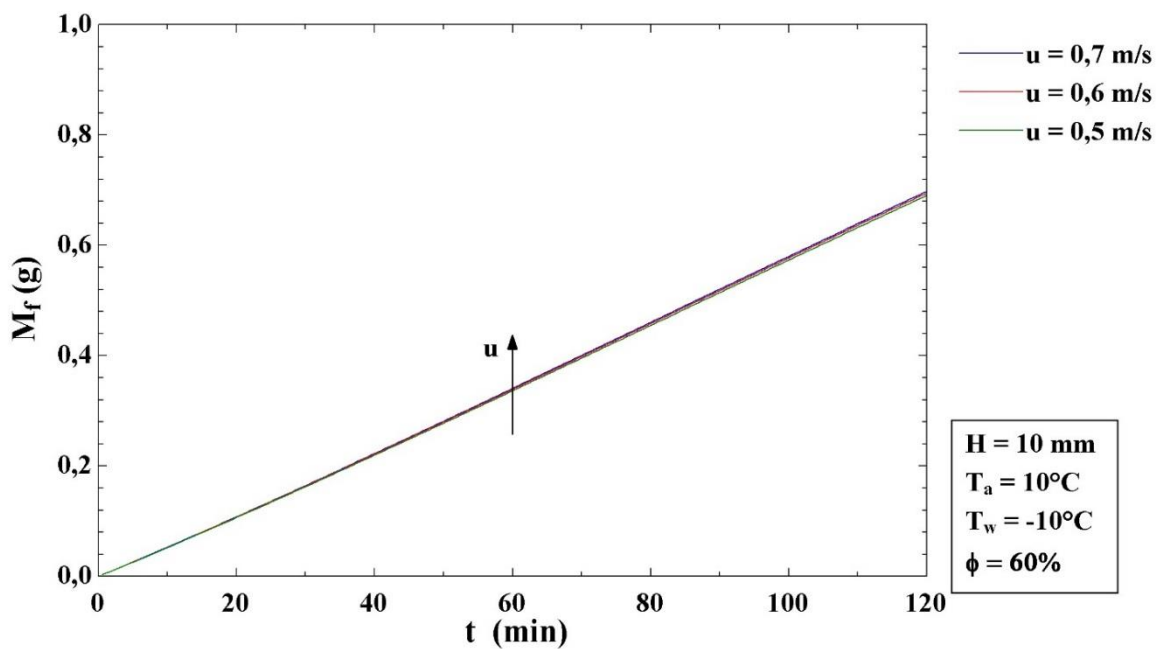


FIGURA 67 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE

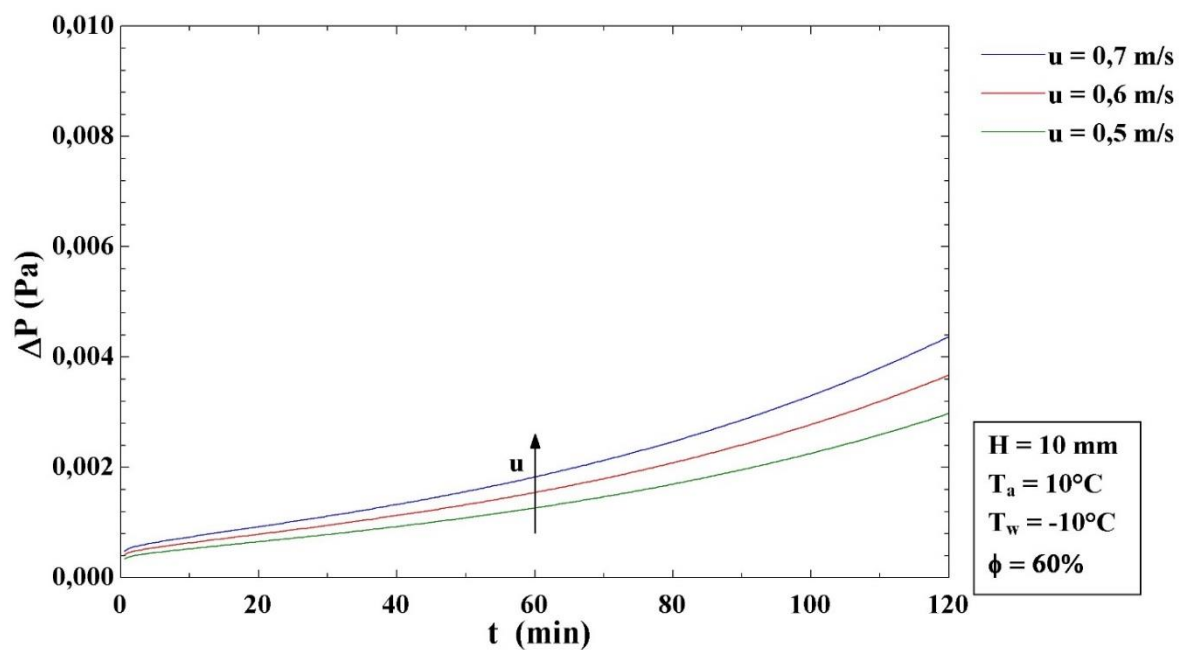


FIGURA 68 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE

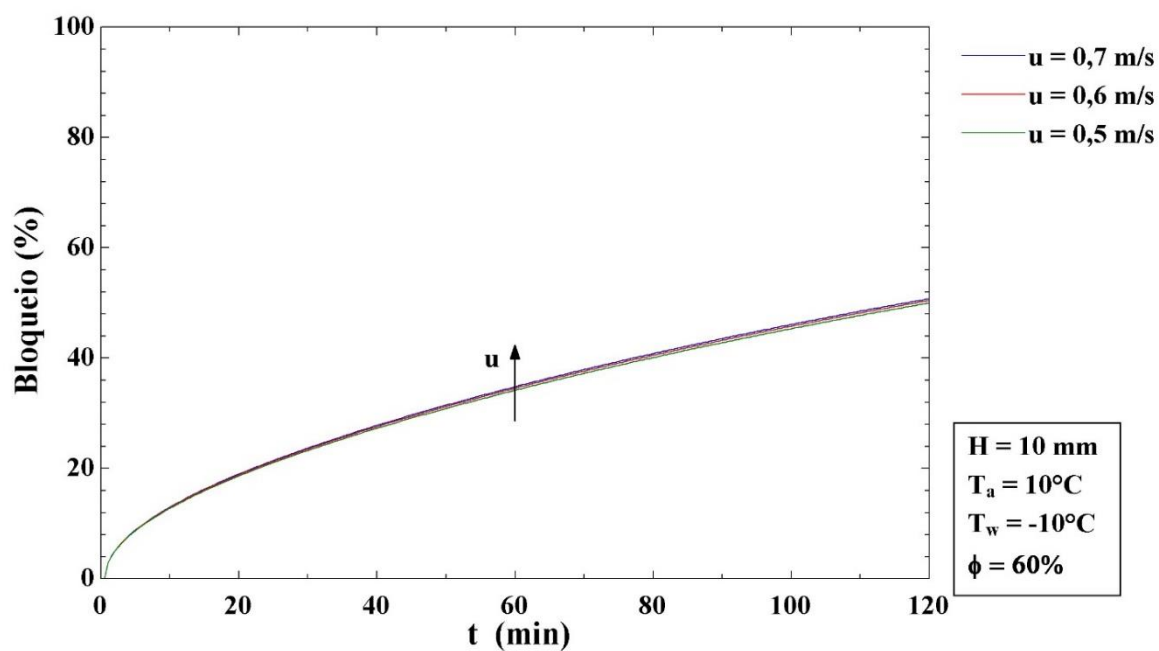


FIGURA 69 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE.

5.3.5 Influência do Espaçamento do Canal

Nesta análise, a influência do espaçamento entre as placas sobre o escoamento através do canal com formação de geada é avaliada em três níveis: 5, 10 e 15 mm, valores tipicamente encontrados em evaporadores de refrigeradores domésticos.

A Figura 70 mostra que a espessura da camada de geada é tanto maior quanto menor for o distanciamento entre as placas. Isso acontece porque, quanto mais próximas são as placas, maior é o coeficiente de transferência de calor, $h_c = Nu_{DH}/H$, uma vez que o número de Nusselt é constante em escoamentos desenvolvidos em canais. Com o aumento do coeficiente de transferência de calor, tem-se aumento nos fluxos de calor e massa e, conseqüentemente, uma maior taxa de crescimento da geada. Isso se observa na Figura 71, que mostra que a temperatura de superfície de geada em um canal de distanciamento 5 mm alcançou rapidamente a temperatura de 0°C. A Figura 72, por sua vez, mostra que a espessura é pouco influente à densidade da geada, visto que esta independe da transferência de calor, como observa-se na equação (3.38).

