

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VALTER SALLES DO NASCIMENTO JUNIOR

UMA CORRELAÇÃO SEMI-EMPÍRICA PARA A DENSIDADE DA GEADA

CURITIBA, SETEMBRO DE 2013

VALTER SALLES DO NASCIMENTO JUNIOR

UMA CORRELAÇÃO SEMI-EMPÍRICA PARA A DENSIDADE DA GEADA

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: Prof. Dr. Christian Johann Losso Hermes

CURITIBA, SETEMBRO DE 2013

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Christian J. L. Hermes por fornecer estrutura e ambiente propício à realização do presente trabalho, pela dedicação e empenho dispensados à minha formação profissional, e pelas boas conversas nos momentos de descontração.

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

A minha esposa e sempre companheira Rosângela, pela compreensão e apoio incondicional em todos os momentos.

A toda minha família, meus pais Valter e Lúcia, por me inculcaram a importância da educação, meu irmão Vagner pelo companheirismo, e em especial a minha irmã Márcia e seu marido André, que me incentivaram de forma decisiva a ingressar na pós-graduação.

A meus colegas do Laboratório de Termodinâmica e Termofísica, em especial ao Mestre Eng. Felipe Loyola pelo apoio e amizade, aos alunos de iniciação científica que tiveram um papel importante no projeto e construção da bancada, em especial aos alunos, João Purkote, Rafael S. Ribeiro, André Modtkowski, assim como tantos que contribuíram de alguma forma na realização desse trabalho, Dirceu, Peng, Taisse, e outros,

A todos os professores do mestrado, pelo inestimável conhecimento transmitido.

A CAPES e Ministério da Educação pelo apoio financeiro e estímulo ao desenvolvimento da pós-graduação no país.

RESUMO

Os modelos computacionais empregados para prever a taxa de crescimento de uma camada de geada ao longo do tempo dependem de correlações empíricas acerca da densidade do meio poroso formado por cristais de gelo e ar úmido, as quais se restringem às condições específicas de operação que, por sua vez, afetam as características morfológicas da geada. A análise da literatura deixa evidente a falta de uma correlação de base física para a densidade da geada, que possa ser usada em diferentes aplicações, onde as condições de operação são diferentes. Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo experimental dos processos de crescimento e adensamento de geada em canais formados por placas paralelas isotérmicas. Para tanto, foi especialmente projetado e construído um aparato experimental, que consiste em um túnel de vento fechado, em que a condição do ar na entrada do canal e as temperaturas das superfícies da seção de testes são rigorosamente controladas. Um sistema de aquisição de imagens foi empregado para medir a evolução da espessura da geada ao longo do tempo, enquanto uma balança de precisão foi utilizada, ao final do teste, para medir a massa de geada depositada. Foram realizados 20 ensaios experimentais a fim de avaliar tanto os efeitos individuais quanto os efeitos simultâneos dos parâmetros-chave que afetam o adensamento e o crescimento da geada. Com base em uma análise teórica, realizada com o intuito de identificar as escalas do problema, foi proposta uma equação evolutiva para a porosidade da geada que deu origem à uma correlação semi-empírica para a densidade do meio poroso, que depende não só do tempo, mas também de um grupamento adimensional baseado no número de Jakob. Quando comparada com os dados experimentais, a correlação proposta foi capaz de prever aproximadamente 90% dos dados com erros na faixa de $\pm 15\%$.

Palavras-chave: geada. porosidade. densidade. correlação semi-empírica

ABSTRACT

The computational models revised to predict the growth and densification of a frost layer rely on empirical information for the frost density, which in turn depend upon the working conditions and, therefore, the frost morphology. A judicious inspection of the open literature points out the lack of a first-principles-based correlation for the frost density to be used for a wide range of applications, spanning from typical conditions of household to light-commercial refrigeration appliances. The present study is therefore aimed at investigating, by means of an experimental approach, the frost growth and densification processes in channel flows. A closed-loop wind-tunnel facility was especially designed and constructed for this purpose. The rig provides a strict control of the psychrometric conditions at the entrance of the test section as well as its surface temperatures. An image acquisition system was used to measure the thickness of the frost layer over time. In addition, a high-precision scale was employed to measure the mass of frost collected at the end of the test. A dataset comprising of 20 experimental datapoints was gathered in order to investigate the individual and the simultaneous effects of key heat and mass transfer parameters on the frost density and thickness. The experimental data was used together with a first-principles model, obtained from a scale analysis, to come up with a semi-empirical correlation for the frost density as a function of the time, and a dimensionless parameter that recalls the Jakob number, which carries information of the air stream and plate surface conditions. When compared to experimental data, the proposed equation was able to predict 90% of the datapoints within $\pm 15\%$ error bounds.

Keywords: frost. porosity. density. semi-empirical correlation

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	15
FIGURA 2 - FORMAÇÃO DE GEADA EM EVAPORADORES.....	16
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE FASE DA ÁGUA.....	18
FIGURA 4 - DIFERENÇA ENTRE GELO (A) E GEADA (B).....	18
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GEADA EM UMA CARTA PSICROMÉTRICA.....	19
FIGURA 6 - GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO MÍNIMO PARA INICIAR A NUCLEAÇÃO EM FUNÇÃO DE θ	20
FIGURA 7 - MORFOLOGIA CARACTERÍSTICA DOS CRISTAIS DE GELO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E GRAU DE SUPERSATURAÇÃO DO AR PARA 1 ATM.....	21
FIGURA 8 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NO <i>IIR INT'L CONGRESS OF REFRIGERATION</i>	22
FIGURA 9 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NA <i>INT'L REFRIGERATION CONFERENCE AT PURDUE</i>	22
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO.....	28
FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM CRISTAL DE GELO NA FORMA DE COLUNA.....	35
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CONSTANTE C.....	37
FIGURA 13 - FOTOGRAFIA DO APARATO EXPERIMENTAL MONTADO NO LABORATÓRIO DE TERMODINÂMICA E TERMOFÍSICA.....	42
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO TÚNEL DE VENTO.....	43
FIGURA 15 - FOTOGRAFIA DA SEÇÃO DE TESTES: (A) SEM GEADA E (B) COM GEADA.....	44
FIGURA 16 - ESQUEMA DA INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS TERMOELÉTRICOS...	45
FIGURA 17 - INTERFACE DE CONTROLE E AQUISIÇÃO NO <i>SOFTWARE LABVIEW</i>	46
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE INFORMAÇÕES DO SISTEMA DE CONTROLE.....	47
FIGURA 19 - VISTA SUPERIOR DO SISTEMA DE <i>BY-PASS</i> USADO PARA INICIAR O TESTE:.....	47
FIGURA 20 - ILUSTRAÇÃO DO CRITÉRIO DE REGIME PERMANENTE.....	48

FIGURA 21 - VARIAÇÃO TEMPORAL DA ESPESSURA DA GEADA PARA AS CONDIÇÕES DO TESTE #14 OBTIDAS EM OCASIÕES DISTINTAS.....	51
FIGURA 22 - VARIAÇÃO DA POROSIDADE COM O TEMPO PARA OS TESTES #1 A #4.....	55
FIGURA 23 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #1 $t=30\text{MIN}$	56
FIGURA 24 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #2 $t=60\text{MIN}$	56
FIGURA 25 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #3 $T=90\text{MIN}$	57
FIGURA 26 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #4 $T=120\text{MIN}$	58
FIGURA 27 - VARIAÇÃO DA ESPESSURA COM O TEMPO PARA OS TESTES #5 A #7.....	59
FIGURA 28 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #5 $v_a=1,26[\text{m/s}]$	60
FIGURA 29 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #6 $v_a=1,42[\text{m/s}]$	61
FIGURA 30 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #7 $v_a=1,78[\text{m/s}]$	62
FIGURA 31 - VARIAÇÃO DA POROSIDADE COM O TEMPO PARA OS TESTES #8 A #10.....	63
FIGURA 32 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #8 $T_w=-30,3[^\circ\text{C}]$	64
FIGURA 33 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #9 $T_w=-25[^\circ\text{C}]$	65
FIGURA 34 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #10 $T_w=-20,3[^\circ\text{C}]$	66
FIGURA 35 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA COM O GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	67
FIGURA 36 - VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA GEADA COM O GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO.....	67
FIGURA 37 - VARIAÇÃO DA POROSIDADE COM O TEMPO PARA OS TESTES #11 A #13.....	68
FIGURA 38 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ESPESSURA DA GEADA PARA OS TESTES #11 A #13.....	69
FIGURA 39 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #11 $\omega_a=8,4$	69
FIGURA 40 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #13 $\omega_a=3,8$	70
FIGURA 41 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA COM O GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO PARA OS TESTES #11 A #13.....	71
FIGURA 42 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA EQ. (44) E OS DADOS EXPERIMENTAIS.....	74
FIGURA 43 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA EQ. (45) E OS DADOS EXPERIMENTAIS.....	74
FIGURA 44 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A DENSIDADE.....	75

FIGURA 45 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A ESPESSURA.....	76
FIGURA 46 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PREVIÕES DA EQ. (50) COM $C=0,0022$ E $N=0,76$ CONTRA OS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PARA CANAIS DE PLACAS PARALELAS.....	77
FIGURA 47 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PREVISÕES DA EQ. (48) COM $C=0,0024$ E $N=1,5$, BEM COMO DE OUTRAS CORRELAÇÕES DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA PLACA PLANA CONTRA OS DADOS EXPERIMENTAIS DE HERMES ET AL. (2009).....	79
FIGURA 48 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PREVISÕES DA EQ. (48) COM $C=0,0023$ E $N=0,86$ CONTRA OS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO PRESENTE TRABALHO E OS DADOS DE HERMES ET AL. (2009).....	80
FIGURA 49 - RELAÇÃO ENTRE CARGA TÉRMICA E ESPESSURA DE ISOLAMENTO.....	89
FIGURA 50 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO CONSTRUÍDO.....	90
FIGURA 51 - EVAPORADOR EMPREGADO NA BANCADA (COM DEPOSIÇÃO DE GEADA).....	91
FIGURA 52 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO DA VAZÃO DE AR EM TÚNEL DE VENTO (ASHRAE 51, 1999).....	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ILUSTRAÇÕES DAS DIFERENTES FORMAS DE CRISTAL DE GEADA	21
TABELA 2 - PRINCIPAIS TRABALHOS DE NATUREZA EXPERIMENTAL (LOYOLA, 2013).....	23
TABELA 3 - RESUMO DOS PRINCIPAIS TRABALHOS SOBRE FORMAÇÃO DE GEADA.....	27
TABELA 4 - CORRELAÇÕES PARA DENSIDADE DA GEADA.....	30
TABELA 5 - CONDIÇÕES DE TESTE PARA ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS.....	50
TABELA 6 - FATORES E NÍVEIS DO EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO.....	50
TABELA 7 - CONDIÇÕES DE TESTE PARA ANÁLISE FATORIAL COMPLETA.....	51
TABELA 8 - CONDIÇÕES DO TESTE #14 PARA AVALIAÇÃO DE REPETIBILIDADE	51
TABELA 9 - RESULTADOS DOS TESTES #1 A #13 PARA A DENSIDADE E POROSIDADE DA GEADA.....	54
TABELA 10 - RESULTADOS DOS TESTES #1 A #13 PARA A ESPESSURA DA GEADA, EM (mm).....	54
TABELA 11 - RESULTADOS DOS TESTES #5 A #7 PARA A DENSIDADE E POROSIDADE DA GEADA.....	59
TABELA 12 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL PARA DENSIDADE, POROSIDADE E CONSTANTE C.....	72
TABELA 13 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL PARA T=90 MIN.....	72
TABELA 14 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL NA FORMA ADIMENSIONAL.....	73
TABELA 15 - COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES (44) E (45).....	73
TABELA 16 - DADOS EXPERIMENTAIS DE HERMES ET AL. (2009) PARA PLACA PLANA HORIZONTAL.....	78
TABELA 17 - SUMÁRIO DOS COEFICIENTES C E N DA EQ. (48).....	80
TABELA 18 - COMPARATIVO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA DOIS TRANSDUTORES DE PRESSÃO.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

A	Área, m^2
Bi	Número de Biot
C_d	Coeficiente de descarga
c_p	Calor específico a pressão constante, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
D	Difusividade efetiva do ar, $m^2\ s^{-1}$
D_h	Diâmetro hidráulico, m
d	Diâmetro do bocal, m
Fo	Número de Fourier
H	Espaçamento entre placas, m
h	Coeficiente de transferência de calor, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$
h_m	Coeficiente de transferência de massa, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
i_{sv}	Calor latente de dessublimação ($=2,83 \times 10^6$), $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
Ja	Número de Jakob
k	Condutividade térmica do ar, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
k_f	Condutividade térmica efetiva, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
L	Comprimento, m
L_d	Comprimento de entrada, m
Le	Número de Lewis
M	Massa de geada, Kg
m	Fluxo de massa, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
m_a	Fluxo de massa de adensamento, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
m_c	Fluxo de massa de crescimento, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
N	Número de embriões nucleados
n	Coeficiente da equação (50)
p	Pressão, Pa
p_{atm}	Pressão atmosférica, Pa
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
Q	Taxa de transferência de calor, W

q	Fluxo de calor, $W m^{-2}$
R_t	Resistência térmica
Re	Número de Reynolds
Re_c	Número de Reynolds crítico de transição de escoamento
r	rugosidade
T	Temperatura, °C, K
T_m	Temperatura de congelamento da água, °C, K
T_{dew}	Temperatura do ponto de orvalho do ar úmido, °C, K
t	Tempo, s
u	Incerteza
V	Volume, m^3
\dot{V}	Vazão, $Kg m^{-3}$
v	Velocidade $m s^{-1}$
W	Comprimento da placa na direção transversal, m
X	Variável independente
x	Abscissa
Y	Coefficiente de expansão dos bocais
y	Ordenada

Letras Gregas

α	Coefficiente de dessublimação
α_p	Relação de pressão
β	Coefficiente angular da equação (6)
β_b	Coefficiente de contração do bocal
$\Delta\omega$	Grau de supersaturação
Δp	Perda de carga, Pa
δ	Espessura da camada de geada, m
ε	Porosidade
θ	Relação adimensional de temperatura
μ	Viscosidade absoluta, Pa s

ρ	Densidade, kg m^{-3}
ρ_f	Densidade efetiva da camada de geada, kg m^{-3}
ρ_i	Densidade efetiva do gelo, kg m^{-3}
σ	Desvio padrão
Λ	Parâmetro adimensional
ϕ	Umidade relativa
ω	Umidade absoluta

Índices

a	Ar úmido
bc	Bocal
dew	Ponto de orvalho
e	Externo
ent	Entrada
f	Camada de geada
i	Interno
iso	Isolamento
J	Junta de compensação
M	Massa
m	Solidificação da água
o	Saída
ob	Observações
s	Superfície
sm	Sistema de medição
sat	Saturação
rev	Revestimento
T	Termopar
t	Total
tp	Ponto triplo da água
tu	Transdutor de umidade
UR	Umidade Relativa

v Vapor d'água

w Parede

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTO.....	15
1.2 GELO E GEADA.....	17
1.3 LITERATURA	21
1.4 OBJETIVOS E METODOLOGIA	31
1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	32
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1 EQUAÇÃO EVOLUTIVA PARA A POROSIDADE.....	33
2.2 ESCALAS DA DENSIDADE E DA ESPESSURA DA GEADA.....	38
3 TRABALHO EXPERIMENTAL	41
3.1 APARATO EXPERIMENTAL.....	41
3.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO.....	46
3.3 PLANO DE TESTES.....	49
4 RESULTADOS	53
4.1 ANÁLISE INDIVIDUAL DE PARÂMETROS.....	53
4.2 ANÁLISE DO EXPERIMENTO FATORIAL	71
4.3 CORRELAÇÃO SEMI-EMPÍRICA.....	76
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	81
5.1 CONCLUSÕES.....	81
5.2 SUGESTÕES.....	83
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE I - CARGA TÉRMICA	88
APÊNDICE II - SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	90
APÊNDICE III - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE AR	92
APÊNDICE IV - COMPRIMENTO DE ENTRADA	94
APÊNDICE V - CÁLCULO DE INCERTEZAS	95
APÊNDICE VI - MATRIZ DE DADOS	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O Brasil assumiu a posição de sexta maior economia mundial em 2012. Tal avanço é fruto de um crescimento de 44% no PIB na primeira década do século XXI, que depende intrinsecamente do aumento da disponibilidade de energia elétrica (ver Fig. 1), obtido seja pelo aumento da oferta ou pela redução do consumo.

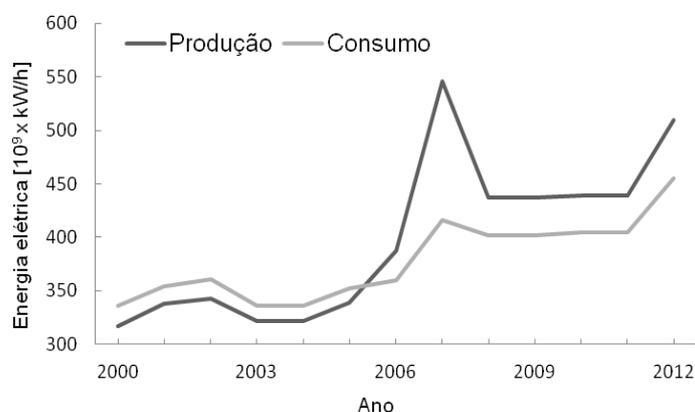


FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DO CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL
 FONTE: INDEX MUNDI (2013)

O primeiro depende de fatores físicos, econômicos e ambientais. Os fatores físicos decorrem de limitações da fonte geradora, e.g. usinas hidrelétricas cuja capacidade é limitada pelo volume hidrográfico da região, enquanto os fatores econômicos exigem um tempo de retorno sobre o investimento demasiadamente longo. Por último existem os fatores socioambientais, que envolvem desde desapropriações territoriais até danos ambientais severos, e.g. o vazamento de água contaminada na usina de Fukushima no Japão.

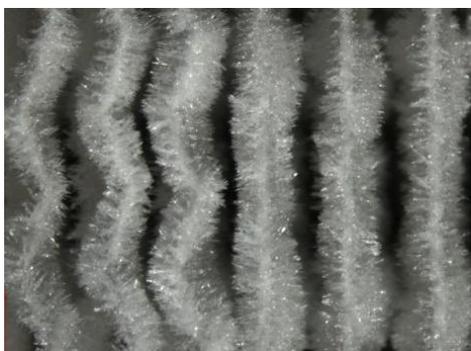
A segunda alternativa consiste em melhorar o aproveitamento da matriz energética existente, o que pode ser obtido através do uso de sistemas de conversão de energia mais eficientes, dentre as quais se destacam os refrigeradores domésticos, residenciais e comerciais. De fato, segundo

estimativas (Procel GEM, 2009), a refrigeração responde por mais de 12% da energia elétrica consumida no Brasil, sendo aproximadamente 7% do consumo residencial e 5% do consumo comercial.

O elevado consumo se deve às perdas termodinâmicas que ocorrem nos sistemas de refrigeração e em seus componentes, uma vez que os sistemas de refrigeração disponíveis no mercado possuem uma eficiência da ordem de 20% daquela observada para um sistema totalmente reversível. Este número justifica por si só qualquer iniciativa no sentido de melhorar o desempenho energético dos sistemas de refrigeração domésticos e comerciais.

A fim de reduzir o consumo de energia em sistemas de refrigeração, as seguintes linhas de trabalho têm sido adotadas (Radermacher e Kim, 1995; Melo e Silva, 2010): (i) desenvolvimento de componentes mais eficientes; (ii) desenvolvimento de tecnologias alternativas de refrigeração; (iii) desenvolvimento de novas tecnologias para o isolamento térmico de gabinetes, e (iv) desenvolvimento de novas estratégias para o controle de sistemas de refrigeração.

Outra linha de trabalho que tem se destacado consiste em desenvolver estratégias para a remoção da geada que se forma no evaporador do sistema de refrigeração. Devido às baixas temperaturas de evaporação empregadas na maioria dos refrigeradores domésticos (-25°C) e comerciais (-10°C), as condições de operação favorecem a formação de geada sobre a superfície do evaporador (ver Fig. 2), o que interfere diretamente sobre a eficiência de todo o sistema.



(a)



(b)

FIGURA 2 - FORMAÇÃO DE GEADA EM EVAPORADORES
FONTES: (A) SILVA (2012); (B) KNABBEN (2010)

A geada não só diminui a taxa de transferência de calor no evaporador devido à sua baixa condutividade térmica, como também restringe a 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 todos os casos, tais efeitos diminuem a capacidade de refrigeração do evaporador e, conseqüentemente, fazem com que a energia gasta para garantir o mesmo efeito frigorífico, se comparado a um refrigerador sem formação de geada, seja maior, uma vez que o compressor precisa atuar por mais tempo.

1.2 GELO E GEADA

A geada é definida como um meio poroso, composto de cristais de gelo e ar úmido, formado através da transferência de vapor d'água contido no ar para uma superfície, como mostra a Fig. 3. Se a temperatura da superfície estiver abaixo do ponto de orvalho, e se este estiver acima de $0,01^{\circ}\text{C}$ (ponto triplo da água), pode haver a condensação do vapor. Ainda, se a temperatura da superfície estiver abaixo de $0,01^{\circ}\text{C}$, o vapor condensado pode se solidificar, formando cristais de gelo. Nos casos em que tanto a temperatura de orvalho quanto a temperatura superficial estiverem abaixo de $0,01^{\circ}\text{C}$, pode ocorrer a dessublimação do vapor, ou seja, mudança do estado gasoso diretamente para o estado sólido. Em ambos os casos, tem-se a formação de geada.

Gelo e geada, ilustrados na Fig. 4, oferecem diferentes resistências à troca de calor entre o substrato e o ambiente, tendo o primeiro uma condutividade térmica aproximadamente 10 vezes maior que a segunda. Em adição, a geada possui uma densidade aproximadamente 5 vezes menor que o gelo sólido, de modo que uma massa de geada ocupa um volume significativamente maior que a mesma massa de gelo, reduzindo assim a área de passagem e elevando a perda de carga em trocadores de calor aletados. Deve se enfatizar que a maior parte das aplicações de refrigeração (domésticas e comerciais) oferece condições para a formação da geada, que reduz o desempenho termo-hidráulico do componente.

Devido à combinação de alguns aspectos como o ângulo de contato e a rugosidade da superfície, a mudança de fase do vapor de água incidente pode

não ocorrer quando a temperatura superficial do substrato e o ponto de orvalho são iguais. Geralmente deve haver uma diferença entre as temperaturas de orvalho e do substrato, denominada de grau de super-resfriamento, para que haja mudança de fase. Esse grau de super-resfriamento implica numa diferença entre a pressão parcial do vapor d'água e a pressão correspondente ao estado de saturação, denominada de grau de supersaturação, como ilustra a Fig. 5.

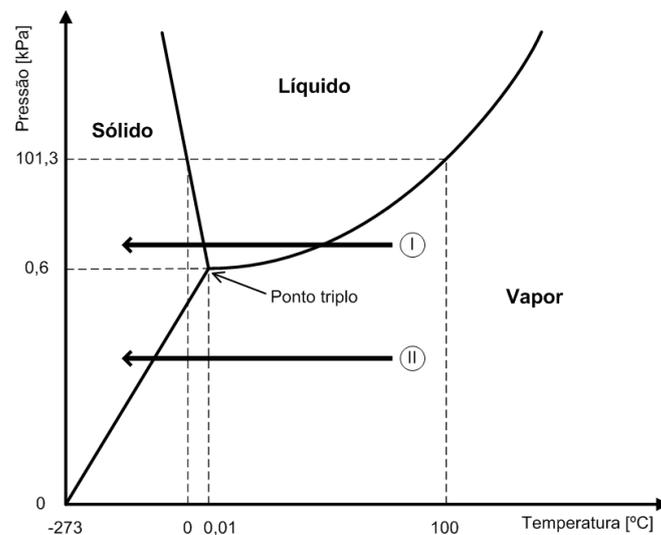


FIGURA 3 - DIAGRAMA DE FASE DA ÁGUA



(a)

(b)

FIGURA 4 - DIFERENÇA ENTRE GELO (A) E GEADA (B)

A nucleação pode ser considerada como o resultado de uma sequência de processos psicrométricos. Independentemente dos efeitos de superfície, a mudança de fase do vapor d'água necessita primeiramente de um resfriamento até atingir o ponto de orvalho (processo A-A'). Tal resfriamento é de natureza

sensível e ocorre na camada limite térmica da superfície. Devido à presença de tensões de superfície agindo sobre o embrião, tanto a nucleação homogênea quanto a heterogênea demandam uma grande quantidade de energia para romper o equilíbrio e desencadear o processo. Para tanto, faz-se necessário um resfriamento além do ponto de orvalho (processo A'-B) e, assim que o equilíbrio é rompido, inicia-se a mudança de fase (processo B-C). Embora sejam processos distintos, os processos de resfriamento (processo A'-B) e de mudança de fase ocorrem simultaneamente na superfície. Para se totalizar a energia livre necessária para realizar uma nucleação, somam-se as parcelas sensíveis (processo A-A'-B) e latentes (processo B-C).