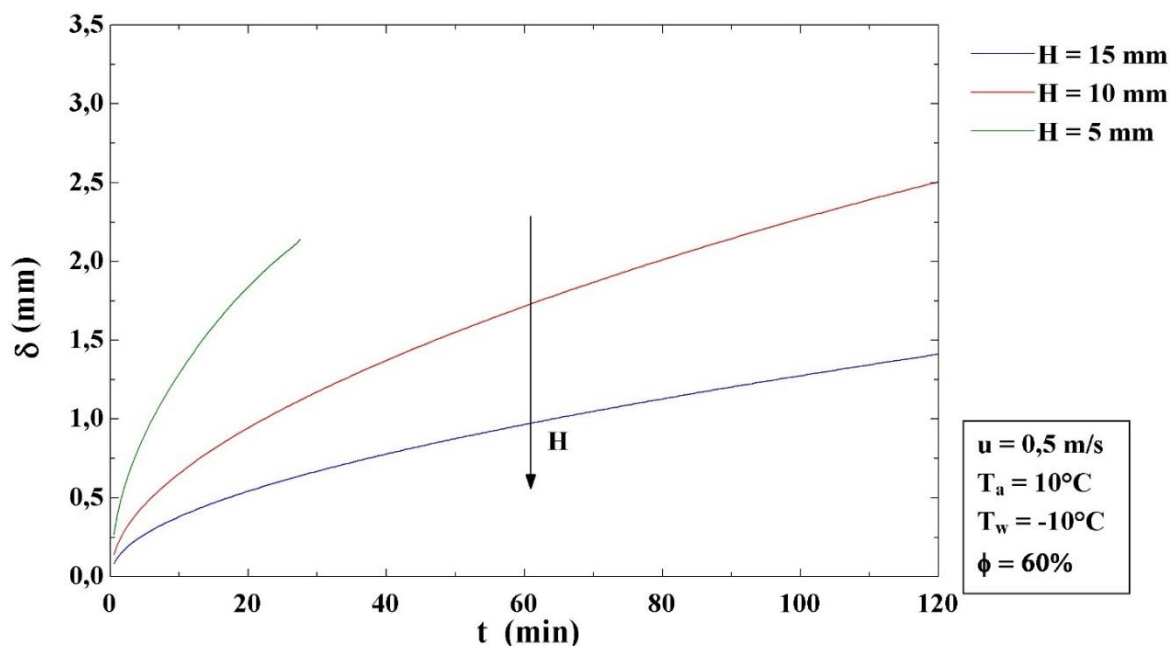


FIGURA 70 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS

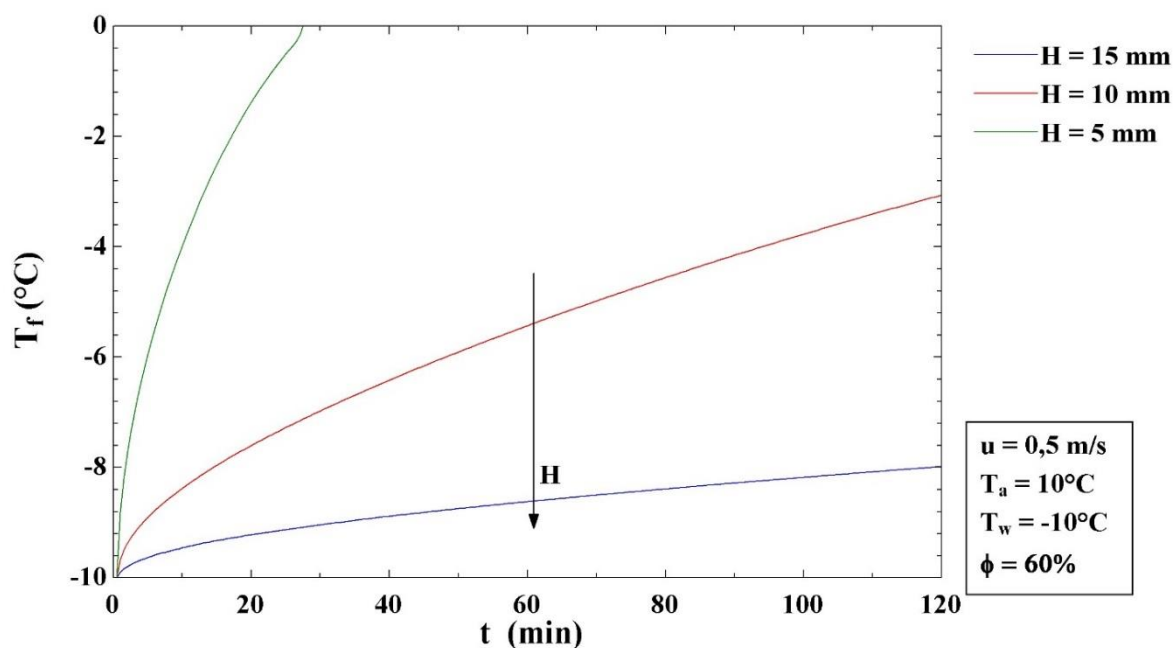


FIGURA 71 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CAMADA DE GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS