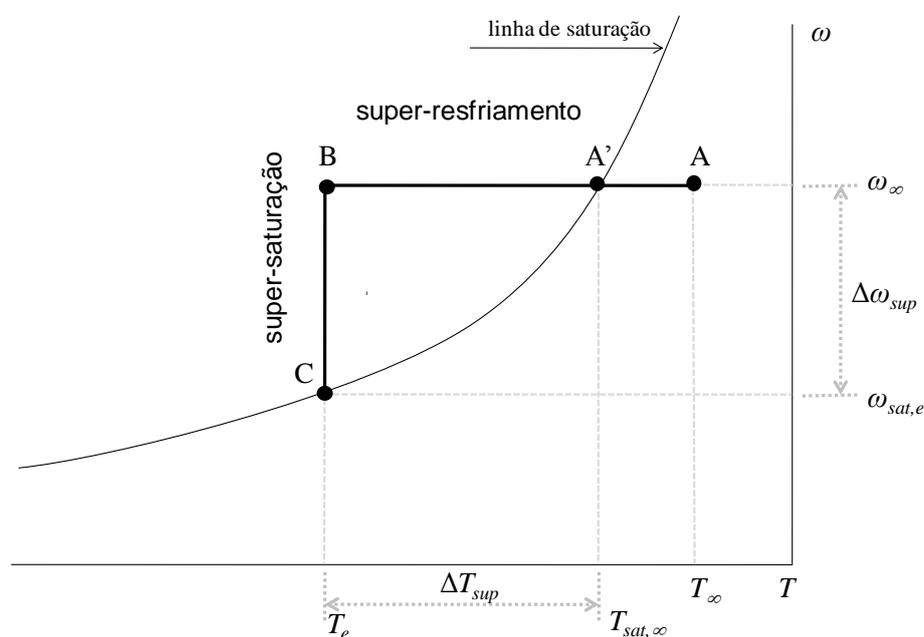


FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GEADA EM UMA CARTA PSICROMÉTRICA
 FONTE: PIUCCO (2008)

A partir da teoria de nucleação (Fletcher, 1970; Hobbs, 1971), Piucco (2008) determinou os limiares de nucleação para os processos de condensação e de dessublimação como função do ângulo de contato, como ilustra a Fig. 6. Tais resultados deixam evidente que, a menos que o ângulo de contato (θ) seja nulo, deve haver um determinado grau de super-resfriamento, que está associado a certo grau de supersaturação (ver Fig. 5), para que o processo de mudança de fase ocorra.

Como ressalta Piucco (2008), em função de alguns parâmetros como velocidade e direção preferencial de crescimento, diferentes morfologias de geada podem ser observadas para diferentes valores de temperatura do substrato e de grau de supersaturação, como mostra a Fig. 7 (Kobayashi, 1958).

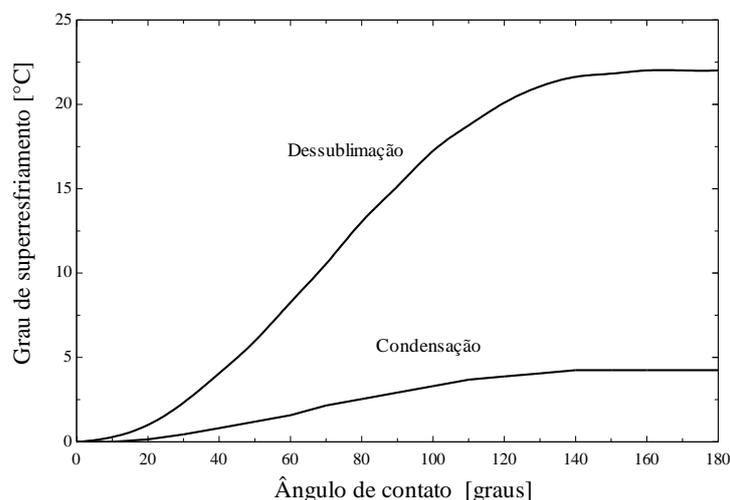


FIGURA 6 - GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO MÍNIMO PARA INICIAR A NUCLEAÇÃO EM FUNÇÃO DE θ
 FONTE: PIUCCO (2008)

Algumas das diversas morfologias existentes estão ilustradas na Tab. 1, dentre as quais são observadas as formas dendríticas e de colunas, presentes respectivamente nos evaporadores dos refrigeradores comerciais (que possuem temperatura de superfície em torno de -10°C) e domésticos (que apresentam temperatura de superfície em torno de -25°C). Em ambos os casos, as estruturas formam uma camada de geada mais porosa, i.e. menos densa, e com menor condutividade térmica, se comparadas com o gelo sólido.

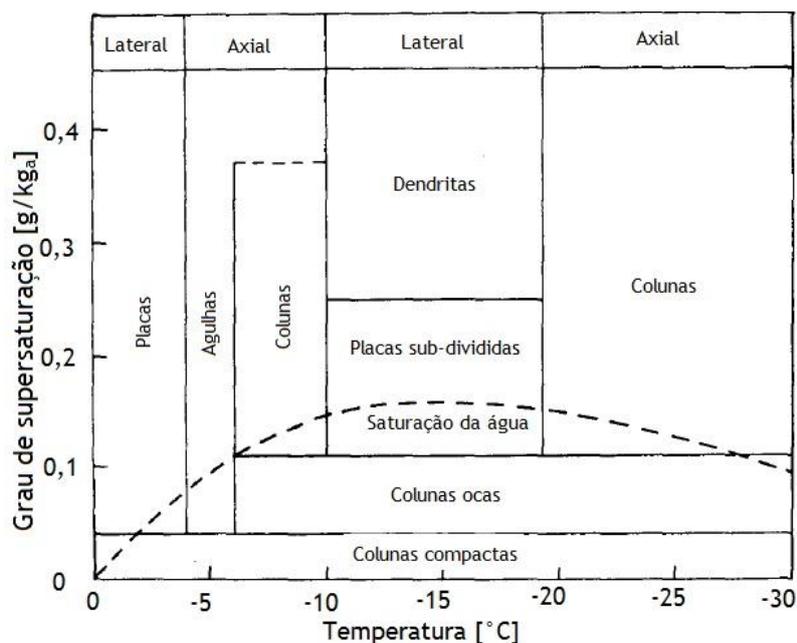


FIGURA 7 - MORFOLOGIA CARACTERÍSTICA DOS CRISTAIS DE GELO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E GRAU DE SUPERSATURÇÃO DO AR PARA 1 ATM (ADAPTADO DE KOBAYASHI, 1958)
 FONTE: PIUCCO (2008)

TABELA 1 - ILUSTRAÇÕES DAS DIFERENTES FORMAS DE CRISTAL DE GEADA

			
Agulha	Bainha	Coluna compacta	Coluna oca
			
Dendrita I	Dendrita II	Dendrita III	Placa dupla
			
Placa oca	Placa simples	Placa subdividida I	Placa subdividida II

FONTE: KOBAYASHI (1958)

1.3 LITERATURA

O estudo da formação de geada é relativamente recente e os resultados obtidos têm sido amplamente discutidos. As Figuras 8 e 9, levantadas por Loyola (2013), resumem o número de publicações sobre geada nas edições

mais atuais dos principais congressos na área 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 a conclusão de que a literatura de formação de geada está sendo formada.

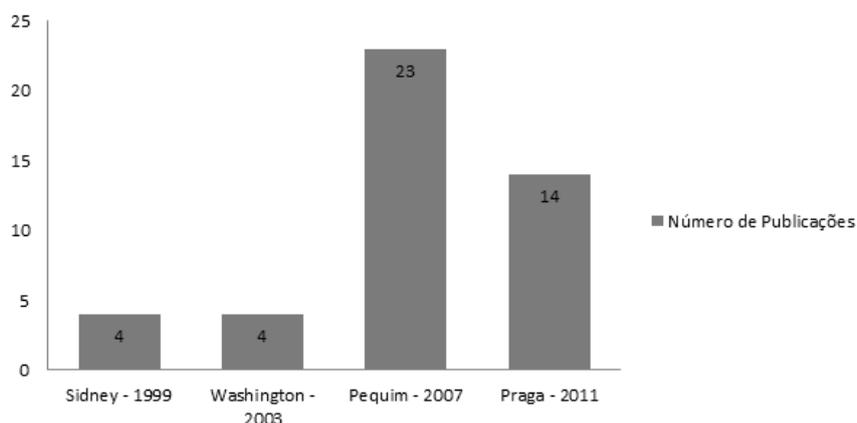


FIGURA 8 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NO *IIR INT'L CONGRESS OF REFRIGERATION*

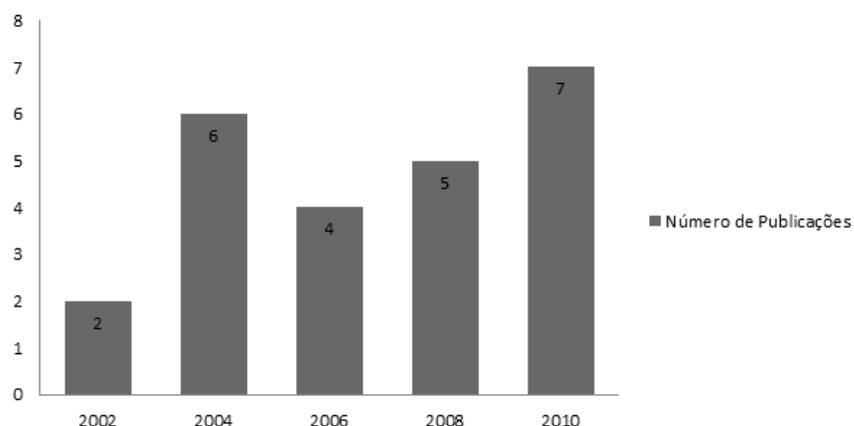


FIGURA 9 - NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NA *INT'L REFRIGERATION CONFERENCE AT PURDUE*

Diversos trabalhos tanto de caráter teórico-computacional como experimental têm sido publicados sobre formação de geada em superfícies simples (placas planas, cilindros e canais) e complexas (evaporadores aletados). Em ambos os casos, observa-se a necessidade de prever não só a quantidade de geada formada, mas também o volume que ela ocupa. Para tanto, informações sobre a densidade da geada são necessárias, já que ela afeta o volume ocupado por uma certa quantidade de massa (e, com isso, a

Na e Webb (2003) realizaram um trabalho com foco no mecanismo de nucleação da geada sobre superfícies planas. Nesse trabalho, os processos de nucleação e crescimento da geada, os processos de mudança de fase do vapor d'água e as condições necessárias para o início do processo de mudança de fase são discutidos brevemente. A formação de geada foi classificada como um processo de nucleação heterogênea, dependente do ângulo de contato, parâmetro que define se uma superfície tem ou não afinidade física com a água. A formação de geada foi avaliada experimentalmente utilizando-se amostras de alumínio revestidas com substâncias que resultam em diferentes ângulos de contato. Os resultados experimentais não se aproximaram das previsões teóricas. Nesse trabalho não foram realizadas medições da massa e da espessura da camada de geada.

Cheng e Wu (2003) conduziram um trabalho teórico e experimental para investigar os primeiros estágios da formação de geada sobre uma placa plana. Os padrões de crescimento e adensamento foram observados através de um sistema de aquisição de imagens microscópicas em intervalos de 5 segundos. A placa fria foi montada no interior de um túnel de vento que por sua vez estava alocado no interior de um ambiente climatizado. A velocidade, temperatura e umidade relativa do ar foram variadas, assim como a temperatura da superfície da placa. Através dos experimentos percebeu-se que o processo de formação de geada pode apresentar um padrão de crescimento em estágios, devido à condensação dos cristais de geada na superfície da camada. Num primeiro estágio o condensado penetra na camada de geada, fazendo com que a espessura da camada pare de aumentar e a estrutura se adense. O crescimento é retomado num estágio seguinte quando a resistência térmica é reduzida devido ao adensamento.

Lee et al. (2004) investigaram experimentalmente a formação de geada sobre duas superfícies com diferentes ângulos de contato (23° e 88°). As temperaturas de tais superfícies, assim como também a temperatura, umidade e velocidade do ar foram variadas. Percebeu-se que a forma do cristal de geada variava com a temperatura e a umidade do ar e com a temperatura da superfície. Verificou-se também que a velocidade do ar afetava muito levemente a taxa de crescimento da geada. A influência do ângulo de contato

sobre a nucleação da geada não foi corretamente investigada, pois as superfícies foram submetidas a graus de super-resfriamento que transcendiam o limite de nucleação, limite a partir do qual o ângulo de contato deixa de influenciar o processo. Além disso, a rugosidade das superfícies não foi avaliada.

Liu et al. (2007) aplicaram um revestimento à base de verniz acrílico sobre uma superfície metálica e avaliaram a formação de geada ao longo do tempo sob diversas condições psicrométricas e de temperatura superficial. Os autores observaram que, sob certas condições, não havia formação de geada sobre a superfície. O efeito da velocidade do ar não foi investigado e a massa de geada formada ao longo do tempo não foi registrada.

Lee et al. (2005) investigaram experimentalmente a formação de geada sobre um material polimérico, denominado PBT, cuja condutividade térmica é de três a cinco vezes superior a de outros polímeros. Os autores compararam os resultados obtidos com amostras de alumínio com os obtidos com diversos tipos de polímero, incluindo o PBT. O objetivo principal do trabalho foi o desenvolvimento de um novo material para revestimento de trocadores de calor. Verificou-se que o crescimento de geada sobre o PBT é equivalente ao observado com o alumínio, mas diferente dos demais materiais investigados.

De maneira semelhante, Liu et al. (2007) alteraram a energia superficial de uma placa de cobre mediante a aplicação de uma camada de parafina, e a submeteram a diferentes condições psicrométricas e de temperatura superficial. Nesse trabalho, o efeito do ângulo de contato sobre a formação de geada também não foi observado, pois os testes foram realizados em condições que transcendiam o limite de nucleação.

Wu et al. (2007) apresentaram um trabalho experimental e também teórico onde investigaram visualmente o processo de formação de geada sobre superfícies com ângulos de contato de 56° e 110° com a água. O aparato consistia essencialmente de uma seção de testes resfriada por um módulo termelétrico. Uma câmera de aquisição de imagens microscópicas foi utilizada para acompanhar e registrar visualmente o processo. Os testes mostraram que, para as condições de temperatura de superfície e umidade aplicadas, a formação de geada ocorria em três fases: formação e congelamento de gotas de condensado, formação e crescimento de cristais de geada, e formação e

crescimento da camada de geada. A condensação de vapor d'água antes da formação de geada foi explicada a partir dos conceitos de energia livre de Gibbs. A análise teórica também mostrou que a passagem direta de vapor d'água para geada poderia ser obtida mediante a elevação do grau de super-resfriamento, já que isso diminuiria tanto o raio crítico do embrião como a barreira de energia livre de Gibbs.

Piucco et al. (2008) investigaram a nucleação de embriões de geada em superfícies planas. O estudo considerou a temperatura e a umidade do ar ambiente, e as condições da superfície (temperatura, rugosidade e ângulo de contato). O processo de nucleação foi analisado teórica e experimentalmente. Na análise teórica, assumiu-se um processo de nucleação heterogênea sobre uma superfície lisa. Observou-se que o aumento do ângulo de contato da água com o substrato aumenta o grau de super-resfriamento necessário para desencadear o processo de nucleação. Observou-se também que o limite de nucleação torna-se praticamente independente do ângulo de contato quando este atinge valores superiores a 140° . Além disso, mostrou-se que a nucleação sempre ocorre quando o grau de super-resfriamento é superior a 5°C , o que significa que tratamentos superficiais afetam apenas levemente a nucleação de embriões para a grande maioria das aplicações de refrigeração e condicionamento de ar.

Em adição aos estudos experimentais, existem diversos modelos na literatura para prever a formação de geada em superfícies, como mostra a Tab. 3. Em geral, a formação de uma camada de geada sobre uma superfície plana é modelada com base nas seguintes hipóteses simplificativas (Hermes et al., 2009): (i) os processos de transferência de calor e massa são considerados quase-estáticos e unidimensionais; (ii) a espessura da camada de geada é uniformemente distribuída ao longo da placa; (iii) a pressão do ar é uniforme dentro e fora da camada de geada; e (iv) a analogia de Lewis para a camada limite é aplicável.

TABELA 3 - RESUMO DOS PRINCIPAIS TRABALHOS SOBRE FORMAÇÃO DE GEADA

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 et al. (1993)	Canadá	Global		Placa placa	0,1	92,84	X
Le Gall e Grillot (1996)	França	1-D	X	Placa plana	0,1	25	X
Lee et al. (1997)	Coréia S.	Global		Placa plana			X
Luer e Beer (1999)	Alemanha	2-D	X	Canal		Variável	
Cheng e Cheng (2001)	China	Global		Placa plana		Hayashi et al. (1997)	X
Na e Webb (2004)	EUA	1-D	X	Placa plana	0,02	30	X
Hermes et al. (2009)	Brasil	Global	X	Placa plana	0,001	Correlação própria	X
Cui et al. (2011)	China	2-D	X	Canal	0	Modelo nucleação	X
Hermes (2012)	Brasil	Global	X	Placa plana	0,001	Correlação própria	X

A ampla maioria dos modelos para o crescimento e o adensamento de uma camada de geada existentes na literatura tem sido formulada com base no seguinte balanço de massa em uma camada de geada representado na Fig. 10 (Lee et al., 1997; Hermes et al., 2009):

$$\frac{d}{dt} \int_0^{\delta} \rho(y) dy = \rho_f \frac{d\delta}{dt} + \delta \frac{d\rho_f}{dt} \quad (1)$$

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 geada 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 , através da analogia de Lewis, $h_M = h/c_p Le^{2/3}$, onde $Le = \alpha/D_f$ é o número de Lewis (≈ 1).

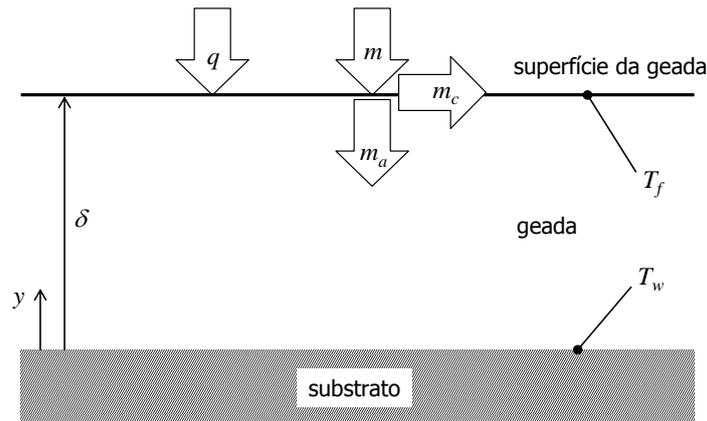


FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO
 FONTE: HERMES (2009)

Adicionalmente ao balanço global de massa, representado pela eq. (1), os seguintes balanços locais de massa e energia são respectivamente empregados para determinar a concentração de vapor d'água e também a distribuição de temperatura ao longo da camada de geada (Luer e Beer, 2000; Loyola, 2013):

$$D_f \frac{d^2\omega}{dy^2} = \frac{d\rho_f}{dt} \quad (2)$$

$$k_f \frac{d^2T}{dy^2} = -\frac{d\rho_f}{dt} i_{sv} \quad (3)$$

onde D_f é a difusividade efetiva de vapor d'água no ar dentro da geada, enquanto k_f é a condutividade térmica efetiva da camada, sendo ambos dependentes da porosidade do meio poroso, ε , e i_{sv} é o calor latente de dessublimação. As condições de contorno necessárias à solução da eq. (2) são $d\omega/dy=0$ em $y=0$ (superfície impermeável) e $\omega=\omega_{sat}(T_f)$ em $y=\delta$. A eq. (3), por sua vez, pode ser resolvida considerando-se uma condição de temperatura prescrita na superfície da placa, $T=T_w$, e a continuidade do fluxo de calor em $y=\delta$:

$$k_f \left. \frac{dT}{dx} \right|_{y=\delta} = q + \rho_f \frac{d\delta}{dt} i_{sv} \quad (4)$$

onde $q=h(T_a-T_f)$ é o fluxo de calor da corrente de ar para a camada de geada. A formulação apresentada, a qual permite o cômputo da espessura da camada de geada ao longo do tempo, $\delta(t)$, a partir da solução da eq. (1), requer que se conheça, de antemão, as propriedades termofísicas do meio poroso, particularmente a densidade da geada, que depende fortemente da morfologia dos cristais, que por sua vez está relacionada com as condições de operação (grau de supersaturação e temperatura de superfície, como ilustra a Fig. 7) que variam de acordo com a aplicação. Assim, para o fechamento do sistema de equações, são necessárias informações adicionais para a densidade e a condutividade térmica da geada, as quais são geralmente obtidas de correlações empíricas com a seguinte forma:

$$\rho_f = a \exp(bT' + cT'') \quad (5)$$

$$k_f = k_{f0} + \beta \rho_f \quad (6)$$

onde os coeficientes a , b e c da eq. (5) têm sido obtidos experimentalmente por diferentes autores para diferentes condições morfológicas, como mostra a Tab. 4.

Em adição às correlações na forma da eq. (5), ilustradas na Tab. 4, 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 e do ponto triplo da água, bem como da umidade absoluta da corrente de ar.

TABELA 4 - CORRELAÇÕES PARA DENSIDADE DA GEADA

Autores	Ano	a	b	c	T'	T''	Aplicação
Hayashi	1977	480	0,277	0	T _f	0	-18,6°C < T _f < -5°C
Piucco	2008	207,3	0,2664	-0,06148	T _f	T _w	-15°C < T _w < -5°C
Knabben	2010	492,95	0,053	-0,053	T _w	T _{dew}	T _w ~ -25°C
Silva	2012	480	0,11	-0,061	T _f	T _{dew}	T _w ~ -10°C

Tal correlação foi posteriormente revisitada por Yang e Lee (2004), que a modificaram como segue:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{Re}^{0,351} \text{Fo}^{0,311} \omega_a^{-0,368} \left(\exp\left(\frac{T_a - T_{tp}}{T_a - T_w}\right) \right)^{2,4} \quad (7)$$

sendo válida para as seguintes condições experimentais $-35 < T_w < -15^\circ\text{C}$, $5 < T_f < 15^\circ\text{C}$, $3,22 < \omega_a < 8,47 \text{ g/kg}$, e $1 < v_a < 2,5 \text{ m/s}$.

A correlação de Hayashi et al. (1977), apresentada na Tab. 4, foi recentemente revisitada por Wang et al. (2012), que propuseram dois fatores multiplicativos para levar em conta as temperaturas do ar e da superfície da geada:

$$\rho_f = 650 \cdot \exp(0,277 \cdot T_f) \cdot c_1 \cdot c_2 \quad (8)$$

onde,

$$c_1 = 0,70132 - 0,11346 \cdot T_w - 0,00203 \cdot T_w^2 \quad (8.a)$$

$$c_2 = 1,4333 - 0,17389 \cdot T_a + 0,00722 \cdot T_a^2 \quad (8.b)$$

sendo válida para as seguintes condições experimentais $-16 < T_w < -8^\circ\text{C}$, $11 < T_a < 19^\circ\text{C}$, $0,42 < \phi_a < 0,8$ e $v_a = 5 \text{ m/s}$.

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

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 0,5 \left(\frac{T_f - T_w}{T_m - T_w} \right) \exp \left(- \left(0,376 + 1,5 \left(1 - \left(\frac{T_f - T_w}{T_m - T_w} \right) \right) \right) \right) \left(1 - \sqrt{\frac{Re}{Re_c}} \right) \quad (9)$$

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.

Um estudo rigoroso dos trabalhos que envolvem o estudo da densidade de uma camada de geada mostra que as correlações empíricas disponíveis para a densidade da geada se restringem à condições específicas de operação (i.e. temperatura da superfície e grau de supersaturação) que, por sua vez, afetam as características morfológicas da geada. Por exemplo, a correlação proposta por Knabben (2010) para condições de operação de refrigeração doméstica (i.e. cristais de gelo na forma de colunas) prevê uma densidade significativamente menor que a obtida através da correlação proposta por Silva (2012) para condições de refrigeração comercial (i.e. dendritas).

Adicionalmente, a maioria das correlações depende da temperatura da superfície da geada, de modo que a correlação não pode ser empregada sem que haja disponível um modelo conjugado para o cômputo desta grandeza. A análise da literatura deixa evidente a falta de uma correlação de base física para a densidade da geada, que possa ser usada em diferentes aplicações, onde as condições de operação e, conseqüentemente, a morfologia da camada de geada são diferentes. Desenvolver uma metodologia para computar a densidade da geada em uma ampla faixa de aplicação e sem dependência da temperatura da superfície da geada é o foco do presente trabalho.

1.4 OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo geral do trabalho consiste em obter uma correlação para prever a densidade da geada em canais formados por placas planas paralelas em diferentes condições morfológicas. A fim de atingir tal objetivo, os seguintes objetivos específicos, que definem a metodologia de trabalho e conferem ao trabalho um caráter inédito, serão perseguidos:

- Construção de um aparato experimental capaz não só de medir a massa e o volume ocupado por uma camada de geada em um canal formado por placas planas paralelas que simulam os canais formados pelas aletas dos evaporadores, mas também que permita visualizar os aspectos morfológicos dos cristais em diferentes condições de operação;
- Geração de uma base de dados experimental confiável envolvendo diferentes condições morfológicas. Para tanto, técnicas de experimentação fatorial serão empregadas para avaliar o efeito simultâneo da espessura do canal, da temperatura da superfície e do grau de supersaturação sobre a morfologia e a densidade da geada;
- Obtenção de uma correlação experimental, de base física, para a densidade da geada em função das variáveis independentes, e oriundas dos dados experimentais, que seja capaz de prever com um erro satisfatório a formação de geada.

1.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente documento está dividido da seguinte forma. No Capítulo 1 é apresentada a motivação para o trabalho e os objetivos que serão perseguidos. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica por trás do modelo semi-empírico proposto para ajustar os dados experimentais. O Capítulo 3, por sua vez, descreve o aparato experimental especialmente construído para esta dissertação, bem como o planejamento dos experimentos e a técnica empregada para ajustar os dados experimentais. O Capítulo 4 discute os resultados obtidos, enquanto o Capítulo 5 sumariza as conclusões e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como mostrado na revisão da literatura, os modelos de simulação do crescimento e adensamento de uma camada de geada ou empregam correlações empíricas para a densidade em função da temperatura da superfície da geada (i.e. Hermes et al., 2009) ou adotam um valor arbitrário (geralmente 30 kg/m^3) como valor inicial da densidade (Lee et al., 1997), que é calculada através da eq. (1). Enquanto a primeira abordagem limita a faixa de aplicabilidade do modelo, a segunda o torna dependente do ajuste da condição inicial.

Para evitar ambos os problemas, no presente trabalho procurou-se estabelecer um modelo para a densidade da geada com base física, mas que pudesse ser ajustado a partir dos dados experimentais, dando um caráter semi-empírico à correlação proposta. O presente capítulo explora a fundamentação teórica por trás da correlação da geada que será apresentada no capítulo de resultados.

2.1 EQUAÇÃO EVOLUTIVA PARA A POROSIDADE

Como a densidade da geada depende tanto da densidade do ar como da densidade do cristal de gelo, ela pode ser calculada por:

$$\rho_f = \rho_a \varepsilon + \rho_i (1 - \varepsilon) = \rho_i + (\rho_a - \rho_i) \varepsilon \approx \rho_i (1 - \varepsilon) \quad (10)$$

Derivando-se a eq. (10) em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{d\rho_f}{dt} = -\rho_i \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (11)$$

Substituindo as equações (10) e (11) no modelo de crescimento e adensamento, descrito pela eq. (1), tem-se que:

$$\rho_i(1-\varepsilon)\frac{d\delta}{dt} - \rho_i\delta\frac{d\varepsilon}{dt} = m \quad (12)$$

Rearranjando a eq. (12), pode-se obter a taxa de crescimento da camada de geada, como segue:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\frac{m}{\rho_i} + \delta\frac{d\varepsilon}{dt}}{1-\varepsilon} \quad (13)$$

A eq. (13) mostra que o problema de crescimento e adensamento da camada de geada se resume à obtenção de uma equação evolutiva 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 (ver Fig. 7), o modelo evolutivo para a porosidade foi obtido considerando-se o seguinte balanço de energia em um único cristal de gelo, como mostra a Fig. 11:

$$\rho_i i_{sv} dL = \frac{k_i}{L} (T_s - T_w) dt \quad (14)$$

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

Rearranjando a eq. (14), obtém-se a seguinte equação diferencial ordinária para o crescimento de uma coluna de gelo:

$$LdL = \frac{k_i}{\rho_i i_{sv}} (T_s - T_w) dt \quad (15)$$

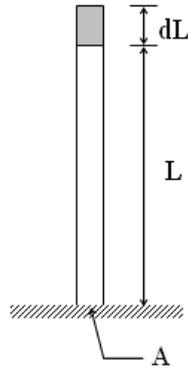


FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM CRISTAL DE GELO NA FORMA DE COLUNA

Considerando que a variação da temperatura ao longo da coluna não varia com o tempo, a equação anterior pode ser resolvida analiticamente para $L(t=0)=0$. Fazendo $\lambda = (k_i / \rho_i i_{sv})(T_s - T_w)$, que tem unidade de difusividade [m^2/s], pode-se integrar a eq. (15), como segue:

$$\int_0^L L dL = \int_0^t \lambda dt \quad (16)$$

obtendo-se:

$$L = \sqrt{2\lambda t} \quad (17)$$

onde se observa que a altura da coluna obedece a escala \sqrt{t} , característica de problemas dominados pela difusão (Hermes, 2012).

Adicionalmente, notando-se que porosidade da geada é definida como a razão entre o volume de ar úmido em relação ao volume total,

$$\varepsilon = 1 - \frac{ALNV}{V} \quad (18)$$

sendo A a área da base da coluna, V o volume do meio poroso e N é o número de embriões nucleados na superfície por unidade de área, substituindo a eq. (17), na eq. (18), obtém-se:

$$\varepsilon = 1 - c\sqrt{t} \quad (19)$$

onde c é uma constante a ser determinada com base em dados experimentais. A eq. (19) mostra que a porosidade ε , portanto, a densidade da geada também obedece a escala \sqrt{t} . Uma vez que a massa da geada é definida por:

$$M = A_s \delta \rho_f \quad (20)$$

onde A_s é a área do substrato sobre o qual a geada se forma, $\delta \sim L \sim \sqrt{t}$ e $\rho_f \sim \sqrt{t}$, de forma que se pode esperar que a massa de geada tenha um comportamento praticamente linear com o tempo,

$$M \sim \delta \rho_f \sim \sqrt{t} \sqrt{t} = t \quad (21)$$

Em adição, deve-se notar que a eq. (19) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$1 - \varepsilon = c\sqrt{t} \quad (22)$$

A Fig. 12 ilustra o comportamento da eq. (19), onde se observa graficamente que a constante c define a inclinação das retas (i) e (ii) mostradas na figura, sendo $c_{(i)} < c_{(ii)}$. O comportamento mostrado na Fig. 12 é aquele que se espera dos resultados experimentais.

Adicionalmente, de posse da eq. (22), pode-se mostrar que:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{c}{2\sqrt{t}} \quad (23)$$

onde se observa que a taxa de adensamento diminui à medida que o tempo aumenta. Modelos baseados em arranjos de esferas, como o de Cui et al.

(2011), por exemplo, não apresentam tal comportamento, sendo, portanto, fisicamente inconsistentes.

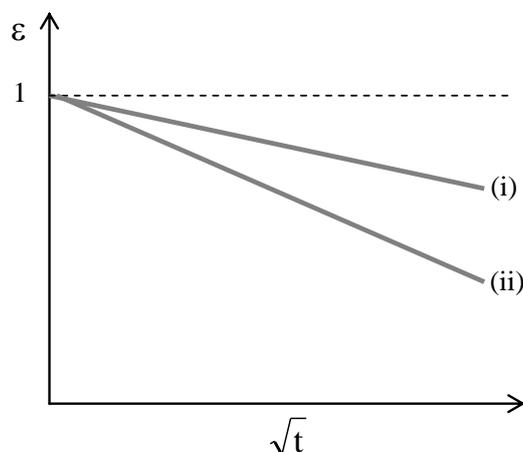


FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CONSTANTE C

Substituindo então as equações (22) e (23) na eq. (13), obtém-se a seguinte formulação generalizada para a taxa de crescimento de uma camada de geada (Loyola, 2013):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\frac{m}{\rho_i} - \frac{c\delta}{2\sqrt{t}}}{c\sqrt{t}} \quad (24)$$

onde se verifica a importância da constante c para o cômputo da evolução temporal da espessura da camada de geada.

A eq. (22) permite ainda obter uma equação evolutiva para a densidade da geada. Substituindo-a na eq. (10), obtém-se:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = c\sqrt{t} \quad (25)$$

A equação anterior fornece a base física para a correlação proposta no presente trabalho para a densidade da geada. É conveniente, no entanto, expressar a constante c em função de parâmetros geométricos e operacionais, o que será feito através de uma análise de escala, como mostrado a seguir.

2.2 ESCALAS DA DENSIDADE E DA ESPESSURA DA GEADA

A fim de expressar a constante c em função de parâmetros geométricos e de operação, uma análise de escala do problema de formação de geada, sumarizado no Capítulo 1, foi realizada. Como mostrado na eq. (6), a condutividade térmica da geada é expressa como uma função linear da densidade. Reconhecendo que, após os instantes iniciais, $\beta\rho_f \gg k_{f0}$, segue que (Storey e Jacobi, 1999; Hermes, 2012):

$$\beta \approx \frac{k_f}{\rho_f} \quad (26)$$

Introduzindo tal expressão no balanço de energia na superfície da geada (eq. 4), tem-se que:

$$\beta\rho_f \frac{\Delta T'}{\delta} \sim h\Delta T + \frac{h\Delta\omega}{c_p} i_{sv} \quad (27)$$

sendo,

$$\Delta T' = T_f - T_w \quad (28)$$

$$\Delta T = T_a - T_f \quad (29)$$

$$\Delta\omega = \omega_a - \omega_f \quad (30)$$

onde a analogia de Lewis, com $Le \approx 1$, foi empregada. Da eq. (1), observa-se que:

$$\frac{h\Delta\omega}{c_p} \sim \frac{\rho_f \delta}{t} \quad (31)$$

Definindo os números de Biot e Fourier como segue (Storey e Jacobi, 1999):

$$Bi \equiv \frac{hH}{\beta\rho_i} \quad (32)$$

$$Fo \equiv \frac{\beta t}{H^2 c_p} \quad (33)$$

E introduzindo as equações (32) e (33) na eq. (31), obtém-se:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} \sim \frac{\Delta\omega Bi Fo}{\delta/H} \quad (34)$$

Substituindo esta expressão na eq. (27), segue que:

$$\frac{\Delta\omega Fo}{(\delta/H)^2} \sim \frac{\Delta T}{\Delta T'} \left(1 + \frac{i_{sv}\Delta\omega}{c_p\Delta T} \right) \quad (35)$$

Definindo o número de Jakob como segue (Storey e Jacobi, 1999):

$$Ja \equiv \frac{c_p\Delta T}{i_{sv}\Delta\omega} \quad (36)$$

o qual representa uma relação entre o calor sensível e o calor latente envolvidos no processo de mudança de fase do vapor d'água, e a relação adimensional de temperaturas,

$$\theta \equiv \frac{\Delta T}{\Delta T'} \quad (37)$$

Introduzindo as eqs. (36) e (37) na eq. (35), obtém-se a seguinte escala para a espessura da camada de geada,

$$\frac{\delta}{H} \sim \sqrt{\frac{\Delta\omega Fo Ja}{\theta(1+Ja)}} \quad (38)$$

onde se observa, tal como na eq. (15), que a espessura da camada de geada obedece a escala \sqrt{t} (note-se que Fo carrega a escala de tempo consigo), típica de problemas difusivo dominantes. Substituindo a eq. (38) na eq. (34), obtém-se finalmente a escala da densidade da geada, dada por:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} \sim Bi \sqrt{\Delta\omega\theta \left(1 + \frac{1}{Ja}\right) Fo} \quad (39)$$

Esta expressão mostra que $\rho_f \sim \sqrt{t}$, tal como observado para o modelo de colunas (ver eq. 25). Observa-se ainda na eq. (39) que a densidade da geada depende das condições psicrométricas do ar na corrente livre e do ar na interface com a camada de geada, resumidas pelos parâmetros ω_f e T_f presentes nos termos $\Delta\omega$, θ e Ja . Em adição, observa-se que a densidade depende do Biot, que carrega consigo o coeficiente de transferência de calor por convecção, o qual, por sua vez, depende fortemente do espaçamento entre as placas que formam o canal.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de adquirir uma base de dados experimentais para ajustar a eq. (25) para a densidade da geada para uma ampla faixa de condições morfológicas, um aparato experimental foi especialmente projetado e construído neste trabalho, como descrito no presente capítulo, que mostra também o procedimento de ensaio e o plano de testes.

3.1 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental, mostrado na Fig. 13, consiste em um túnel de vento horizontal em circuito fechado que permite o controle das condições psicrométricas do ar, da vazão de ar, da temperatura da superfície do canal e do espaçamento da seção de passagem. A Fig. 14 apresenta uma representação esquemática da bancada, que será dividida em três subsistemas: estrutural, instrumentação e controle.

No subsistema estrutural, o circuito de ar possui uma seção transversal de $200 \times 200 \text{ mm}^2$, sendo composto por dois trechos retos, um onde ficam os componentes para climatização da bancada (i.e. controle de umidade e temperatura do ar na entrada da seção de testes, bem como o bocal para medição de vazão) e outro onde está instalada a seção de testes.

Placas de material isolante PU (poliuretano) foram empregadas para formar o canal onde o ar deve escoar até chegar à seção de teste, enquanto as paredes do túnel foram isoladas com placas de EPS (poliestireno expandido) com 50 mm de espessura. O cálculo de carga térmica da bancada, necessário ao dimensionamento do sistema de refrigeração, é mostrado no Apêndice I.

A rede elétrica do Laboratório de Termodinâmica e Termofísica foi redimensionada a fim de atender a demanda dos equipamentos da bancada. O circuito foi dividido em subsistema elétrico AC, que alimenta os componentes que funcionam em corrente alternada e requerem maior potência (resistências, fontes, iluminação, ar condicionado e sistema de refrigeração), e subsistema elétrico DC, que alimenta os componentes que funcionam em corrente contínua e demandam menor potência (transdutores). Foram alocados três disjuntores

para a bancada, sendo um 220V/60Hz e outro 110V/60Hz para as tomadas utilizadas em equipamentos de maior potência, e um terceiro 220V/60Hz para o ar condicionado tipo *split*, responsável por manter a temperatura da sala em torno de 20°C. Adicionalmente, um novo aterramento foi providenciado para minimizar os efeitos de ruído elétrico nos transdutores.



FIGURA 13 - FOTOGRAFIA DO APARATO EXPERIMENTAL MONTADO NO LABORATÓRIO DE TERMODINÂMICA E TERMOFÍSICA

O ar que escoia no interior do túnel de vento tem sua temperatura reduzida por um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor especialmente projetado e construído para a bancada, como detalhado no Apêndice II. O sistema de refrigeração foi instalado em série com uma resistência de 350-W pilotada por um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), cuja função reside em obter um controle fino da temperatura com base em um sinal obtido por um termopar instalado na entrada da seção de testes.

Uma segunda resistência elétrica, de 180-W, foi imersa em uma bandeja de água a fim de umidificar o ar, o que é feito através de um controlador PID que recebe um sinal de umidade de um transdutor capacitivo instalado na entrada da seção de testes. Adicionalmente, a bandeja do umidificador possui um sensor de nível magnético, conectado a um relé *on/off*, que desliga a alimentação de energia da resistência caso falte água na bandeja. As resistências estão conectadas a relés de estado sólido modelo AFC-01 da

Comtemp, que permitem controlar, a partir do sinal recebido dos controladores PIDs, o ângulo de fase e, conseqüentemente, a tensão entregue à resistência.

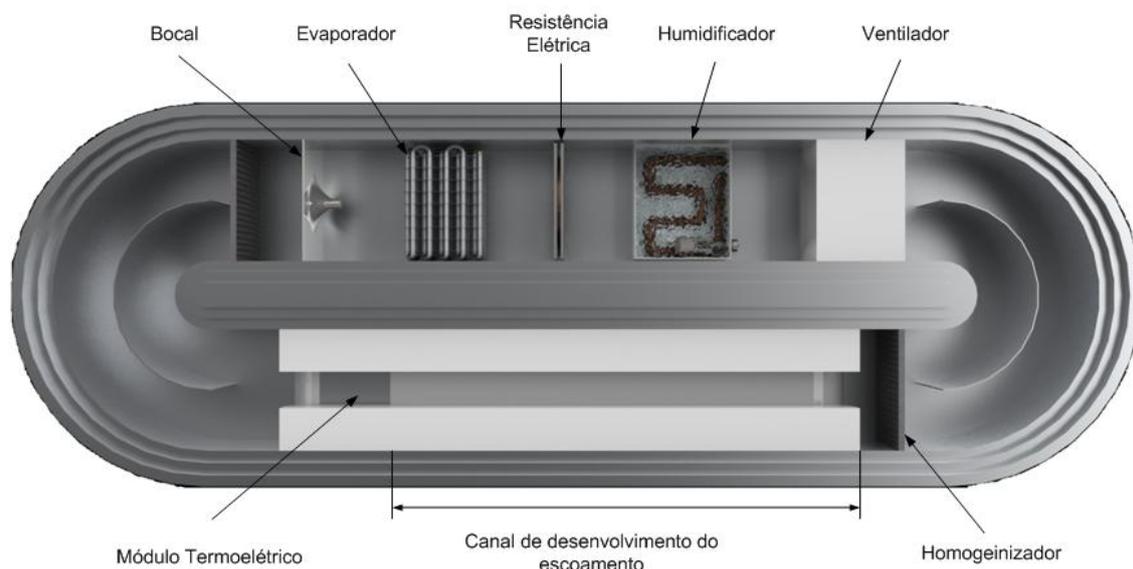


FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO TÚNEL DE VENTO

A velocidade na seção de testes é obtida através da medição da vazão de ar, medida em um bocal convergente de perfil conhecido e um transdutor de pressão diferencial, de acordo com o procedimento previsto na norma ASHRAE 51 (1999), descrito no Apêndice III. Neste trabalho, fez-se uso de um transdutor Dwyer, modelo 607-21, que trabalha numa faixa de operação de 0 a 125 Pa, com incerteza de 0,25% sobre o fundo de escala (i.e., 0,35 Pa). Foram também especificados 2 bocais com 1/2" e 1", fabricados pela Helander. Um ventilador DC axial controlado por uma fonte Hikari modelo HK-3003D, ficou responsável pela movimentação de ar, com vazões de trabalho na faixa de 1 a 20 m³/h.

No lado oposto, situa-se a seção de testes, como mostra a Fig. 14. O comprimento do trecho reto foi definido de modo que o escoamento tenha condição de se desenvolver antes de chegar à seção de testes propriamente dita, onde se situa o canal de placas paralelas em cujas superfícies a geada será formada. O cálculo do comprimento de desenvolvimento é mostrado no Apêndice IV. Na entrada da seção de testes foi utilizada uma tela homoginizadora para laminarizar o escoamento e, com isso, reduzir os efeitos de estratificação de temperatura e umidade.

As temperaturas das superfícies do canal são controladas por dois módulos termoeletrônicos acionados por controladores PID, que não só formam a seção de testes propriamente dita, mas também permitem um controle rigoroso das superfícies em que a geada será estudada. A Fig. 15 mostra uma fotografia da seção de testes onde a geada se forma, em duas situações distintas: sem geada (Fig. 15.a) e com geada (Fig. 15.b).

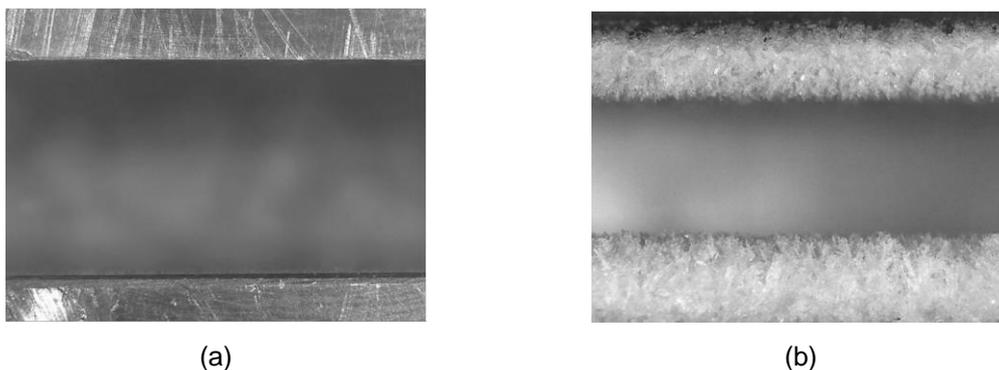


FIGURA 15 - FOTOGRAFIA DA SEÇÃO DE TESTES: (A) SEM GEADA E (B) COM GEADA

Para complementar a estrutura do módulo termoeletrônico, foi construída uma extensão de alumínio de perfil convergente que não só diminuiu a área de troca de calor com o ar, mas também a inércia térmica deste elemento. Uma representação esquemática da instalação dos módulos na bancada é mostrada na Fig. 16. São empregados dois conjuntos Lairdtech com módulo termoeletrônico modelo DAC060-24-02 acompanhados de fonte controlada por PID modelo MTTC-1410.

Um transdutor de umidade relativa do tipo capacitivo é empregado para determinar, juntamente com a pressão atmosférica e a temperatura do ar, a umidade absoluta do ar na entrada da seção de testes. Optou-se por um transdutor Testo, modelo 6610 e sonda 6681, com faixa de medição de 0 a 100% de umidade relativa e erro de 1,7% sobre medições acima de 80%. A massa de geada formada foi medida ao final do teste através de uma balança Gehaka BG2000, com incerteza de 0,01 g.