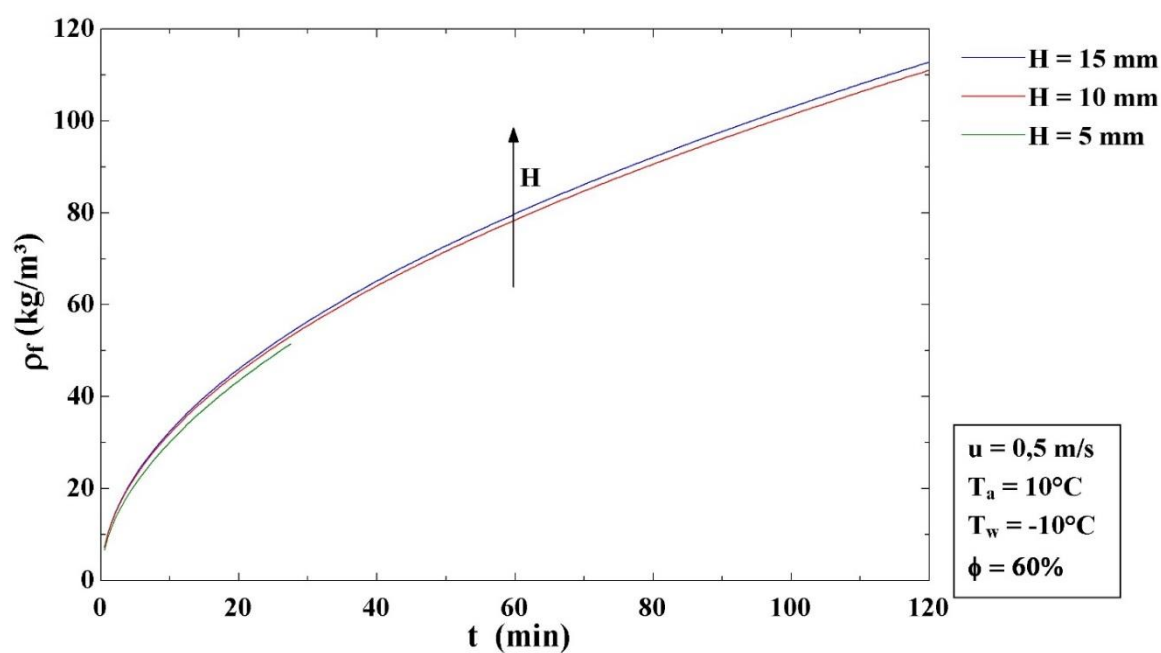


FIGURA 72 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS

A Figura 73 mostra que um canal mais esbelto favorece um maior acúmulo de massa de geada devido ao maior fluxo de crescimento que ocorre no mesmo, enquanto as FIGURAS 74 e 75, mostram o canal sendo praticamente bloqueado pelo

rápido crescimento da geada no caso de um canal de espaçamento de 5 mm. Neste caso, a perda de carga aumenta consideravelmente com o rápido aumento do bloqueio do canal, que ultrapassa os 80% da área livre antes de o crescimento da camada cessar devido à temperatura de superfície da mesma alcançar 0°C

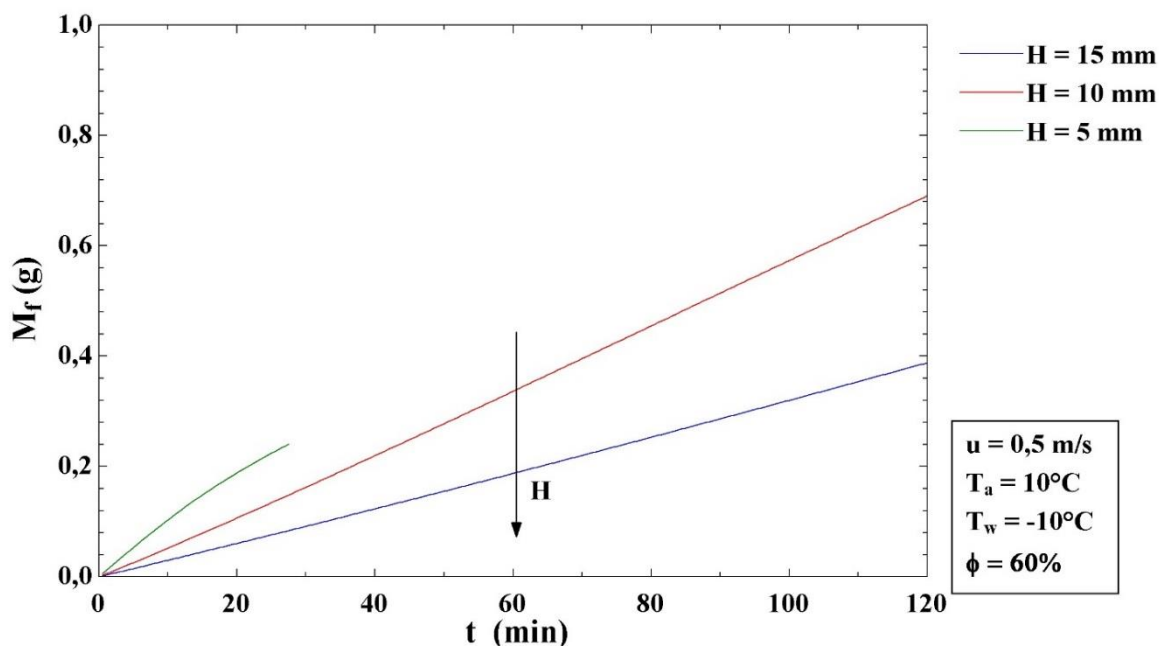


FIGURA 73 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA MASSA TOTAL DE GEADA ACUMULADA PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS