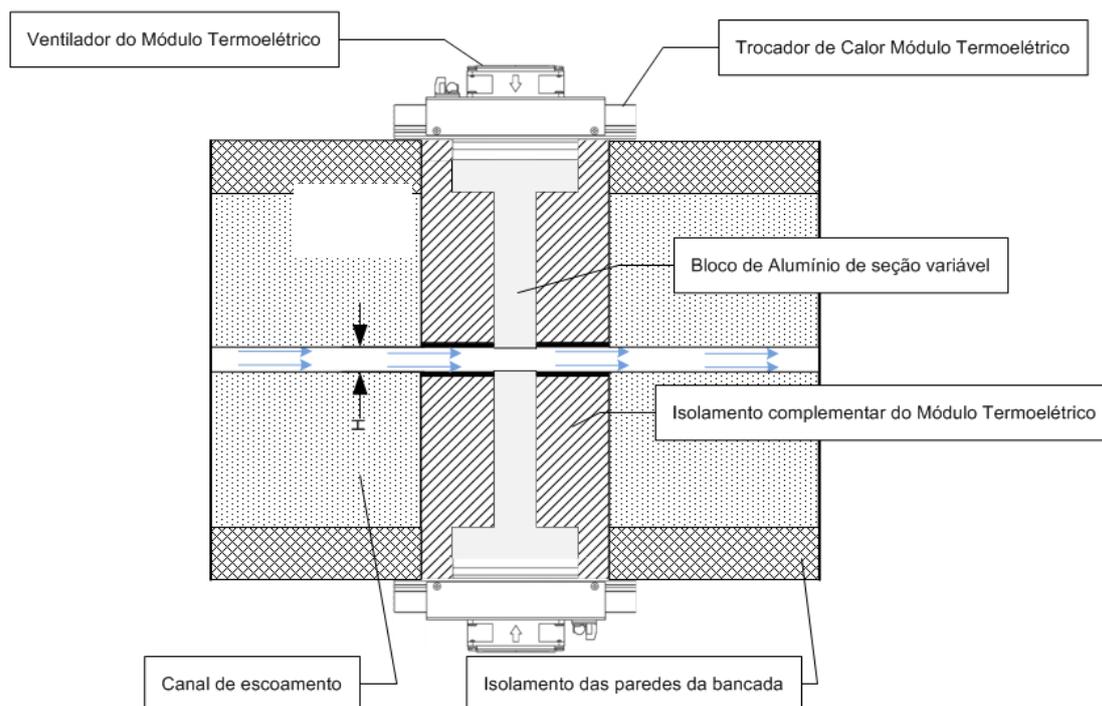


FIGURA 16 - ESQUEMA DA INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

As temperaturas ao longo da bancada são medidas por termopares do tipo T modelo Omega PR-T-24-SLE, com incerteza de 0,2 K. Foram empregadas duas tomadas de temperatura a montante e duas a jusante da seção de teste, duas tomadas de temperatura na entrada e saída do evaporador respectivamente, uma tomada de temperatura no ar acima do umidificador para controle do PID da resistência de aquecimento, uma tomada de temperatura no bocal de medição de vazão, uma tomada de temperatura no ambiente externo da bancada, e seis tomadas de temperatura nas superfícies da seção de testes, sendo três termopares em cada superfície, a fim de avaliar a homogeneidade do campo de temperatura na entrada da seção de testes.

Adicionalmente, um estereomicroscópio foi empregado para medir a espessura da geada com uma incerteza de 50 μm , em uma janela quadrada de 22 mm, que permite enquadrar a máxima distância entre as placas da seção de teste (ver Fig. 15). Optou-se pelo modelo SMZ-745T da Nikon, com câmera de 3 megapixel, lente ocular de 10x, lente objetiva de 0,5x e iluminação através de fibra óptica. Uma janela de vidro triplo, preenchida com argônio, foi instalada na lateral do túnel de vento para permitir a visualização da geada.

Os componentes do sub-sistema de medição foram especificados de maneira a obter as menores incertezas de medição dentro das condições de

teste. Um sistema de aquisição NI Rack CDAQ-9178, com 8 slots e conexão USB 2.0, foi empregado de forma a permitir não só aquisição de dados, mais também o controle de alguns componentes, tendo 16 canais para medição de temperatura (NI 9213), 16 canais analógicos genéricos que permitem a medição de tensão ou corrente (NI 9207) e 4 canais analógicos (NI 9265), com saída em corrente, para controle. Com isso, a bancada ficou totalmente automatizada, podendo ser controlada remotamente.

A Fig. 17 mostra a interface de aquisição e controle da bancada, programada no *software Labview (2011)*, enquanto a Fig. 18 mostra uma vista geral de como é feito o controle e aquisição dos equipamentos da bancada.

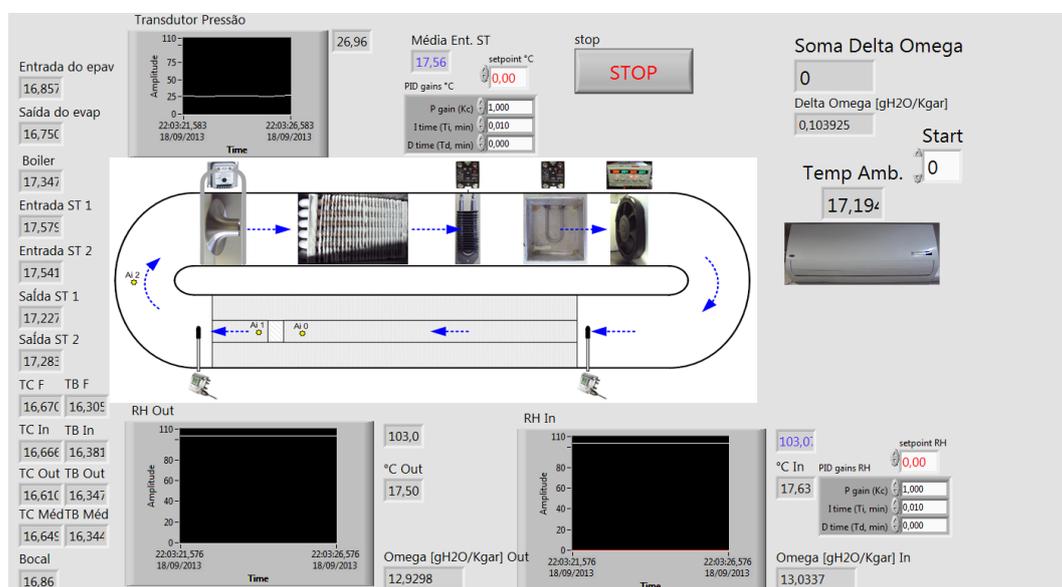


FIGURA 17 - INTERFACE DE CONTROLE E AQUISIÇÃO NO SOFTWARE LABVIEW

3.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Antes do ensaio, a bancada é preparada para que, tanto o ar como as superfícies da seção de testes atinjam as condições desejadas. A fim de evitar a formação de geada sobre as placas frias da seção de teste durante o período de estabilização da bancada, que dura em torno de 4h, foi elaborado um sistema de by-pass, constituído por um *dampner* que desvia o fluxo de ar da seção de testes antes do início do teste, evitando que as superfícies das placas frias fiquem expostas à umidade, como mostrado na Fig. 19.

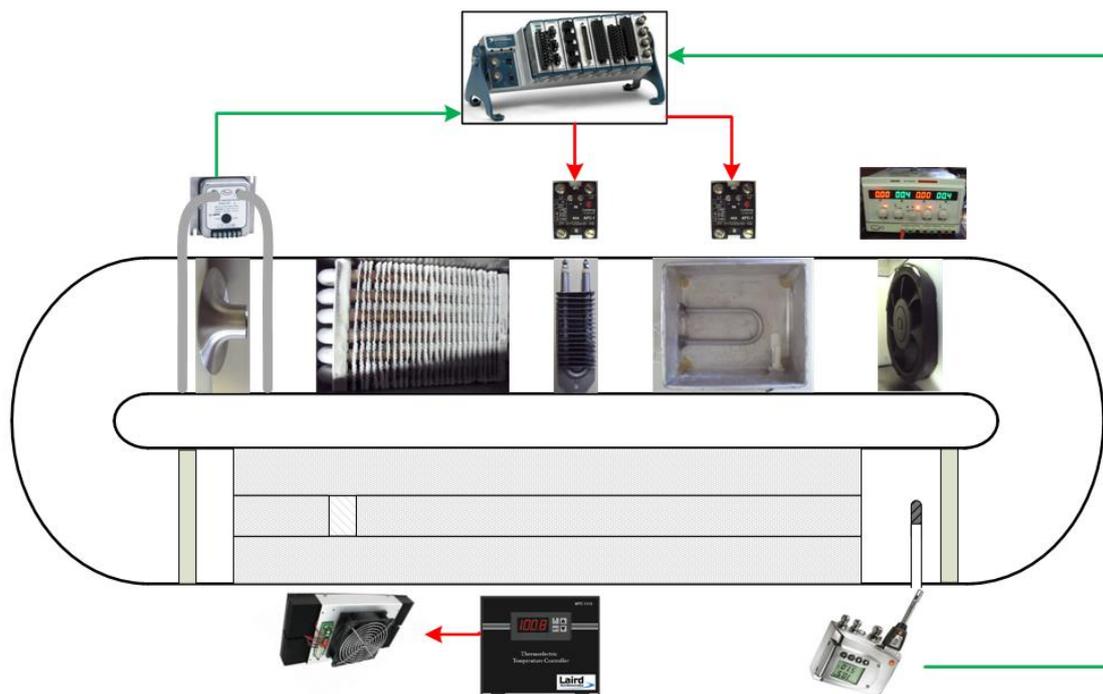


FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE INFORMAÇÕES DO SISTEMA DE CONTROLE

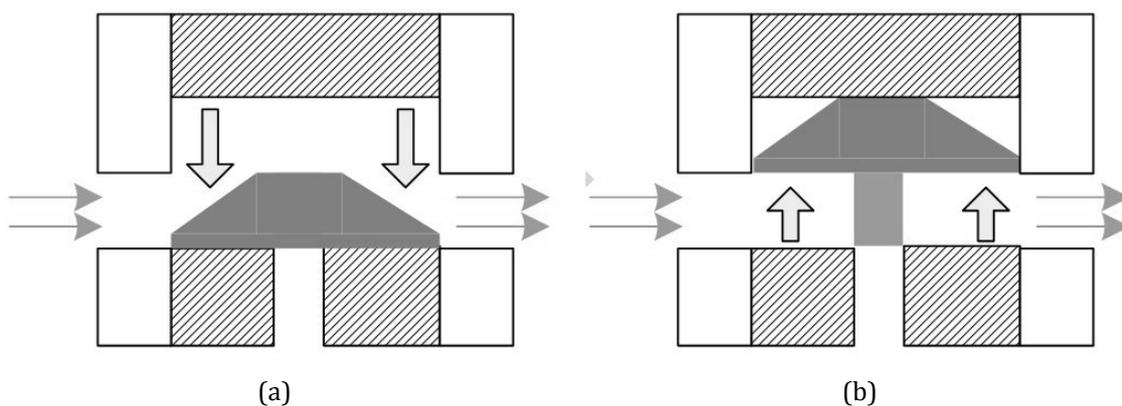


FIGURA 19 - VISTA SUPERIOR DO SISTEMA DE *BY-PASS* USADO PARA INICIAR O TESTE:
(A) ABERTO E (B) FECHADO

O teste só tem início após uma verificação de que as condições de velocidade, temperatura e umidade do ar na entrada da seção de testes, bem como as temperaturas das superfícies das placas frias, tenham alcançado a condição de regime permanente. O critério de regime permanente adotado no presente trabalho é dado por:

$$|y(t) - \bar{y}| \leq 3\sigma \quad (40)$$

onde $y(t)$ é o valor instantâneo, \bar{y} é o valor médio obtido de todas as medições realizadas em 30 minutos de teste, e σ é o desvio padrão.

A Fig. 20 ilustra um caso típico para a umidade do ar na entrada da seção de teste, onde se observa que as oscilações geradas pelo controle *on-off* do umidificador se repetem de forma periódica ao longo do experimento.

Durante o teste, são monitoradas e registradas a velocidade, a temperatura e a umidade do ar na entrada da seção de teste e as temperaturas das placas frias. Ao longo do experimento, a seção de testes é fotografada em intervalos de 1 minuto. Ao final do teste, as imagens são processadas através do software *Motic Images Plus 2.0* (MOTIC, 2013) a fim de obter a espessura da geada ao longo do tempo.

Ao término do teste, a massa de geada depositada é coletada por lenços absorventes de massa previamente conhecida, que são imediatamente inseridos em pacotes plásticos herméticos, também de massa conhecida, para que tenham sua massa medida com auxílio da balança de precisão.

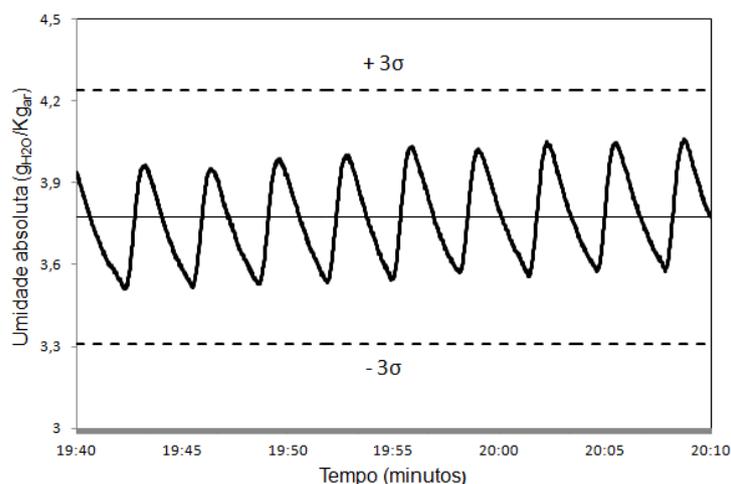


FIGURA 20 - ILUSTRAÇÃO DO CRITÉRIO DE REGIME PERMANENTE

De posse dos dados coletados para a massa, M , e a espessura da geada, δ , calcula-se a densidade da geada como segue:

$$\rho_f = \frac{M}{A_s (\delta_{\text{sup}} + \delta_{\text{inf}})} \quad (41)$$

onde A_s é a área da superfície de uma das placas frias da seção de testes, sendo δ_{sup} e δ_{inf} as espessuras da geada medidas na placa superior e inferior respectivamente. As incertezas experimentais propagadas para a densidade da geada são analisadas no Apêndice V, quando o valor de $\pm 3\%$ foi encontrado.

Com base na densidade da geada, calculada através da eq. (41), obteve-se a porosidade da geada, ε , calculada como segue:

$$\varepsilon = \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_i - \rho_a} \approx 1 - \frac{\rho_f}{\rho_i} \quad (42)$$

onde ρ_i e ρ_a são as massas específicas do gelo sólido ($=917 \text{ kg/m}^3$) e do ar úmido, calculada como uma função da pressão, da umidade e da temperatura na entrada da seção de testes.

3.3 PLANO DE TESTES

Inicialmente foram realizados treze experimentos, sendo quatro conduzidos para verificar a taxa de deposição de massa da geada ao longo do tempo e, com isso, verificar a aplicabilidade da eq. (21) aos dados experimentais. Além disso, tais testes permitiram avaliar a repetibilidade da bancada.

Adicionalmente, nove outros testes foram realizados para estudar os efeitos individuais da velocidade (3 pontos), da temperatura do substrato (3 pontos) – neste caso, foram empregadas temperaturas do ar negativas – e do grau de super-resfriamento (3 pontos) sobre a porosidade e a espessura da camada de geada. Um resumo das condições de teste é mostrado na Tab. 5.

Em seguida, realizou-se um experimento fatorial, em que vários fatores são analisados simultaneamente. O experimento fatorial é composto essencialmente por fatores e níveis. Fatores são as variáveis independentes controladas durante o experimento em níveis pré-estabelecidos. As variáveis resposta do experimento são as variáveis independentes sobre as quais se quer avaliar a influência dos fatores e das suas interações nos níveis pré-estabelecidos.

TABELA 5 - CONDIÇÕES DE TESTE PARA ANÁLISE INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS

Análise	Teste	ω_a (g/kg)	T_w (°C)	T_a (°C)	T_{dew} (°C)	H (mm)	v_a (m/s)
M	1	3,3	-24,7	2,6	-1,6	9,9	1,8
	2	3,3	-24,8	2,7	-1,6	9,2	1,9
	3	3,3	-24,8	2,8	-1,6	9,1	1,8
	4	3,2	-24,7	2,5	-2,0	8,8	1,8
va	5	3,8	-20,2	5,0	0,1	8,7	1,3
	6	3,8	-20,0	5,1	0,1	8,9	1,4
	7	3,7	-19,9	4,6	-0,2	8,9	1,8
T_w	8	1,1	-30,3	-6,1	-14,1	9,3	1,9
	9	1,1	-25,0	-5,0	-14,1	9,3	1,9
	10	1,1	-20,3	-6,0	-14,1	9,2	1,9
$T_{dew}-T_w$	11	8,4	-24,7	15,9	11,4	8,4	1,2
	12	5,7	-24,5	10,6	5,8	8,8	1,3
	13	3,8	-24,8	4,9	0,1	8,7	1,3

Neste trabalho, optou-se por um experimento fatorial completo com 3 fatores em 2 níveis cada, totalizando $2^3=8$ testes (Montgomery et al., 2009). Foram adotados como fatores o espaçamento do canal (H), a temperatura de superfície (T_w) e umidade absoluta do ar na entrada do canal (ω_a). A velocidade do ar não foi considerada, uma vez que, segundo a teoria de escoamento desenvolvido em canais de seção transversal uniforme (Lienhard IV e Lienhard V, 2003), a mesma não exerce efeito significativo sobre o coeficiente de transferência de calor. Os níveis foram escolhidos de forma que tais condições de refrigeração doméstica e comercial fossem contempladas, como mostra a Tab. 6. Nestes testes, a umidade relativa foi mantida em aproximadamente 70%, enquanto a velocidade do ar foi mantida em aproximadamente 1 m/s.

TABELA 6 - FATORES E NÍVEIS DO EXPERIMENTO FATORIAL COMPLETO

	(-)	(+)
H (mm)	10	20
T_w (°C)	-25	-10
ω_a (g/kg)	3,5	6,0

A Tab. 7 apresenta as condições de cada um dos testes que compõem o experimento fatorial, onde se observa, que os testes #12 e #13 foram reaproveitados da análise anterior (ver Tab. 6).

A fim de averiguar a repetibilidade da bancada, o teste #14 foi repetido. As condições são mostradas na Tab. 8. A Fig. 21 mostra a variação temporal da espessura da geada para as condições do teste #14, quando se observa

uma repetibilidade dentro dos limites de incerteza do experimento. Observa-se ainda que, após 120 minutos, o 1º teste apresentou uma porosidade para a geada de 0,865, contra 0,877 observado no 2º teste, ou seja, uma diferença de 1,4%, o que caracteriza um satisfatório nível de repetibilidade.

TABELA 7 - CONDIÇÕES DE TESTE PARA ANÁLISE FATORIAL COMPLETA

Teste	ω_a (g/kg)	T_w (°C)	T_a (°C)	T_{dew} (°C)	H (mm)	v_a (m/s)
12	5,7	-24,5	10,6	5,8	8,8	1,3
13	3,8	-24,8	4,9	0,1	8,7	1,3
14	5,7	-10,2	10,7	5,8	10,6	1,2
15	3,8	-10,5	4,9	0,1	9,5	1,3
16	5,8	-24,5	11,7	6,0	18,7	1,0
17	3,8	-24,8	6,0	0,1	18,6	1,0
18	6,0	-10,3	11,8	6,5	18,6	0,9
19	3,7	-10,3	5,7	-0,2	19,0	1,0

TABELA 8 - CONDIÇÕES DO TESTE #14 PARA AVALIAÇÃO DE REPETIBILIDADE

Teste	ω_a (g/kg)	T_w (°C)	T_a (°C)	T_a (°C)	H (mm)	v_a (m/s)
14	5,7	-10,2	10,7	5,8	10,6	1,2
14r	5,7	-10,2	10,7	5,8	10,2	1,2

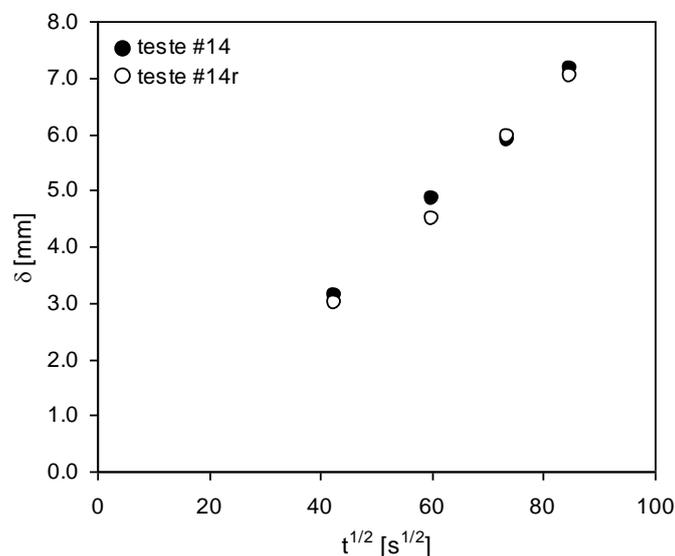


FIGURA 21 - VARIAÇÃO TEMPORAL DA ESPESSURA DA GEADA PARA AS CONDIÇÕES DO TESTE #14 OBTIDAS EM OCASIÕES DISTINTAS

No total, foram coletados neste trabalho dezenove pontos experimentais para a densidade da geada (um por condição de teste), além de 66 pontos experimentais para a espessura da camada de geada. Os resultados

experimentais são apresentados e discutidos no próximo capítulo, enquanto a matriz completa com os dados experimentais é mostrada no Apêndice VI.

4 RESULTADOS

O presente capítulo trata do processamento e análise dos dados experimentais não só com a finalidade de propor uma correlação para a densidade da geada, mas também para avançar o entendimento dos efeitos de alguns parâmetros-chave sobre os fenômenos de crescimento e adensamento de geada em canais de placas paralelas.

A análise inicia com os resultados dos testes #1 a #13 (ver Tab. 5), em que os parâmetros foram variados individualmente. Em seguida, os resultados do testes #12 a #19 (ver Tab. 7) são processados de acordo com as técnicas de experimento fatorial, onde são propostas duas correlações adimensionais, de base empírica, para a densidade e espessura da geada. Por fim, a base de dados experimentais é empregada, juntamente com as equações (25) e (39), com a finalidade de propor uma correlação, de base física, para a densidade da geada.

4.1 ANÁLISE INDIVIDUAL DE PARÂMETROS

Os resultados obtidos dos ensaios realizados para as condições #1 a #13 são sumarizados nas Tabelas 9 e 10 respectivamente para a densidade (e porosidade) e espessura da geada. Deve-se notar que, enquanto a densidade e a porosidade foram medidas apenas ao final do ensaio (ver Tab. 9, onde $t(\text{final})$ indica o instante do final do ensaio), a espessura da geada foi monitorada durante o teste, já que imagens da camada de geada foram registradas a cada 1 minuto. A Tab. 10 mostra os resultados de espessura para cada 30 min, até o final do ensaio.

Na Tab. 9, observa-se que os testes #1 a #4 foram realizados para uma mesma condição, tendo sido interrompidos em diferentes instantes (30, 60, 90 e 120 min). Com isso, pôde-se medir a massa e, conseqüentemente, a densidade e a porosidade da geada ao longo do tempo. Tal estudo foi realizado com a finalidade de se verificar a aplicabilidade da eq. (25) ao problema de densificação de geada.

TABELA 9 - RESULTADOS DOS TESTES #1 A #13 PARA A DENSIDADE E POROSIDADE DA GEADA

Teste	t (final)	ρ_f (kg/m ³)	ε
1	30	38,8	0,958
2	60	64,9	0,929
3	90	74,2	0,919
4	120	85,7	0,907
5	120	93,6	0,898
6	120	86,1	0,906
7	120	92,2	0,899
8	120	83,7	0,909
9	120	127,4	0,861
10	120	257,1	0,720
11	60	84,2	0,908
12	90	73,5	0,920
13	120	69,7	0,924

TABELA 10 - RESULTADOS DOS TESTES #1 A #13 PARA A ESPESSURA DA GEADA, EM (mm)

Teste	t=30 min	t=60 min	t=90 min	t=120 min
1	4,6	-	-	-
2	3,9	5,7	-	-
3	4,4	6,2	7,4	-
4	3,6	5,1	6,4	7,6
5	3,7	5,2	6,5	7,7
6	4,0	5,7	7,0	8,1
7	3,8	5,5	6,7	7,9
8	1,3	2,1	2,7	3,1
9	0,7	1,4	1,5	1,7
10	0,4	0,6	0,8	1,0
11	5,4	7,9	-	-
12	4,2	7,4	8,5	-
13	3,9	5,8	7,2	8,0

A Fig. 22 apresenta os resultados dos testes #1 a #4 para a porosidade da geada em função da raiz quadrada do tempo, em segundos. Verifica-se que os pontos #1 a #4 apresentam um comportamento bastante próximo do linear. Um ajuste linear entre ε e \sqrt{t} , com coeficiente linear unitário, como o mostrado na Fig. 22, apresenta uma variância (R^2) em torno de 0,97, sugerindo que o modelo teórico proposto eq. (25) correlaciona de forma satisfatória os dados experimentais.