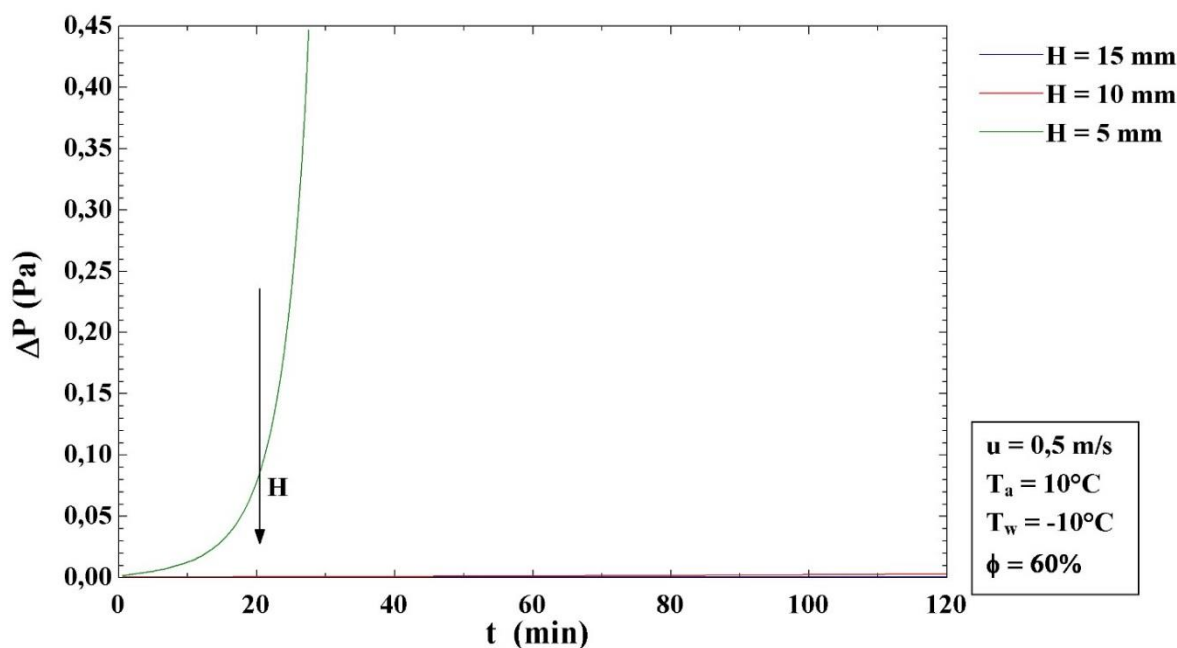


FIGURA 74 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS

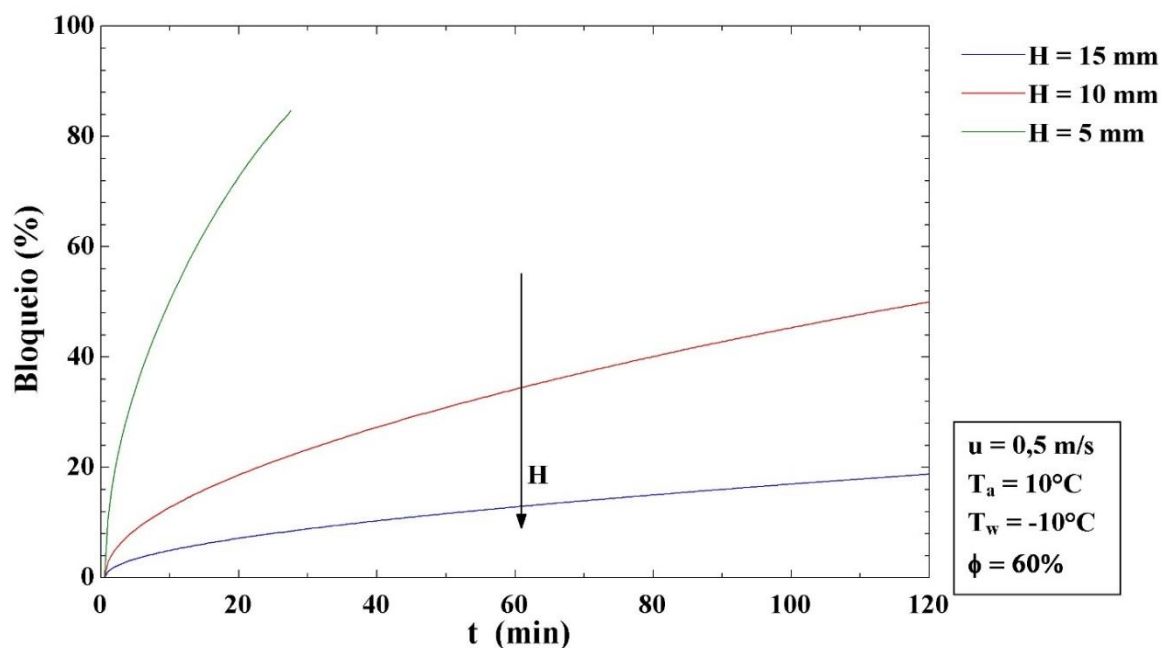


FIGURA 75 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIAÇÃO DA ÁREA DE BLOQUEIO DO CANAL PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇAMENTO DAS PLACAS

5.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS

O capítulo mostra os resultados extraídos das análises numéricas realizadas através do modelo matemático proposto no presente trabalho para a formação de geada em superfícies planas. O modelo foi inicialmente validado contra dados experimentais confiáveis obtidos por Hermes *et al.* (2009) para placas planas paralelas, onde os parâmetros de fechamento foram selecionados. Comparações com dados experimentais para o escoamento em canais de placas paralelas isotérmicas foram também realizadas fazendo-se uso de dados experimentais de Lürer e Beer (2000) e Lenic *et al.* (2009), quando uma concordância satisfatória foi observada. Após o exercício de validação, foram mostrados e discutidos os campos espaciais de espessura, porosidade e temperatura da camada de geada formada em canais. Por fim, uma análise de sensibilidade das variáveis resposta do modelo em relação aos parâmetros geométricos e operacionais foi realizada e discutida.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho, foi discutida a importância de um estudo para a obtenção de um modelo matemático, com foco na formação de geada em geometrias que sejam capazes de emular as condições encontradas nas superfícies dos evaporadores encontrados nos principais tipos de refrigeradores, em suas condições típicas de operação.

Para tanto, foi realizada uma revisão dos principais trabalhos existentes na literatura aberta, não só sobre a formação de geada em placas planas e canais de placas paralelas, mas, também, sobre superfícies de trocadores de calor tipo tubo-aleta. Foi realizada também, uma breve revisão da fundamentação teórica dos mecanismos de nucleação, crescimento e adensamento da geada.

Com base na revisão bibliográfica, na fundamentação teórica, e em dados experimentais de terceiros, fez-se a proposição de uma correlação semi-empírica adimensional para computar a evolução temporal da densidade da camada de geada ao longo do tempo. Tal equação evolutiva surgiu da observação de que, para condições de formação de geada em refrigeradores domésticos, ocorre a nucleação e posterior crescimento de pequenas colunas de gelo que crescem no decorrer do tempo, de modo que, tanto o crescimento da camada como a densidade da geada obedecem a escala de $t^{1/2}$.

Através dessa constatação, elaborou-se um método matemático de transferência de calor e massa para a formação de geada em placas planas e canais. O modelo foi resolvido através de um método de solução com somente um laço temporal para placas planas e um laço temporal e outro espacial para canais. O modelo foi validado contra dados experimentais da literatura aberta, onde se obteve uma concordância com erros na banda de $\pm 10\%$ para placas planas e canais.

No caso de escoamento em canais, uma análise de sensibilidade foi realizada a fim de complementar a análise de sensibilidade realizada por Piucco (2008) para escoamentos sobre placas planas com formação de geada. Com isso, chegou-se à

conclusão de que os parâmetros físicos de maior sensibilidade ao modelo são aqueles associados ao grau de super-resfriamento, i.e., a temperatura e a umidade do ar, bem como a temperatura do substrato, enquanto a velocidade tem pouca influência sobre a formação de geada, haja vista que Nu independe da velocidade no caso de escoamentos laminares plenamente desenvolvidos, em canais de placas paralelas. Mostrou-se ainda que o distanciamento entre as placas do canal, parâmetro bastante relevante ao projeto termo hidráulico de evaporadores para sistemas de refrigeração, exercem influência significativa sobre a formação da geada.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- Obtenção de uma correlação generalizada para a densidade da geada com base em um conjunto de dados mais abrangente, válidos para uma ampla faixa de morfologias;
- Desenvolver um modelo semi-empírico para a condutividade térmica da geada aos moldes daquele proposto para a densidade;
- Validação do modelo contra uma base de dados ampliada, para diferentes condições geométricas (placas, canais) e morfológicas;
- Desenvolvimento de um modelo totalmente distribuído para a formação de geada em canais através de métodos da Mecânica dos Fluidos Computacional;
- Desenvolvimento de modelos para o escoamento com formação de geada em cilindros e feixes de tubos cilíndricos;
- Desenvolvimento de modelos para o escoamento com formação de geada em geometrias reais de trocadores de calor do tipo tubo-aleta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALJUWAYHEL, N. F. **Numerical and Experimental Study of the Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Industrial Evaporator Coils**. 2006. 288 f. Ph.D. Thesis - University Of Wisconsin - Madison, USA, 2006.

BAEHR, H. D.; STEPHAN, K. **Heat and Mass Transfer**. 2nd ed., Berlin, Germany: Springer, 1996.

BECKER, R.; DOERING, W. **Ann. Physik** 24, 719. 1935

BEJAN, A.; VARGAS, J. V. C.; LIM, J. S. When to defrost a refrigerator, and when to remove the scale from the heat exchanger of a power plant. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, p. 523-532. Feb. 1994.

BORGES, N. B. **Modelagem semi-empírica de um refrigerador frost-free sujeito a abertura de portas**. 2013. Dissertação de Mestrado – POSMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

CHEN, H.; THOMAS, L.; BESANT, R. W. Modeling Frost Characteristics on Heat Exchanger Fins: Pt. I, Numerical Model, **ASHRAE Transactions**, v. 106, n. 2. 2000a

CHEN, H.; THOMAS, L.; BESANT, R. W. Modeling Frost Characteristics on Heat Exchanger Fins: Pt. II, Model Validation and Limitations, **ASHRAE Transactions**, v. 106, n. 2. 2000b

CHEN, H; THOMAS, L; BESANT, R W. Fan supplied heat exchanger fin performance under frosting conditions. **International Journal of Refrigeration**, v. 26, n. 1, p.140-149, Jan. 2003.

CHENG, C.H.; CHENG, Y.C. Predictions of frost growth on a cold plate in atmospheric air. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 28, n. 7, p.953-962, Oct. 2001

CHENG, C.H; SHIU, C.C. Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 45, n. 21, p.4289-4303, Oct. 2002.

CHENG, C.; WU, K. **Observations of Early-Stage Frost Formation on a Cold Plate in Atmospheric Air Flow**, ASME Journal of Heat Transfer, v. 125, n. 1, p.95-102, 2003

CUI, J. *et al.* A new time- and space-dependent model for predicting frost formation. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 4, p.447-457, Mar. 2011.