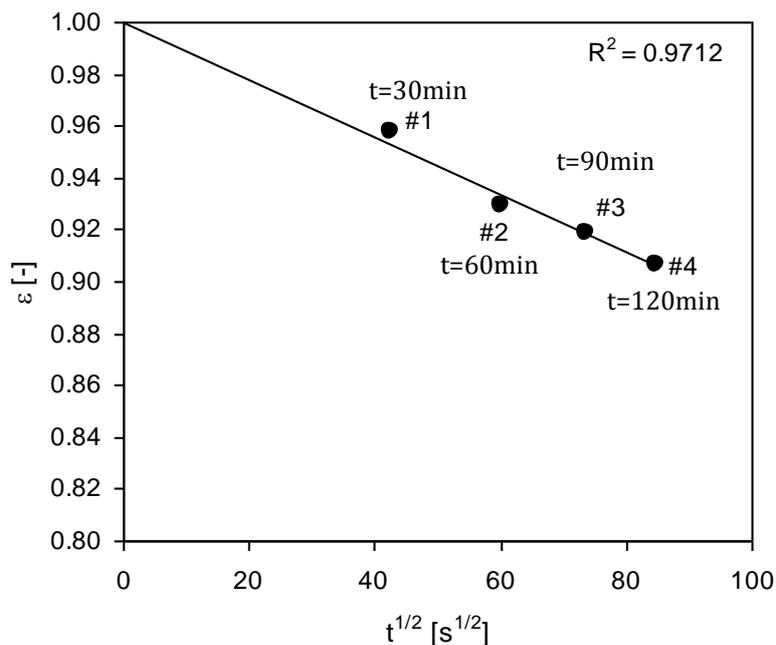


FIGURA 22 - VARIAÇÃO DA POROSIDADE COM O TEMPO PARA OS TESTES #1 A #4

As Figs. 23 a 26 apresentam as imagens obtidas durante os testes #1 a #4 para diferentes instantes de tempo. Tomando-se o instante $t=30$ min como referência, já que está presente nos quatro ensaios, pode-se observar que não só a morfologia da geada depositada, como também a espessura em $t=30$ min, são bastante semelhantes nas Figs. 23 a 26, sugerindo que os ensaios apresentam repetibilidade satisfatória.

A Fig. 26 mostra ainda que, ao longo do experimento, a seção de passagem do canal foi sendo gradativamente bloqueada pela geada, até que ficasse praticamente bloqueado em $t=120$ min. Observa-se ainda que a seção de passagem possui um formato convergente da região de entrada do escoamento (acima) até a região de saída (embaixo), uma vez que os gradientes de umidade e, conseqüentemente, a taxa de transferência de massa e de crescimento da camada de geada são maiores na entrada do canal. Vale salientar que o escoamento foi aqui representado de cima para baixo, embora os ensaios tenham sido conduzidos com o canal na horizontal.

Os testes #5 a #7, por sua vez, foram realizados para verificar o efeito da velocidade sobre o crescimento e o adensamento de geada. A Fig. 27 apresenta a evolução temporal da espessura da geada para três níveis de velocidade, onde são observados bastante próximos entre si, dentro dos limites

de incerteza do experimento, indicando que a velocidade, nos níveis avaliados, apresenta pouco efeito sobre a formação da geada.

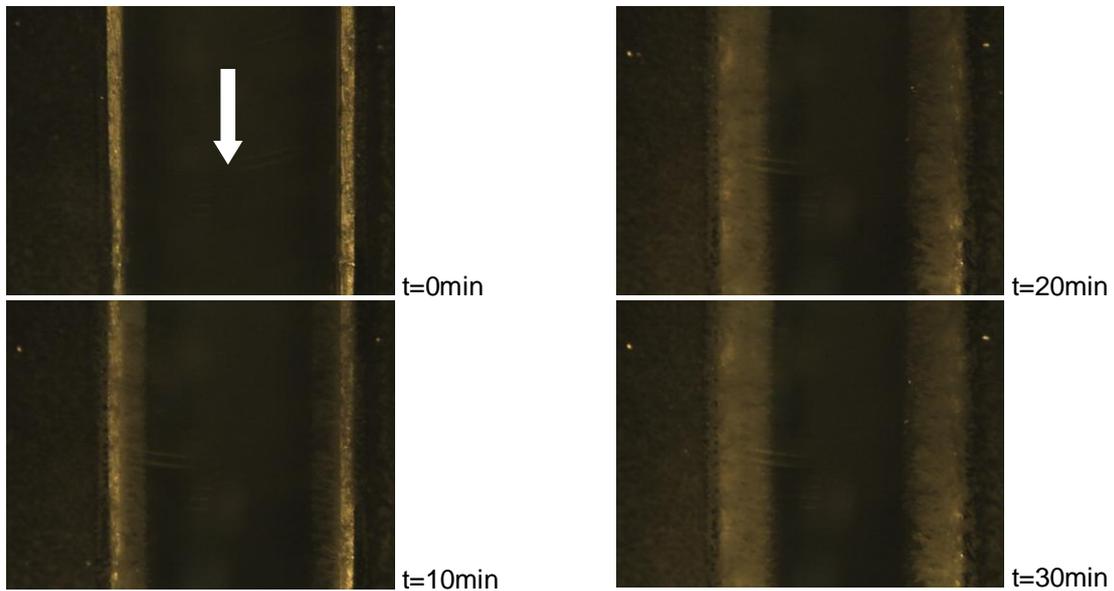


FIGURA 23 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #1 $t=30\text{MIN}$

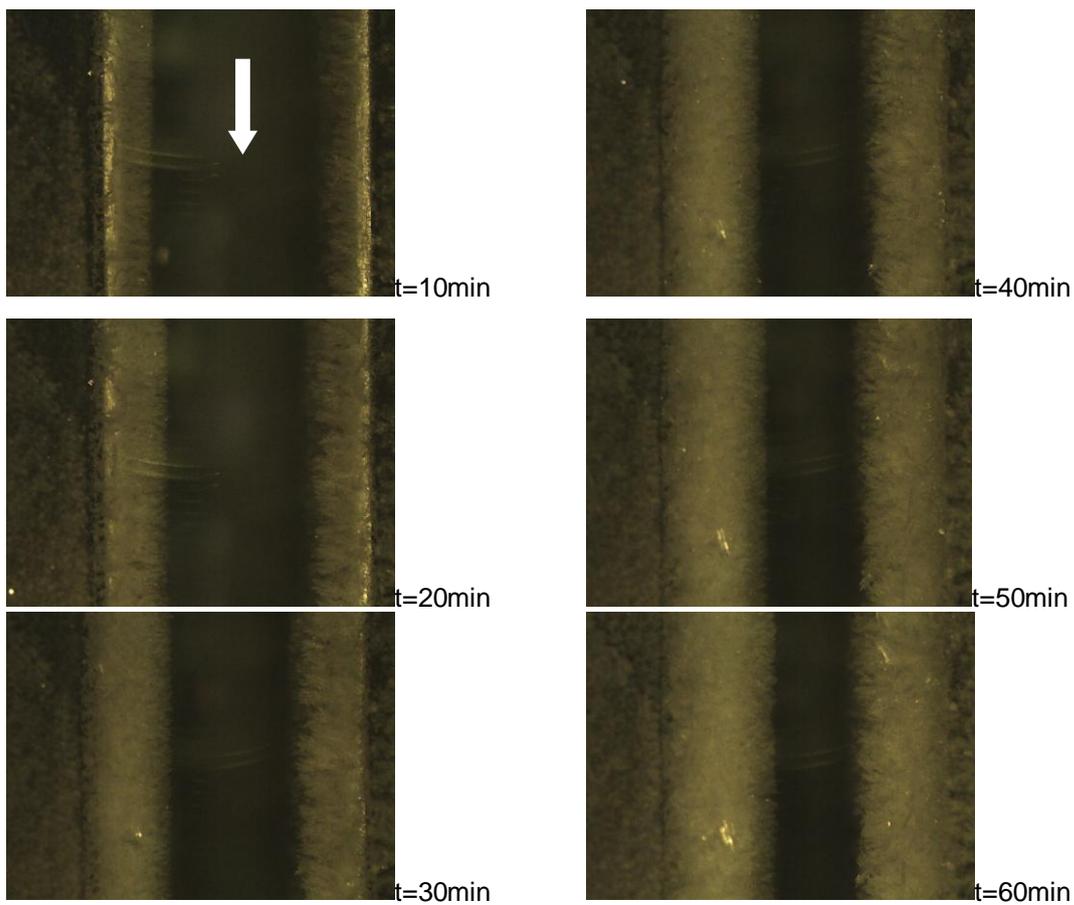


FIGURA 24 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #2 $t=60\text{MIN}$

Tal comportamento já era esperado da teoria de transferência de calor em escoamentos laminares plenamente desenvolvidos em canais de placas paralelas, em que o número de Nusselt independe do número de Reynolds e, conseqüentemente, da velocidade do escoamento.

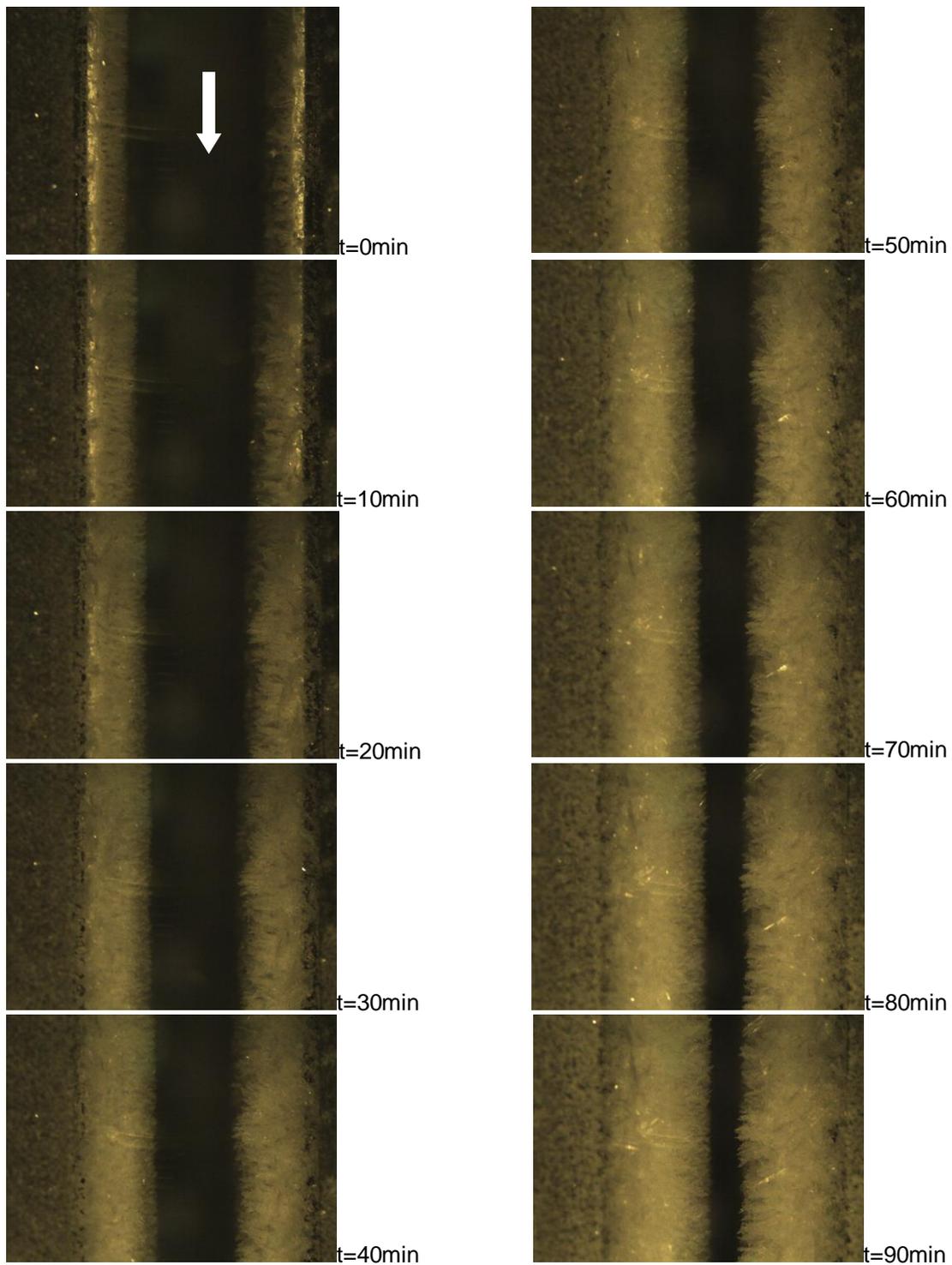


FIGURA 25 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #3 T=90MIN

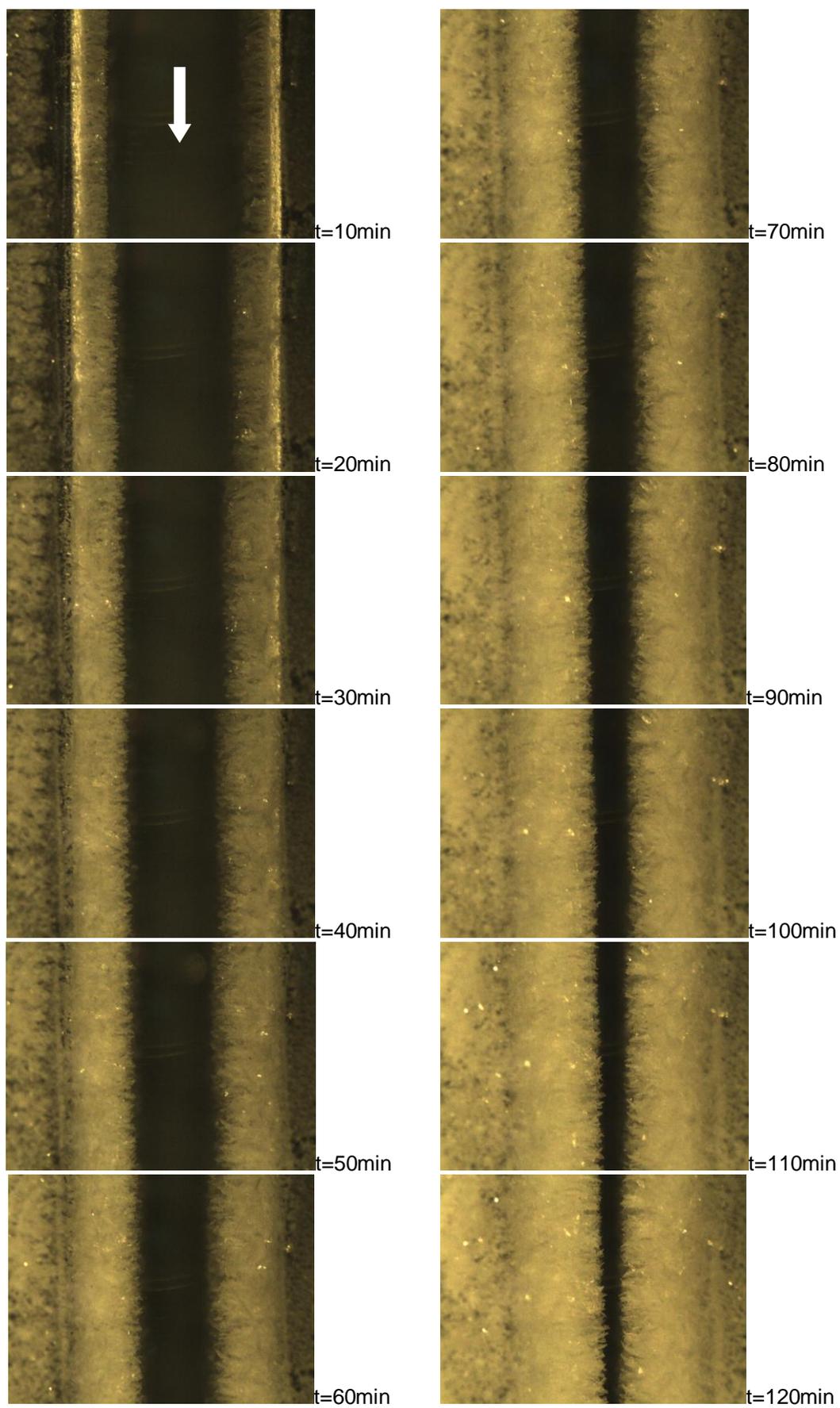


FIGURA 26 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #4 T=120MIN

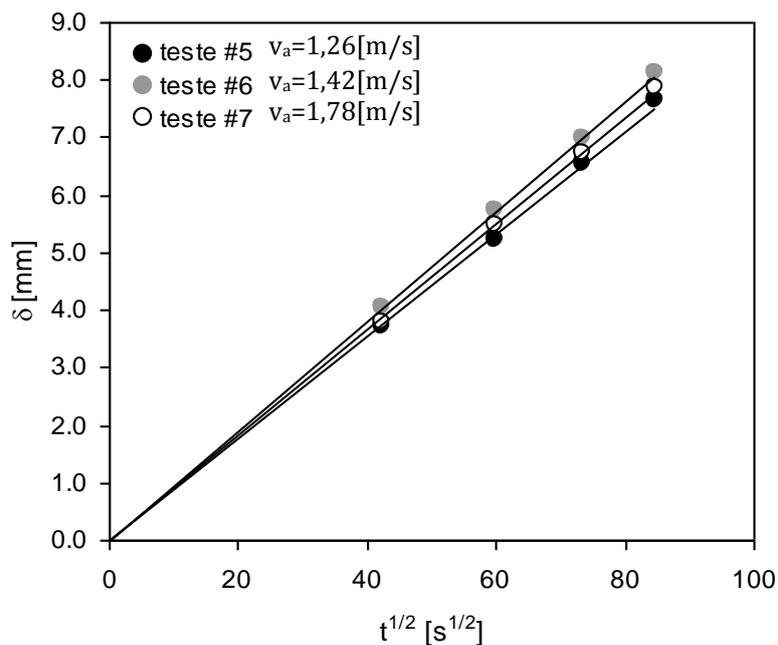


FIGURA 27 - VARIAÇÃO DA ESPESSURA COM O TEMPO PARA OS TESTES #5 A #7

Ainda na Fig. 27, pode-se observar que a espessura da geada apresenta um comportamento praticamente linear com \sqrt{t} , confirmando o comportamento previsto pela análise de escala eq. (39). As linhas representam ajustes com coeficiente linear nulo, onde são observadas variâncias (R^2) superiores à 0,99. A Tabela 11 compara os resultados obtidos para a densidade e a porosidade da geada, onde são observadas diferenças inferiores à 8% para a constante c da eq. (25).

TABELA 11 - RESULTADOS DOS TESTES #5 A #7 PARA A DENSIDADE E POROSIDADE DA GEADA

Teste #	t_f (min)	ρ_f (kg/m ³)	ε	c
5	120	93,6	0,898	0,00120
6	120	86,1	0,906	0,00111
7	120	92,2	0,899	0,00118

As Figs. 28 a 30 mostram imagens obtidas dos testes para diferentes velocidades, onde se pode observar que a evolução temporal da espessura e a morfologia da geada apresentaram-se semelhantes, independentemente da velocidade do escoamento.

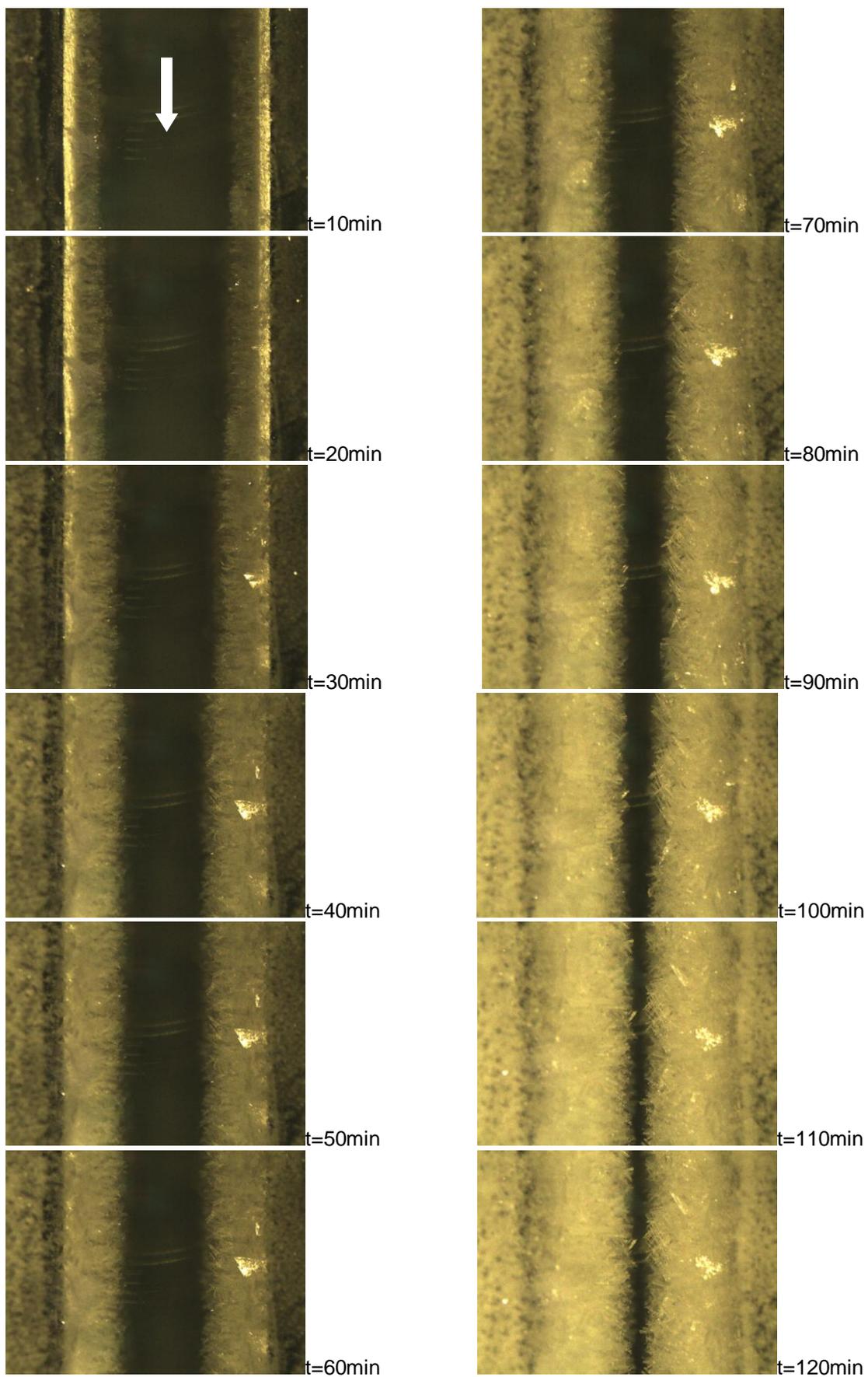


FIGURA 28 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #5 $v_a=1,26[m/s]$