ELETROBRAS. **Programa nacional de conservação de energia elétrica**. Disponível em: < www.eletrobras.com/elb/procel/main.asp>. 2009
ENERGY, **U.S. Department of energy**. Disponível em: < www.energy.gov>. 2009

ENERGYSTAR, **Energy Star**. Disponível em: < www.energystar.gov>. 2009

EPA, **United States Environmental Protection Agency**. Disponível em: < www.epa.gov>. 2009

FLETCHER, N. H. **Chemical Physics of Ice**. Cambridge, UK. Cambridge University Press, 1970

GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **International Chemical Engineering**, p. 359-368. 1976.

GOSNEY, W.C. **Principles of refrigeration**, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1982

HAYASHI, Y. Y. *et al.* Study of Frost Properties Correlating With Frost Formation Types. **ASME J Heat Transfer**, v. 99, n. 2, p.239-245, Jan. 1977.

HERMES, C. J. L. *et al.* A study of frost growth and densification on flat surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 33, n. 2, p. 371-379. Jan. 2009.

HERMES, C. J.L. An analytical solution to the problem of frost growth and densification on flat surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 23-24, p.7346-7351, Nov. 2012.

HOBBS, P V. **Ice Physics**. Oxford, UK: Clarendon Press, 1974.

HUANG, J. M. *et al.* The effects of frost thickness on the heat transfer of finned tube heat exchanger subject to the combined influence of fan types. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 7, p. 728-737. May 2008.

ISMAIL, K.A.R.; SALINAS, C. s. Modeling of frost formation over parallel cold plates. **International Journal of Refrigeration**, p. 425-441. Aug. 1999.

INTERNATIONAL STANDART - IEC 62552. **Household refrigerating appliances - Characteristics and test methods**, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2007

JHEE, S; LEE, K. S; KIM, W. S. Effect of surface treatments on the frosting/defrosting behavior of a fin-tube heat exchanger. **International Journal of Refrigeration**, v. 25, n. 8, p. 1047-1053. Dec. 2002.

KANDULA, M. Correlation of water frost porosity in laminar flow over flat surfaces. **Special Topics & Reviews in Porous Media — An International Journal**, v. 3, n. 1, p. 79-87. 2012.

Kays, W. M.; London, A. L. **Compact Heat Exchangers**, 2nd ed. New York, USA: McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 1964

KNABBEN, F. T. **Um estudo in-situ da formação de geada em evaporadores no-Frost**. 2010. 108 f. Dissertação de Mestrado – POSMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

KNABBEN, F. T.; HERMES, C. J. L.; MELO, C. In-situ study of frosting and defrosting processes in tube-fin evaporators of household refrigerating appliances. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, n. 8, p. 2031-2041. Dec. 2011a.

KONDEPUDI, S. N.; O'NEAL, D. L. The effect of frost growth on extended surface heat exchanger performance: A review, **ASHRAE Transactions**, v. 93, n. 2, p.258-274, 1987

LE GALL, R; GRILLOT, J. M; JALLUT, C. Modelling of frost growth and densification. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 40, n. 13, p.3177-3187, Sept. 1997.

LEE, H. *et al.* Frost formation on a plate with different surface hydrophilicity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, n. 22, p.4881-4893, Oct. 2004.

LEE, J. S. *et al.* **Frost formation on thermally conductive plastic plain plate**. 5th Int. Conference on Enhanced, Compact and Ultra-compact Heat Exchanger Science, Engineering and Technology, Hoboken-NJ, USA, 2005

LEE, K. S; KIM, W. S; LEE, T. H. A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 40, n. 18, p.4359-4365, Nov. 1997.

LEE, Y.B. **Studies on the growth of the frost layer based on heat and mass transfer through porous media**. PhD thesis, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, 2003

LENIC, K; TRP, A; FRANKOVIC, B. Prediction of an effective cooling output of the fin-and-tube heat exchanger under frosting conditions. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 11-12, p.2534-2543, Aug. 2009.

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**, p. 229-236. Mar. 2006a.

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 II. Long-term performance, frost layer observation and mechanism analysis. **International Journal of Refrigeration**, p. 237-242. Mar. 2006b.

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**, v. 31, n. 7, p.789-794, July. 2007.

LÜER, A.; BEER, H. Frost deposition in a parallel plate channel under laminar flow conditions. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 39, n. 1, p.85-95, Jan. 2000.

MAO Y.; BESANT R. W.; REZKALLAH K. S. Measurements and correlations of frost properties with air flow over a flat plate. **ASHRAE Transactions**, v. 98, n. 2. p.65-78. 1992

MAO, Y; BESANT R. W; CHEN, H. Frost characteristics and heat transfer on a flat plate under freezer operating conditions: Part I, experimentation and correlations, **ASHRAE Transactions**, v. 105, p. 231-251, 1999.

NA, B.; WEBB, R. L. A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 20, p.3797-3808, Sept. 2003.

NA, B.; WEBB, R. L. New model for frost growth rate. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, n. 5, p.925-936, Feb. 2004a.

NA, B.; WEBB, R. L. Mass transfer on and within a frost layer. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, p. 899-911. Feb. 2004b.