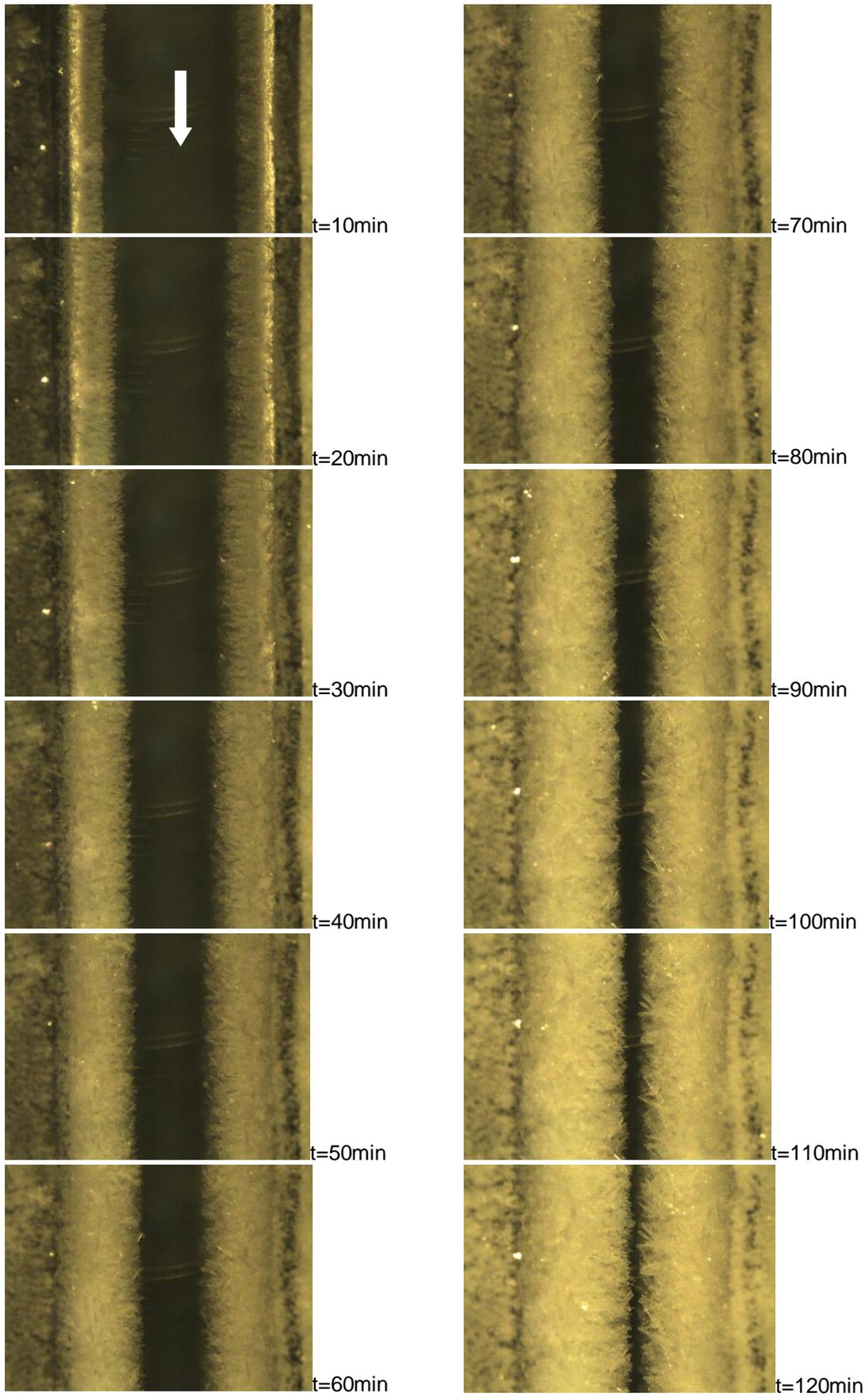


FIGURA 29 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #6 $v_a=1,42$ [m/s]

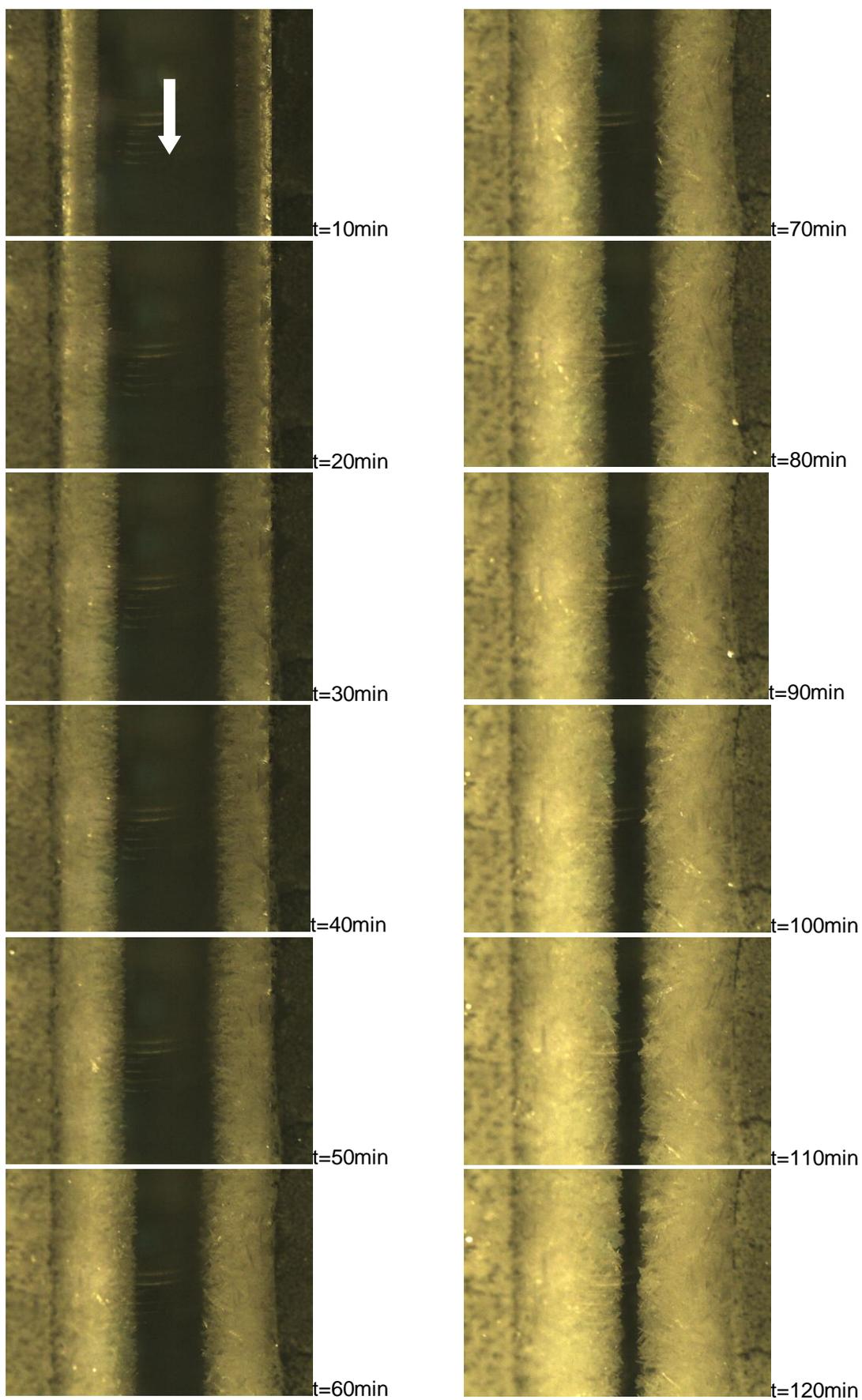


FIGURA 30 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #7 $v_a=1,78$ [m/s]

Os testes #8 a #10 foram conduzidos a fim de avaliar o efeito da temperatura da superfície da placa sobre a formação de geada. Nesses testes, a temperatura do ar e a temperatura de orvalho foram mantidas bem abaixo do ponto triplo a fim de garantir uma condição de operação compatível com refrigeração doméstica. Neste caso, manteve-se a umidade relativa em 50%, a velocidade em 1,9 m/s e a altura do canal em torno de 10 mm.

A Fig. 31 apresenta a porosidade da geada para três diferentes graus de super-resfriamento. Para o teste #8, em que o grau de super-resfriamento ficou em torno de 16K, nota-se um comportamento semelhante ao observado nos testes anteriores, em que o grau de super-resfriamento ficou em torno de 20K, com geada mais porosa e menos densa. O teste #10, por outro lado, apresenta um grau de super-resfriamento baixo, em torno de 6K, para uma temperatura de superfície mais alta (-20°C). Tal combinação de fatores faz com que a morfologia da geada mude de colunas para placas (ver Fig. 7), fazendo com que uma geada mais densa e menos porosa seja formada. Um comportamento intermediário é observado para o teste #9, onde um grau de super-resfriamento em torno de 10K é observado para uma temperatura superficial em torno de -25°C, caracterizando uma morfologia dendrítica (ver Fig. 7). Tais diferenças morfológicas são confirmadas pela análise das imagens das Figs. 32 a 34.

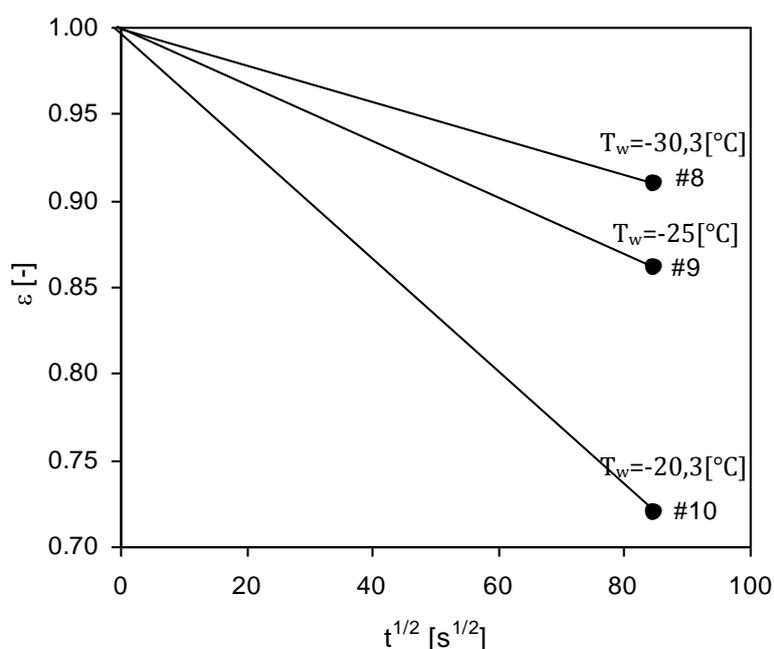


FIGURA 31 - VARIAÇÃO DA POROSIDADE COM O TEMPO PARA OS TESTES #8 A #10

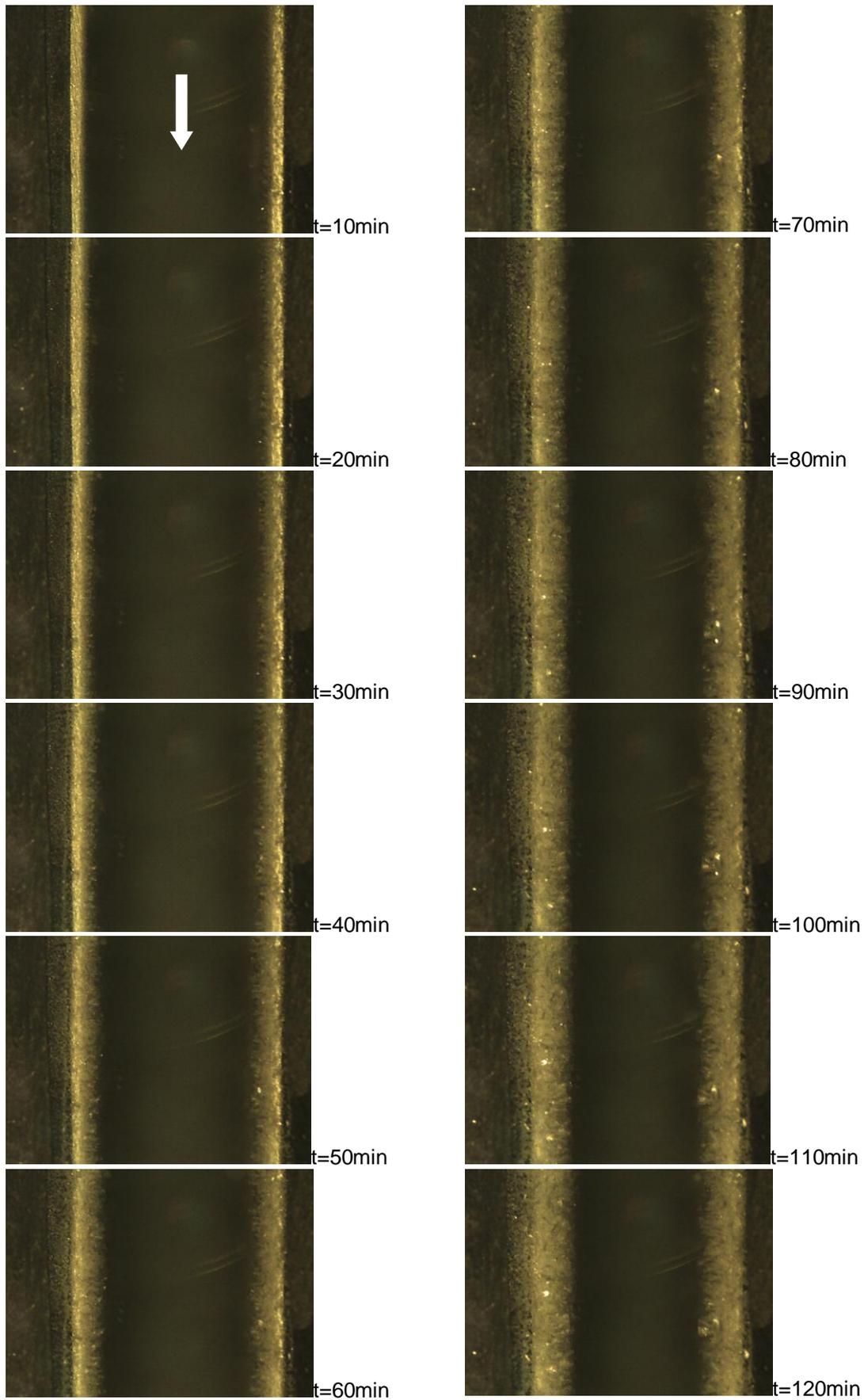


FIGURA 32 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #8 $T_w = -30,3[^\circ\text{C}]$

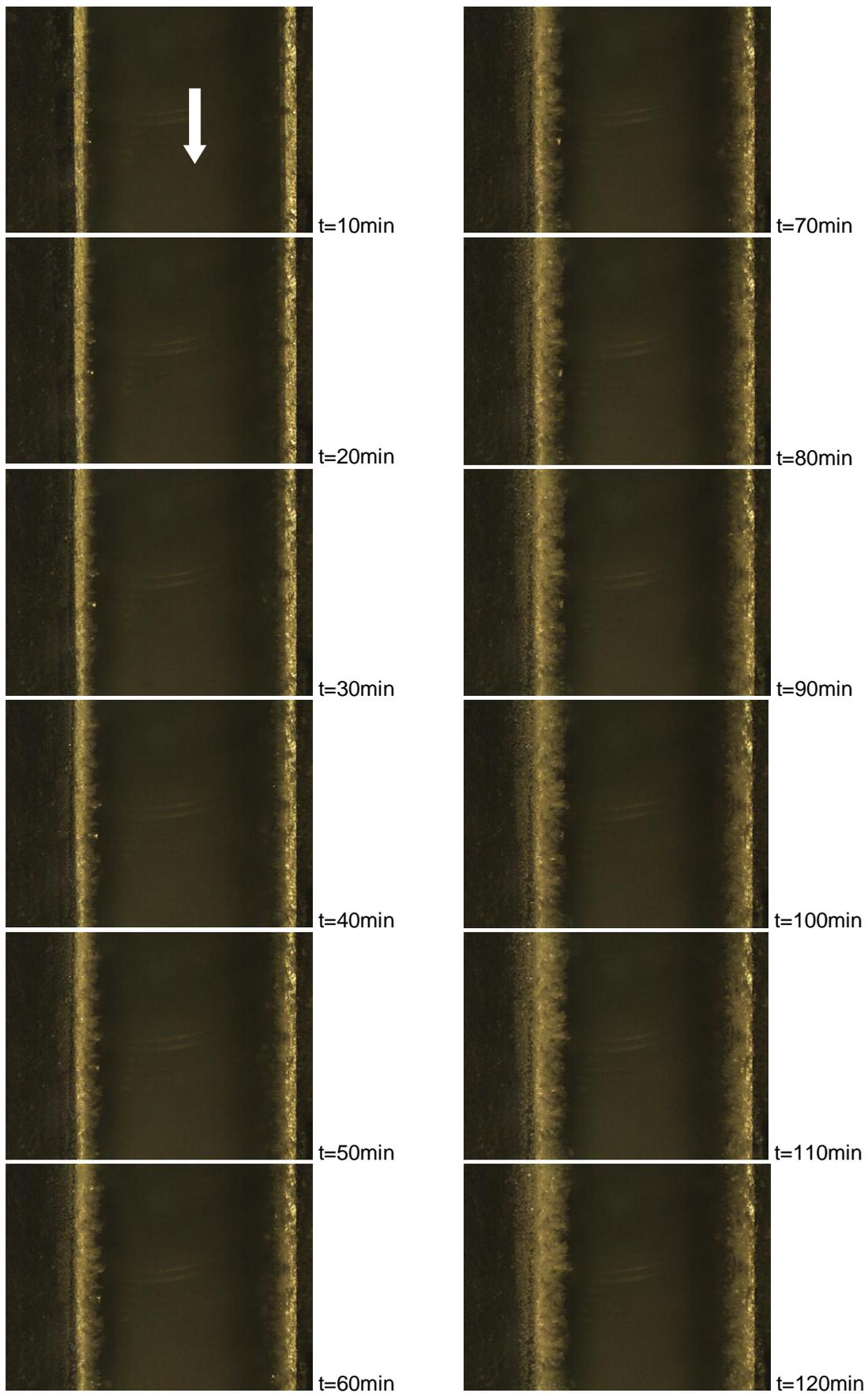


FIGURA 33 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #9 $T_w = -25[^\circ\text{C}]$

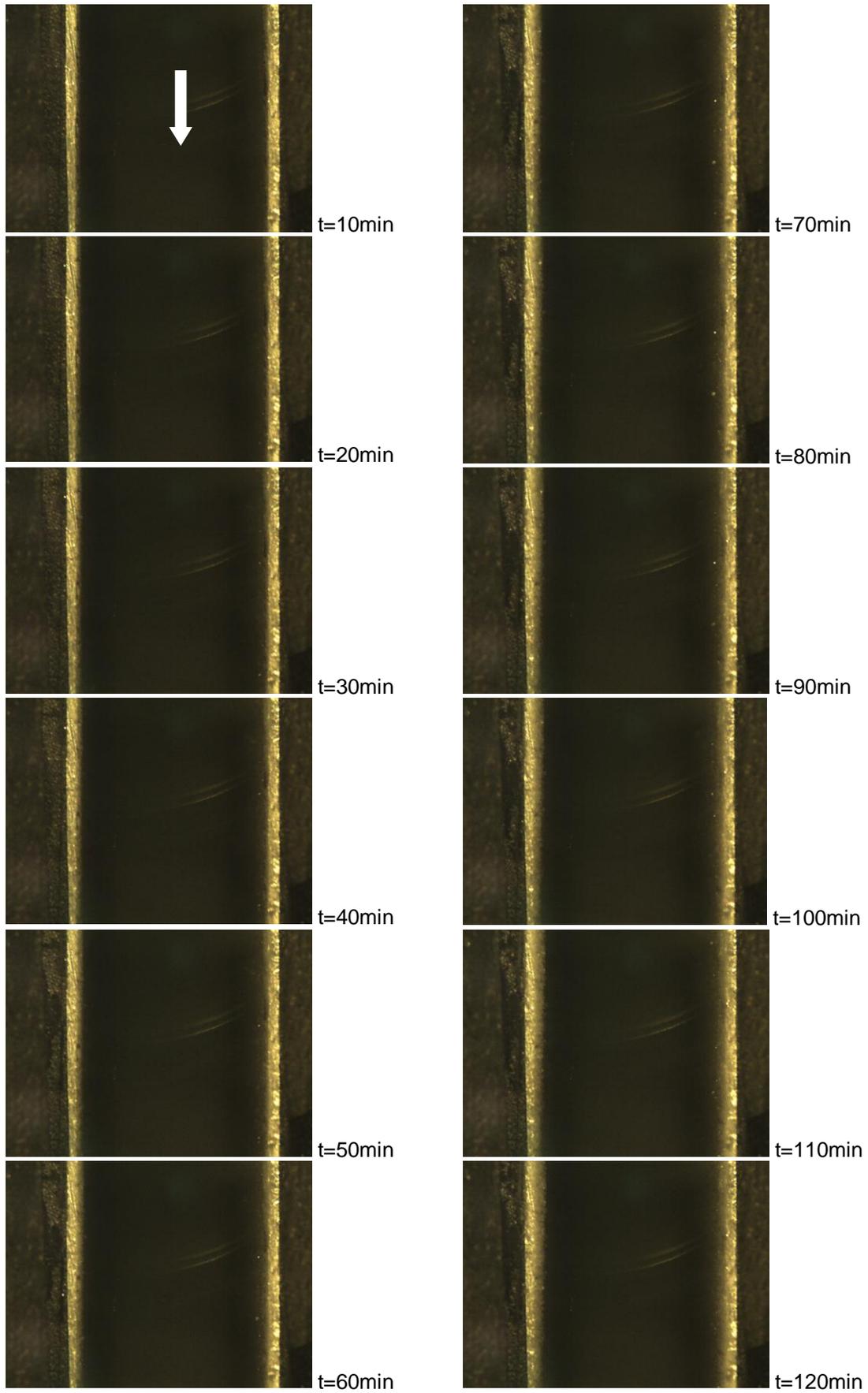


FIGURA 34 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #10 $T_w = -20,3[^\circ\text{C}]$

A relação inversa entre a densidade da geada e o grau de super-resfriamento, no caso em que este diminuiu à medida que a temperatura da superfície aumentou, é ilustrada pela Fig. 35. A Fig. 36, por sua vez, confirma que a espessura da geada é maior para os casos com maior grau de super-resfriamento. Mais uma vez, observou-se um comportamento praticamente linear entre δ e \sqrt{t} , com $R^2 \sim 0,93$, confirmando a escala prevista na eq. (39).

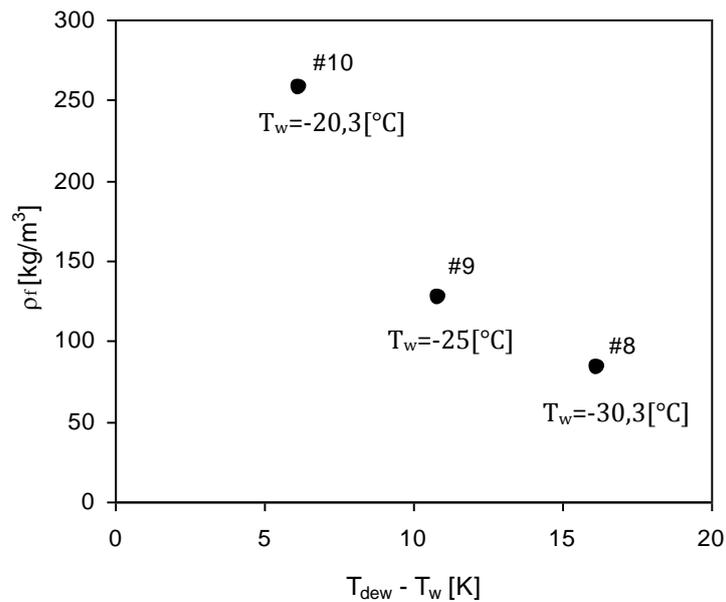


FIGURA 35 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA COM O GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO

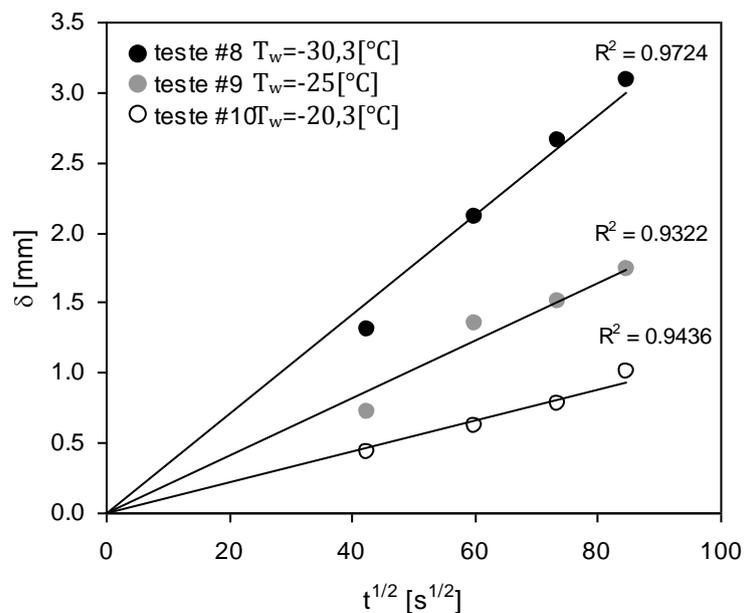


FIGURA 36 - VARIAÇÃO DA ESPESSURA DA GEADA COM O GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO

Os testes #11 a #13 visam explorar o efeito da umidade do ar e, conseqüentemente, do grau de super-saturação sobre a formação de geada. Nestes testes, a temperatura da superfície foi mantida em torno de -25°C e a umidade relativa do ar em 70%, enquanto a umidade absoluta e a temperatura do ar variaram. Adicionalmente, a velocidade do ar foi mantida em 1,3 m/s e o espaçamento do canal em torno de 10 mm.

A Fig. 37 mostra a porosidade da geada obtida ao final dos testes #11, #12 e #13, enquanto a Fig. 38 ilustra a evolução temporal da espessura, onde, mais uma vez, pode-se observar um comportamento linear entre δ e \sqrt{t} . Assumindo-se que ε evolui linearmente com \sqrt{t} , como mostrado na eq. (27) e comprovado na Fig. 22, conclui-se que a condição #13, com menor grau de super-saturação, levou a uma geada menos densa e espessa, enquanto o teste na condição #11, mostrou uma geada mais densa e espessa. Isso se deve, mais uma vez, aos aspectos morfológicos da geada.

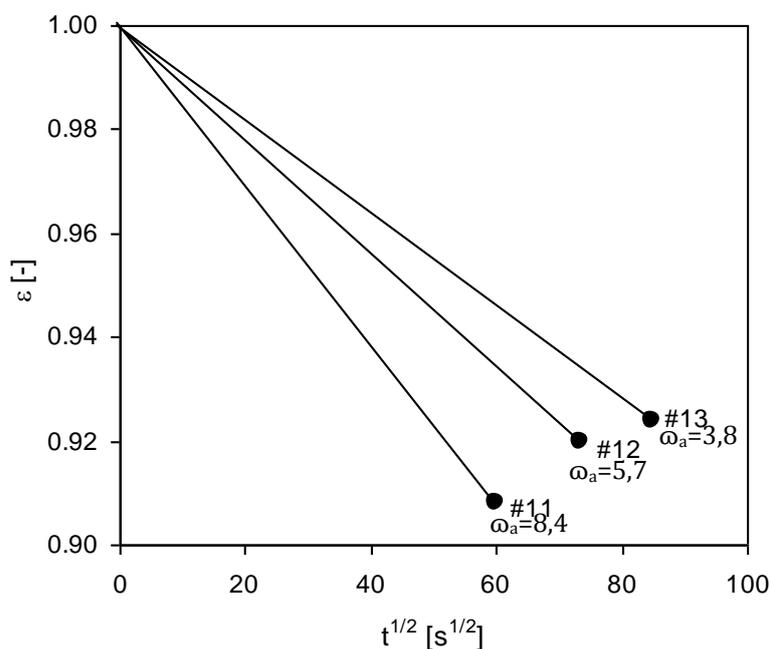


FIGURA 37 - VARIAÇÃO DA POROSIDADE COM O TEMPO PARA OS TESTES #11 A #13

Para uma temperatura superficial constante em torno de -25°C , pode-se esperar uma morfologia de colunas cheias para o caso #11 e de colunas ocas para o caso #13 (ver Fig. 7), o que explica a diferença de densidade. No caso

da espessura, um menor grau de supersaturação leva a um menor fluxo de massa e, com isso, a uma menor taxa de crescimento, explicando o comportamento observado na Fig. 38. Tal explicação se confirma com a análise das imagens nas Figs. 39 e 40.

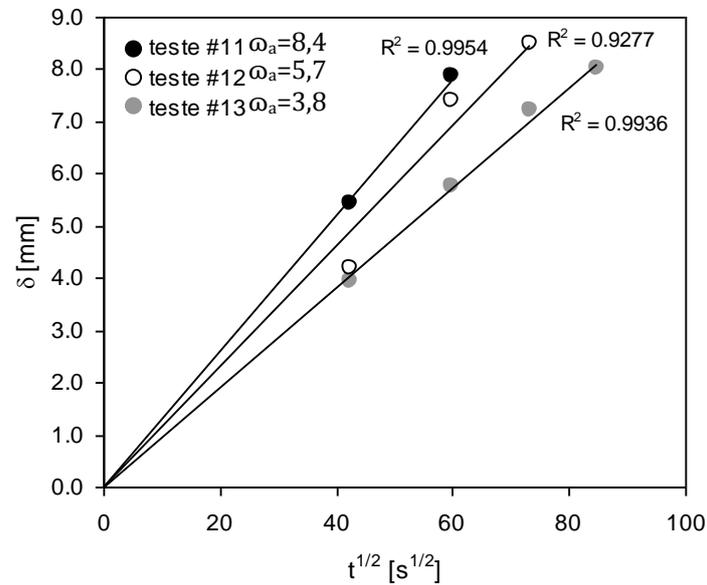


FIGURA 38 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ESPESSURA DA GEADA PARA OS TESTES #11 A #13

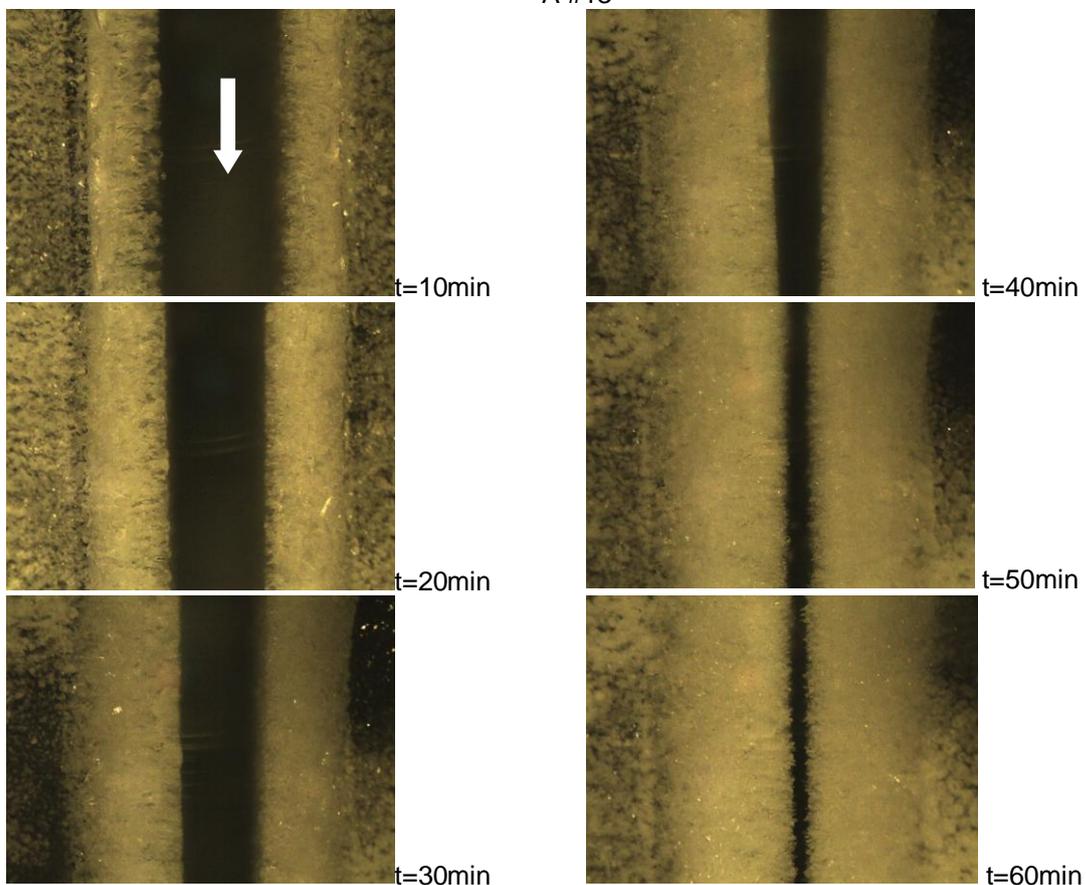


FIGURA 39 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #11 $\omega_a=8,4$

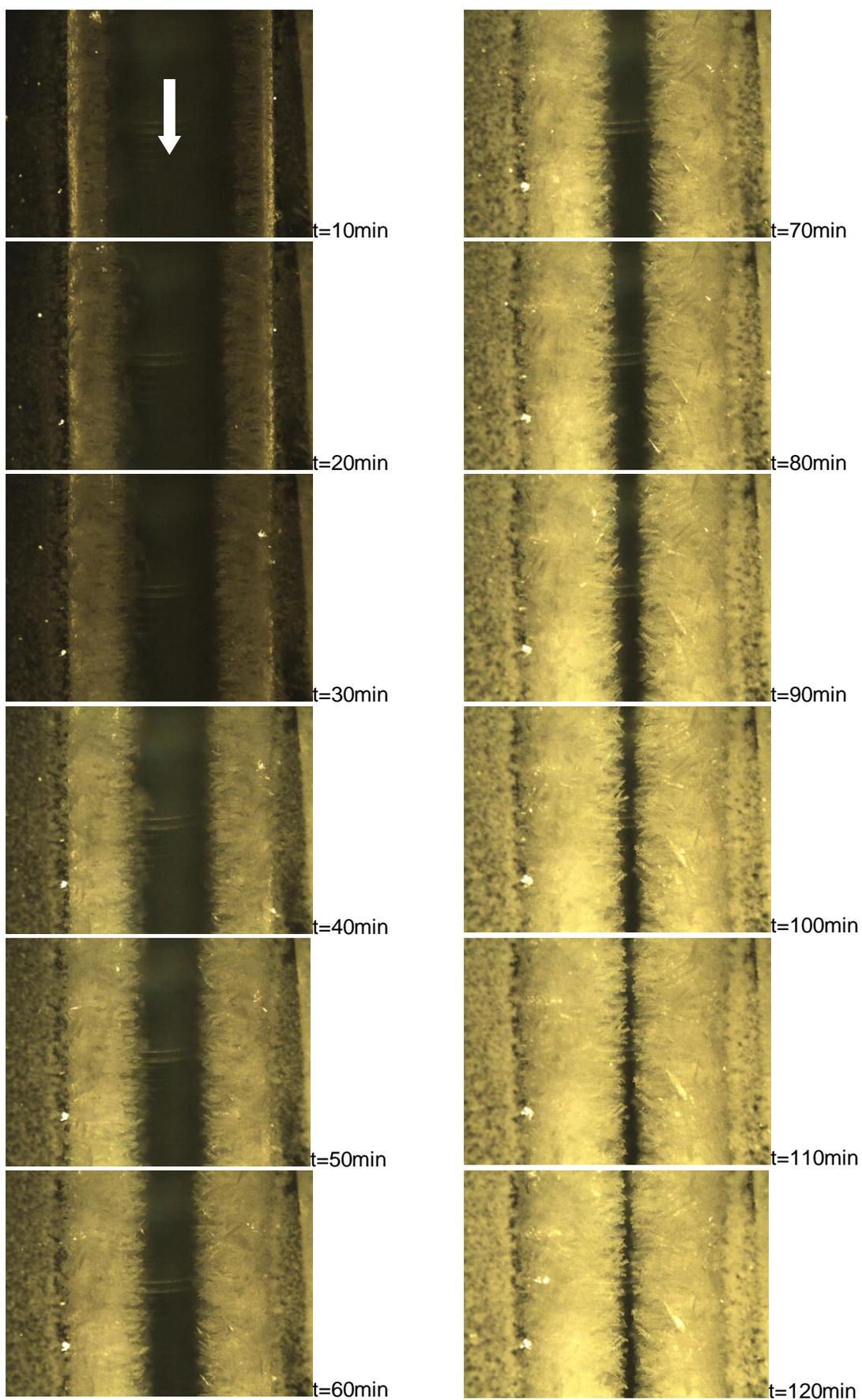


FIGURA 40 - CRESCIMENTO DA GEADA PARA O TESTE #13 $\omega_a=3,8$

Diferentemente dos testes #8 a #10, que mostraram uma relação inversa entre o grau de super-resfriamento e a densidade da geada, o comportamento inverso pode ser percebido na Fig. 41 para os testes #11 a #13, o que se deve às diferentes morfologias da geada depositada.

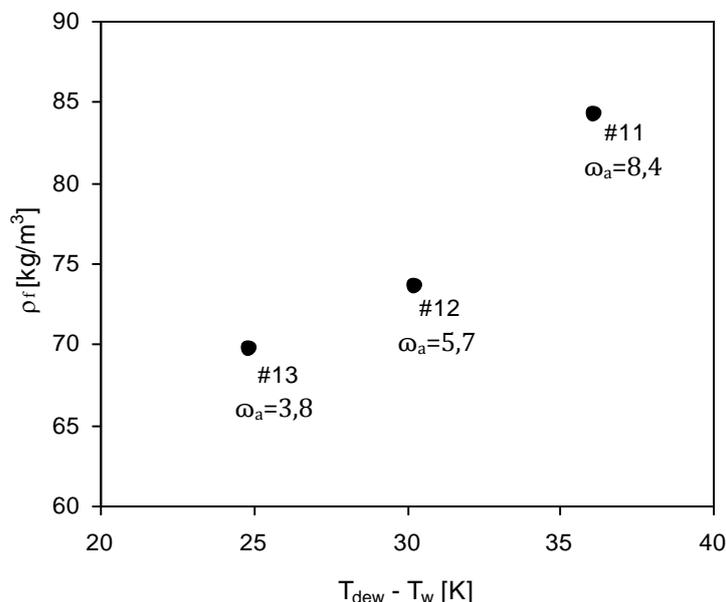


FIGURA 41 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA GEADA COM O GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO PARA OS TESTES #11 A #13

4.2 ANÁLISE DO EXPERIMENTO FATORIAL

Os experimentos fatoriais foram conduzidos para avaliar os efeitos simultâneos de ω_a , T_w e H sobre a formação de geada. A Tab. 12 resume os resultados obtidos para a densidade, porosidade e constante c da eq. (25). Observa-se, contudo, que nas condições do teste #12, a geada bloqueou o canal após 90 min de teste, enquanto nas demais condições (#13 a #19), os testes puderam ser realizados até 120 minutos.

A fim de analisar os resultados do experimento fatorial em um mesmo instante de tempo, fez-se uso da eq. (25), bem como da constante c obtida experimentalmente, para interpolar o valor da densidade nas condições dos testes #13 a #19 para o instante $t=90$ min. Os resultados são mostrados na Tab. 13, juntamente com os valores de espessura medidos diretamente das imagens obtidas em $t=90$ min.

TABELA 12 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL PARA DENSIDADE, POROSIDADE E CONSTANTE C

Teste	t_{final} (min)	ρ_f (kg/m ³)	ε	c (s ^{-1/2})
12	90	73,5	0,920	0,00109
13	120	69,7	0,924	0,00090
14	120	124,1	0,865	0,00159
15	120	117,0	0,872	0,00150
16	120	115,3	0,874	0,00148
17	120	81,4	0,911	0,00105
18	120	161,0	0,824	0,00207
19	120	129,3	0,859	0,00166

TABELA 13 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL PARA T=90 MIN

Teste	ω_a (g/kg)	T_w (°C)	H (mm)	$\rho_{f@90\text{min}}$ (kg/m ³)	$\delta_{@90\text{min}}$ (mm)
12	5,7	-24,5	8,8	73,5	8,5
13	3,8	-24,8	8,7	60,4	7,2
14	5,7	-10,2	10,6	107,5	6,0
15	3,8	-10,5	9,5	101,3	3,6
16	5,8	-24,5	18,7	99,8	8,3
17	3,8	-24,8	18,6	70,5	7,1
18	6,0	-10,3	18,6	139,4	5,3
19	3,7	-10,3	19,0	112,0	3,2
Max	6,0	-10,2	19,0	139,4	8,5
Min	3,7	-24,8	8,7	60,4	3,2

Com a propósito de tratar os resultados do experimento fatorial, tanto os fatores (ω_a , T_w e H) como as variáveis resposta (ρ_f e δ em t=90 min) foram adimensionalizadas de acordo com a seguinte equação:

$$\hat{X} = 2 \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} - 1 \quad (43)$$

onde X representa tanto uma variável independente como uma variável resposta, X_{\max} e X_{\min} são os valores máximo e mínimo observados na Tab. 13, e \hat{X} indica o valor adimensional de X, que varia no intervalo [-1,1]. Os valores adimensionalizados são mostrados na Tab. 14.

Após as adimensionalizações, os dados da Tab. 14 foram ajustados para ρ_f e δ de acordo com as seguintes equações:

$$\hat{\rho}_{f@90\text{min}} = a_0 + a_1\hat{\omega}_a + a_2\hat{T}_w + a_3\hat{H} + a_4\hat{\omega}_a\hat{T}_w + a_5\hat{\omega}_a\hat{H} + a_6\hat{T}_w\hat{H} + a_7\hat{\omega}_a\hat{T}_w\hat{H} \quad (44)$$

$$\hat{\delta}_{@90\text{min}} = b_0 + b_1\hat{\omega}_a + b_2\hat{T}_w + b_3\hat{H} + b_4\hat{\omega}_a\hat{T}_w + b_5\hat{\omega}_a\hat{H} + b_6\hat{T}_w\hat{H} + b_7\hat{\omega}_a\hat{T}_w\hat{H} \quad (45)$$

TABELA 14 - RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL NA FORMA ADIMENSIONAL

Teste	$\hat{\omega}_a$	\hat{T}_w	\hat{H}	$\hat{\rho}_{f@90\text{min}}$	$\hat{\delta}_{@90\text{min}}$
12	0,7	-1,0	-1,0	-0,7	1,0
13	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	0,5
14	0,7	1,0	-0,6	0,2	0,0
15	-0,9	1,0	-0,8	0,0	-0,9
16	0,8	-1,0	0,9	0,0	0,9
17	-0,9	-1,0	0,9	-0,7	0,5
18	1,0	1,0	0,9	1,0	-0,2
19	-1,0	1,0	1,0	0,3	-1,0

Uma vez que todos os parâmetros envolvidos são adimensionais, os coeficientes das eqs. (44) e (45) fornecem diretamente a sensibilidade da variável resposta (efeito) em relação à variável independente (fator) à eles associados. Os ajustes foram realizados através do método dos mínimos quadrados. Os coeficientes são mostrados na Tab. 15, enquanto a boa qualidade dos ajustes para ρ_f e δ em $t=90$ min pode ser observada nas Figs. 42 e 43, respectivamente.

TABELA 15 - COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES (44) E (45)

Índice	Termo	Coef. a	Coef. b
0	-	-0,123080	0,144964
1	$\hat{\omega}_a$	0,235413	0,401149
2	\hat{T}_w	0,462586	-0,618750
3	\hat{H}	0,272175	-0,087880
4	$\hat{\omega}_a \hat{T}_w$	-0,068080	0,103724
5	$\hat{\omega}_a \hat{H}$	0,141725	-0,058270
6	$\hat{T}_w \hat{H}$	0,033674	-0,055540
7	$\hat{\omega}_a \hat{T}_w \hat{H}$	0,025484	-0,053890

A Fig. 44 explora a sensibilidade da densidade da geada em $t=90$ min em relação às variáveis independentes (ω_a , T_w , H) e suas interações ($\omega_a T_w$, $\omega_a H$, $T_w H$, $\omega_a T_w H$), enquanto a Fig. 45 o faz para a espessura da geada em

$t=90$ min. Os números nas ordenadas referem-se ao índice dos coeficientes mostrados na Tab. 15.

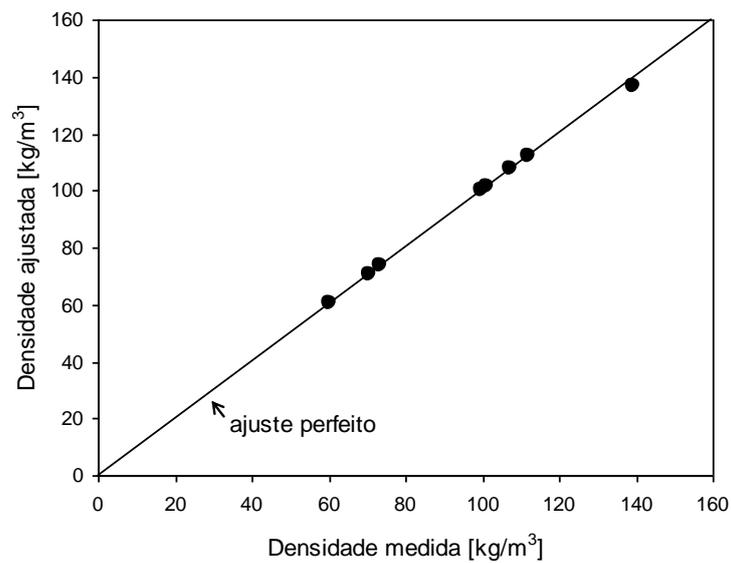


FIGURA 42 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA EQ. (44) E OS DADOS EXPERIMENTAIS

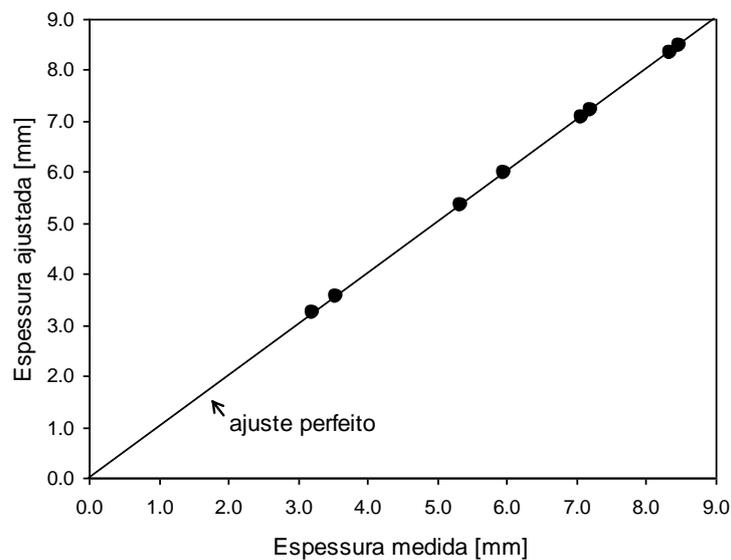


FIGURA 43 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DA EQ. (45) E OS DADOS EXPERIMENTAIS

A Fig. 44 mostra que a temperatura da superfície do substrato apresenta um papel dominante sobre a densidade, seguida da umidade do ar e do espaçamento do canal, sendo os dois últimos com influências da mesma ordem. Nos três casos, observa-se uma influência positiva, ou seja, a

densidade aumenta à medida que os fatores aumentam do nível (-) para o nível (+).

Os efeitos de ω_a , T_w e H podem ser melhor entendidos com auxílio das equações (34) e (39). Na segunda, observa-se que à medida que ω_a aumenta, $\Delta\omega$ também aumenta, elevando ρ_f . No caso de T_w , um aumento desta grandeza implica na elevação de θ , o que aumenta ρ_f . Na eq. (34), por outro lado, verifica-se que a altura do canal é diretamente proporcional à ρ_f . As interações de alta ordem mostraram efeitos marginais, salvo pelo termo $\omega_a H$ (coeficiente 5), o que se deve à escala $Bi\Delta\omega^{1/2}$ na eq. (39).