OGAWA, K; TANAKA, N; TAKESHITA, M. Performance improvement of plate fin-and-tube heat exchangers under frosting conditions. **ASHRAE Transactions**, v. 99, n. 1, p.762-771, 1993

O'Neal, D. L. **The effects of frost formation on the performance of a parallel plate heat exchanger**. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University - West Lafayette-IN, USA, 1982

PIUCCO, R. O. **Análise Teórico-Experimental da Formação de Geada em Refrigeradores Domésticos**. 2008. 110 f. Dissertação de Mestrado – POSMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PIUCCO, R. O.; HERMES, C. J. L.; MELO, C. In-situ evaluation of a criterion to predict frost formation on liners of refrigerated cabinets. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14-15, p.3084-3091, Oct. 2011.

PETUKHOV, B. S. Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties. **Advances in Heat Transfer**. Academic Press, Elsevier, New York. v. 6, p. 504-564, 1970

PRESS, W. H. *et al.* **Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995.

RADCENCO, V. *et al.* Two design aspects of defrosting refrigerators. **International Journal of Refrigeration**, v. 18, n. 2, p.76-86, Feb. 1995.

RITE, R. W.; CRAWFORD, R. R. The effect of frost accumulation on the performance of domestic refrigerator-freezer finned-tube evaporator coils. **ASHRAE Transactions**, v. 18, n. 2, p.428-437, 1991.

SAMI, S. M.; DUONG, T. Mass and heat transfer during frost growth. **ASHRAE Transactions**, v. 95, n. 1, p.158-165, 1989.

SCHNEIDER, H. W. Equation of the growth rate of frost forming on cooled surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 21, n. 8, p.1019-1024, Aug. 1978.

SEKER, D.; KARATAS, H.; EGRICAN, N. Frost formation on fin-and-tube heat exchangers: Part I—Modeling of frost formation on fin-and-tube heat exchangers. **International Journal of Refrigeration**, v. 27, n. 4, p.367-374, June. 2004.

SHAH, R. K.; LONDON, A. L. **Laminar Flow Forced Convection in Ducts**. California, UK: Academic Press, 1978.

SILVA, D. L.; HERMES, C. J. L.; MELO, C. Experimental study of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 6-7, p.1013-1020, May 2011a.

SILVA, D. L.; HERMES, C. J. L.; MELO, C. First-principles modeling of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 14-15, p.2616-2621, Oct. 2011b.

SILVA D. L. **Análise da formação de gelo e geada e seu efeito no desempenho termo-hidráulico de evaporadores do tipo tubo aletado**. 2012. 173 f. Tese de Doutorado - POSMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2013

SILVEIRA, R. A. **Simulação numérica da formação de gelo na borda de ataque de perfis aerodinâmicos**. 2001. 140 f. Dissertação de Mestrado – POSMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

STOECKER, W. F. How frost formation on coils affects refrigeration systems. **Refrigerating Engineering**, v. 65, n. 2, p.44-45, 1957.

TAO, Y. X.; BESANT, R. W.; MAO, Y. Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period. **ASHRAE Transactions**, v. 99, n. 1, p.746-753, 1993.

TASSOU, S. A.; DATTA, D.; MARRIOTT, D. Frost formation and defrost control parameters for open multideck refrigerated food display cabinets: Part A, **Journal of Power and Energy**, v. 215, n. 2, p.213-222, 2001.

TSO, C. P.; CHENG, Y. C.; LAI, A. C. K. Dynamic behavior of a direct expansion evaporator under frosting condition: Part I. Distributed model. **International Journal of Refrigeration**, v. 29, n. 4, p.611-623, June. 2006.

VOLMER, M.; FLOOD, H. Z. **Phys. Chem.** A 170, 273 , 1934

WANG, W. *et al.* A generalized simple model for predicting frost growth on cold flat plate. **International Journal of Refrigeration**, v. 35, n. 2, p.475-486, Mar. 2012.

WALTRICH, M.; HERMES, C. J. L.; MELO, C. Simulation-based design and optimization of refrigeration cassettes. *Applied Energy*, p. 4756-4765. Dec. 2011.

WU, X. *et al.* Visual and Theoretical Analyses of the Early Stage of Frost Formation on Cold Surfaces. **Journal of Enhanced Heat Transfer**, v. 14, n. 3, p.257-268, 2007.

XIA, Y. *et al.* Frost, defrost, and refrost and its impact on the air-side thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-tube heat exchangers. **International Journal of Refrigeration**, v. 29, n. 7, p.1066-1079, Nov. 2006.

YANG, D. K.; LEE, K. S. Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate. **International Journal of Refrigeration**, p. 89-96. Jan. 2004.

YANG, D. K.; LEE, K. S. Modeling of frosting behavior on a cold plate. **International Journal of Refrigeration**, p. 396-402. May. 2005

YANG, D. K.; LEE, K. S.; SONG, S. Fin spacing optimization of a fin-tube heat exchanger under frosting conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 49, n. 15-16, p.2619-2625, June. 2006.

ZHANG, P.; HRNJAK, P. S. Air-side performance evaluation of three types of heat exchangers in dry, wet and periodic frosting conditions. **International Journal of Refrigeration**, v. 32, n. 5, p.911-921, Aug. 2009.