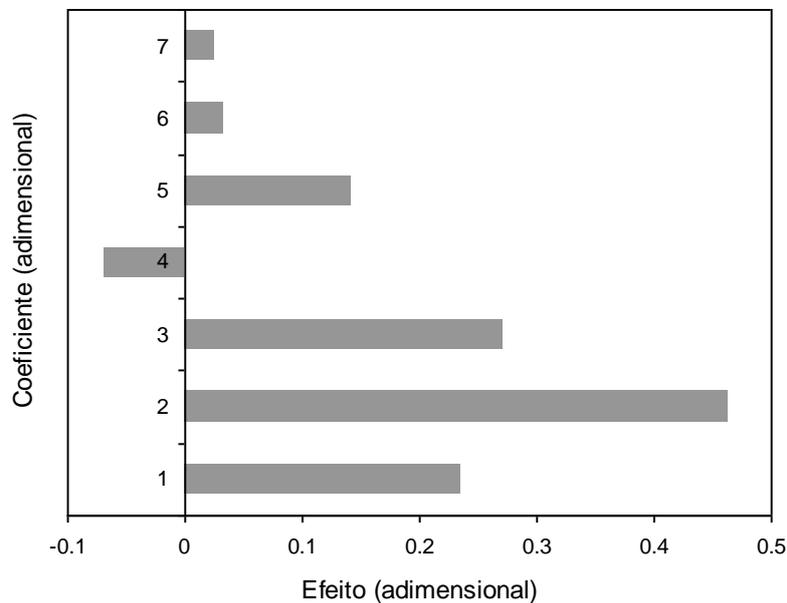


FIGURA 44 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A DENSIDADE

A Fig. 45 mostra que o efeito de H , bem como os dos termos de alta ordem, sobre a espessura da geada são desprezíveis face aos efeitos de ω_a e T_w . Enquanto ω_a mostrou uma influência positiva sobre a espessura, o que se deve à escala $\delta \sim \Delta\omega^{1/2}$ na eq. (38), T_w mostrou uma influência negativa, fruto da escala $\delta \sim \theta^{-1/2}$ na mesma equação. Com isso, observa-se que o experimento fatorial confirmou as previsões da análise de escala apresentada no Capítulo 2 tanto para a densidade da geada (eq. 39) como para a sua espessura (eq. 38).

4.3 CORRELAÇÃO SEMI-EMPÍRICA

Com base na eq. (25) e nos 19 pontos experimentais obtidos no presente trabalho, propõe-se o seguinte ajuste semi-empírico para a constante c :

$$c = C\Lambda^{-n} \quad (46)$$

onde Λ é um parâmetro adimensional, inspirado no número de Jakob (ver eq. 36), que relaciona o grau de super-resfriamento com o grau de supersaturação,

$$\Lambda = \frac{c_p (T_{\text{dew}} - T_w)}{i_{sv} (\omega_a - \omega_{\text{sat}}(w))} \quad (47)$$

onde c_p é o calor específico do ar seco (1005 J/kgK) e i_{sv} é o calor latente de dessublimação do vapor d'água ($2,83 \times 10^6$ J/kg).

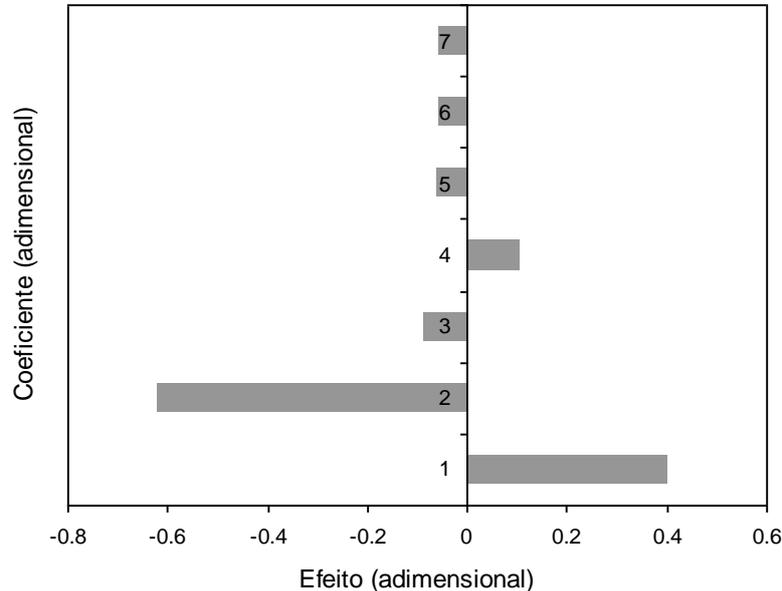


FIGURA 45 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES SOBRE A ESPESSURA

Assim, uma correlação de base física para a densidade da geada é dada por:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = C\Lambda^{-n} \sqrt{t} \quad (48)$$

Uma análise dos limites da equação acima mostra que $\rho_f \rightarrow 0$ quando $\Lambda \rightarrow \infty$, o que ocorre quando não há transferência de calor latente e, portanto, não há transferência de massa.

Inicialmente, os 19 pontos experimentais foram empregados no ajuste. No entanto, percebeu-se que os testes #8 a #10, que foram realizados em condições de operação dramaticamente distintas dos demais, introduziram erros consideráveis ao ajuste, com desvios da ordem de 50%. Assim, visto que as condições morfológicas dos testes #8 a #10 são diferentes, optou-se por excluí-los do ajuste final, que levou em conta os resultados dos testes #1 a #7 e #11 a #19. O teste de repetição #19r não foi empregado. Como resultado, obteve-se $c=0,0022$ e $n=0,76$.

A Fig. 46 compara as previsões da eq. (48) com $C=0,0022$ e $n=0,76$ contra os 19 pontos experimentais. Os pontos marcados em cinza referem-se aos testes #8 a #10, excluídos do ajuste. Verifica-se que dos 16 pontos, apenas 2 apresentaram valores acima, mas bastante próximos, da banda de 15% de erro.

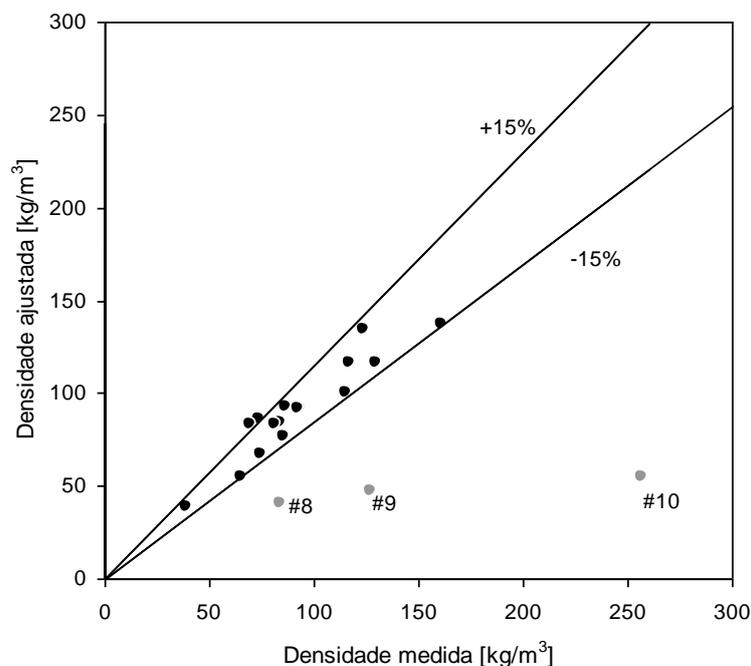


FIGURA 46 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PREVIÕES DA EQ. (50) COM $C=0,0022$ E $N=0,76$ CONTRA OS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS PARA CANAIS DE PLACAS PARALELAS

A fim de verificar a aplicabilidade do modelo proposto a outras configurações, fez-se também um ajuste da eq. (48) aos dados de Hermes et al. (2009), obtidos para placas planas horizontais de comprimento 10 cm. Os 24 pontos experimentais de Hermes et al. (2009) obtidos em 12 condições distintas são reproduzidos na Tab. 16. O ajuste da eq. (48) contra os dados de Hermes et al. (2009), levou aos valores $C=0,0024$ e $n=1,5$.

A Fig. 47 compara as previsões da eq. (48) com $C=0,0024$ e $n=1,5$ contra os 24 pontos experimentais de Hermes et al. (2009), onde se observa que apenas 3 pontos apresentaram valores acima, mas bastante próximos, da banda de 15% de erro. Tal resultado indica que a eq. (48) fornece uma boa base física para o ajuste da densidade da geada, sendo válida tanto para canais de placas paralelas como para placas horizontais.

TABELA 16 - DADOS EXPERIMENTAIS DE HERMES ET AL. (2009) PARA PLACA PLANA HORIZONTAL

Teste	T_a (°C)	ϕ_a (%)	T_w (°C)	ε (t=60min)	ε (t=120min)
1	22	80	-15	0,853	0,777
2	22	80	-10	0,806	0,725
3	22	80	-5	0,756	0,654
4	22	50	-15	0,903	0,858
5	22	50	-10	0,871	0,830
6	22	50	-5	0,861	0,811
7	16	80	-15	0,908	0,863
8	16	80	-10	0,887	0,834
9	16	80	-5	0,852	0,792
10	16	50	-15	0,912	0,884
11	16	50	-10	0,909	0,874
12	16	50	-5	0,879	0,852

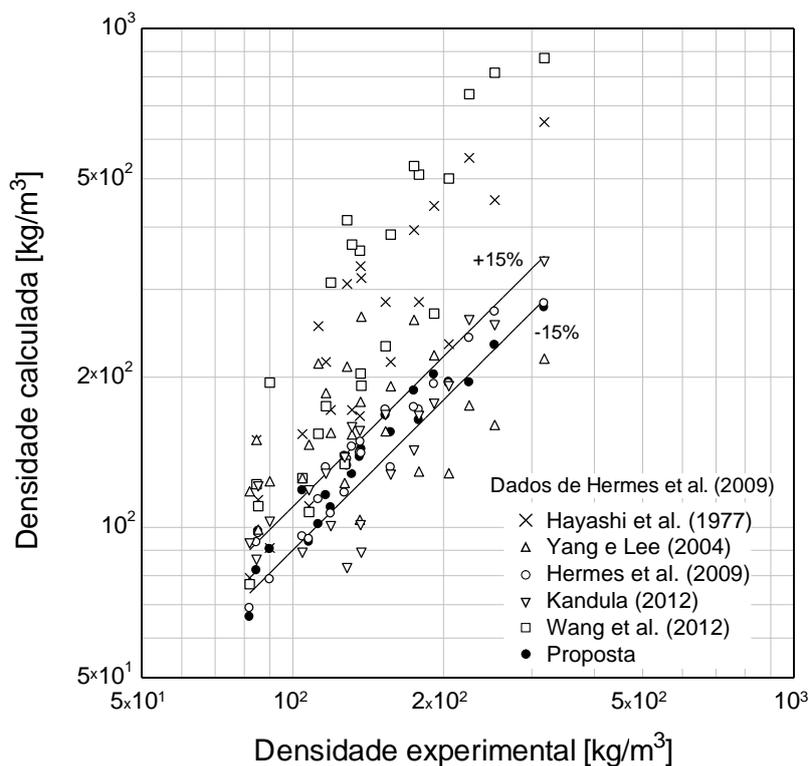


FIGURA 47 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PREVISÕES DA EQ. (48) COM $C=0,0024$ E $N=1,5$, BEM COMO DE OUTRAS CORRELAÇÕES DISPONÍVEIS NA LITERATURA PARA PLACA PLANA CONTRA OS DADOS EXPERIMENTAIS DE HERMES ET AL. (2009)

A Fig. 47 também compara as previsões de outras correlações existentes na literatura com os dados de Hermes et al. (2009). Verifica-se que a correlação de Hermes et al. (2009) mostrou erros da ordem de $\pm 15\%$, enquanto as correlações de Kandula (2012) e Yang e Lee (2004) tenderam, respectivamente, a subestimar e a superestimar os dados experimentais em aproximadamente 30%. As correlações de Hayashi et al. (1977) e Wang et al. (2012), sendo a segunda baseada na primeira, tendem a superestimar os dados experimentais em mais de 50%.

A fim de obter uma correlação única para a densidade da geada, a eq. (48) foi ajustada simultaneamente aos 16 dados do presente trabalho e aos 24 pontos experimentais de Hermes et al. (2009), obtendo-se $C=0,0023$ e $n=0,86$. A Tab. 17 sumariza os valores dos coeficientes C e n obtidos nos ajustes realizados para as duas bases de dados.

A Fig. 48 compara os resultados desse último ajuste contra a base de dados de 40 pontos experimentais, onde se verifica que apenas 2 dos 40 pontos estão afastados da banda de erro de $\pm 15\%$. Com isso, acredita-se ter

obtido uma correlação física confiável para a densidade da geada formada em uma ampla faixa de operação.

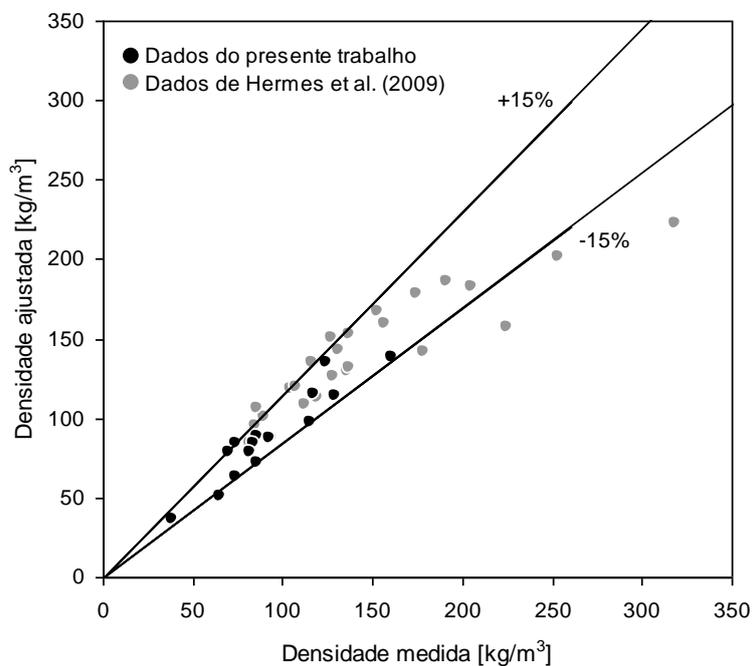


FIGURA 48 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PREVISÕES DA EQ. (48) COM $C=0,0023$ E $N=0,86$ CONTRA OS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NO PRESENTE TRABALHO E OS DADOS DE HERMES ET AL. (2009)

TABELA 17 - SUMÁRIO DOS COEFICIENTES C E N DA EQ. (48)

Base de dados	C	n	# pontos
Presente trabalho	0,0022	-0,76	16
Hermes et al. (2009)	0,0024	-1,5	24
Todos os dados	0,0023	-0,86	40

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo experimental dos processos de crescimento e adensamento de geada em canais formados por placas paralelas isotérmicas. Para tanto, foi projetado e construído um aparato experimental, que consiste em um túnel de vento fechado, capaz de controlar não só a condição do ar na entrada do canal, i.e., temperatura, umidade relativa e velocidade, mas também as temperaturas das superfícies isotérmicas. Um sistema de aquisição de imagens foi empregado para medir a evolução da espessura da geada ao longo dos testes, enquanto uma balança foi empregada, ao final do teste, para medir a massa de geada depositada.

Uma análise teórica foi também apresentada com o intuito de identificar as escalas do problema de crescimento e adensamento da geada. Através da análise de ordem de grandeza das equações governantes, observou-se que tanto a densidade como a espessura da geada variam com a raiz quadrada do tempo. Com base em tais conclusões, foi proposta uma equação evolutiva para a porosidade da geada que deu origem à uma correlação semi-empírica para a densidade, ambas inéditas na literatura aberta.

A partir do aparato experimental, foram realizados 20 ensaios a fim de avaliar tanto os efeitos individuais de parâmetros-chave, tais como temperatura das placas frias e umidade do ar na entrada do canal, quanto os efeitos simultâneos desses parâmetros. A análise experimental comprovou as escalas previstas através da análise teórica, especialmente que $\delta \sim t^{1/2}$ e $\varepsilon \sim t^{1/2}$.

A análise individual dos parâmetros mostrou ainda que a velocidade apresenta um efeito pouco significativo, face aos demais, e nos níveis avaliados, sobre os fenômenos tanto de crescimento como de adensamento da geada, confirmando os resultados experimentais de Piucco (2008), para placas planas, e as previsões numéricas de Loyola (2013), para canais de placas paralelas.

Concluiu-se ainda que há uma relação inversa entre a densidade da geada e o grau de super-resfriamento, nos casos em que este foi diminuindo à

medida que a temperatura da superfície foi aumentada (testes #8 a #10). O comportamento oposto foi observado nos casos em que o grau de super-saturação ω_a foi aumentado para uma temperatura de superfície T_w mantida constante (testes #11 a #13). A explicação reside nas diferenças morfológicas observadas para a geada formada nas diferentes condições de teste, que puderam ser identificadas por inspeção visual das imagens registradas durante os experimentos, bem como com auxílio do mapeamento morfológico apresentado por Kobayashi (1958) (ver Fig. 7).

A análise do experimento fatorial, no qual os fatores foram: umidade do ar na entrada, temperatura do substrato e o espaçamento entre as placas; enquanto as variáveis resposta foram a densidade e a espessura da geada em $t=90$ min, mostrou que a densidade é afetada primordialmente pelos efeitos de 1ª ordem, sendo todos positivos, o que se explica pelas escalas apresentadas na análise teórica (eq. 39). No caso da espessura, observou-se que o efeito de H , bem como os dos termos de alta ordem, sobre a espessura da geada, são desprezíveis face aos efeitos de ω_a e T_w . Enquanto a umidade do ar ω_a mostrou uma influência positiva sobre a espessura, o que se deve à escala $\delta \sim \Delta\omega^{1/2}$ na eq. (38), a temperatura de superfície T_w mostrou uma influência negativa, fruto da escala $\delta \sim \theta^{-1/2}$ na mesma equação. Com isso, observa-se que o experimento fatorial confirmou as previsões da análise de escala tanto para a densidade da geada (eq. 39) como para a sua espessura (eq. 38).

Com base na análise de escalas e nos dados experimentais obtidos no presente trabalho, a seguinte correlação semi-empírica foi proposta para a densidade da geada:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 0,0022\Lambda^{-0,76}\sqrt{t} \quad (49)$$

onde Λ é um parâmetro adimensional que relaciona o grau de super-resfriamento com o grau de super-saturação. A correlação foi projetada tal que $\rho_f \rightarrow 0$ quando $\Lambda \rightarrow \infty$, o que ocorre quando não há transferência de calor latente e, portanto, não há transferência de massa. Quando comparada com os

dados experimentais, a eq. (49) foi capaz de prever aproximadamente 89% dos dados, com erro na faixa de $\pm 15\%$.

A fim de avaliar a generalidade de aplicação da relação funcional proposta na eq. (48), um segundo ajuste foi realizado usando 16 pontos experimentais obtidos no presente trabalho para canais de placas paralelas, além de 24 pontos experimentais obtidos da literatura (Hermes et al., 2009) para placas planas horizontais. O ajuste da eq. (48) contra os 40 pontos da base de dados híbrida, produziu a seguinte correlação:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 0,0023\Lambda^{-0,86}\sqrt{t} \quad (50)$$

A eq. (50), quando comparada com os 40 dados experimentais, foi capaz de prever aproximadamente 91% dos dados com erro na faixa de $\pm 15\%$. Com isso, acredita-se ter obtido uma correlação física confiável para a densidade da geada formada em uma ampla faixa de operação.

5.2 SUGESTÕES

A fim de avançar ainda mais o conhecimento existente acerca dos processo de crescimento e adensamento de geada, as seguintes linhas de investigação são sugeridas para trabalhos futuros:

- Ampliar a base de dados para diferentes condições morfológicas e obter uma correlação generalizada para a densidade da geada;
- Adaptar a bancada para permitir o estudo da formação de geada em outras geometrias, tais como cilindros, feixes tubulares, arranjos tubo-aleta e trocadores de calor amorfos, como os de espuma metálica;
- Adaptar a bancada para medir a condutividade térmica da geada, a fim de propor um modelo mais adequado que aquele atualmente empregado (eq. 6).

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Rio de Janeiro 2003.
- ASHRAE Standard 51, 1999, **Laboratory methods of testing fans for aerodynamic performance rating**, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta-GA, USA.
- 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.
- ELETRONBRAS, **Programa nacional de conservação de energia elétrica**, www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp , 2009.
- FLETCHER, N. H. **Chemical Physics of Ice**. Cambridge, UK. Cambridge University Press, 1970.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 7ª edição, LTC, Rio de Janeiro, 2010.
- HAYASHI, Y. Y. et al. K. 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. 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.
- HERMES, C. J. L.; MELO, C; KNABBEN, F. **Algebraic solution of capillary tube flows. Part II: Capillary tube suction line heat exchangers**, **Applied Thermal Engineering**, V. 30, p. 770-775, Issues 6–7, May 2010.

- 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.
- HOBBS, P. V. **Ice Physics**. Oxford, UK: Clarendon Press, 1974.
- 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.
- 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.
- KOBAYASHI, T., 1958. On the habit of snow crystals artificially produced at low pressures. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, Japan, v. 36, p. 193-208.
- 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'l. 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.
- LIENHARD IV JH, LIENHARD V JH, 2003, **A heat transfer textbook**, 4th ed., Dover, Mineola, USA.
- 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.
- LIU, Z. et al. An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface by use of an anti-frosting paint. Part I. Anti-frosting performance and comparison with uncoated metallic surface. **International Journal of Refrigeration**, USA, v. 29, p. 229 – 236. 2005a.

- LIU, Z. et al. An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface by use of an anti-frosting paint. PartII. Long-term performance, frost layer observation and mechanism analysis. **International Journal of Refrigeration**, USA, v. 29, p. 237 – 242. 2005b.
- LOYOLA, F. R. Modelo generalizado para formação de geada em placas planas e canais de placas paralelas. 2013. 110 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- 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; 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.
- MONTGOMERY, DOUGLAS C.; RUNGER, GEORGE C. Estatística Aplicada para engenheiros, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- MOTIC, 2013, *Motic Images Plus 2,0ML*, MOTIC CHINA GROUP CO., LTD.
- 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. 2004.
- NI, 2011, National Instruments' Labview Professional Development System, ni.com/labview.
- PIUCCO, R. O. et al. Study of frost nucleation on flat surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, n. 8, p. 1710-1715, Sept. 2008.
- RADERMACHER, R.; KIM, K. **Domestic refrigerators: recent developments**. International Journal of Refrigeration, v. 19, n. 1, p. 61-69, Jan. 1996.
- 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.
- SILVA DL, 2012. **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.

- STOREY B.D.; JACOBI A.M., W. F. The effect of streamwise vortices on the growth rate in developing laminar channel flows. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 42 (1999) 3787-3802.
- 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.
- 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.
- YANG, D. K.; LEE, K. S, Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate. s. **International Journal of Refrigeration**, v. 27, p. 86-96, 2004.

APÊNDICE I - CARGA TÉRMICA

A carga térmica da bancada foi estimada através da seguinte equação:

$$Q = \frac{T_e - T_i}{R_t}$$

onde assumiu-se o ar externo a 20°C e o ar interno a -25°C. A resistência térmica total é dada por:

$$R_t = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{L_{rev}}{k_{rev} A_i} + \frac{L_{iso}}{k_{iso} A_m} + \frac{L_{rev}}{k_{rev} A_e} + \frac{1}{h_e A_e}$$

onde considerou-se convecção natural com 2 W/m²K no lado externo e convecção forçada com 12 W/m²K no lado interno. Os revestimentos interno e externo são feitos em chapa de aço, com k=50 W/mK e com 2 mm de espessura, enquanto o isolamento é feito por chapas de EPS com k=0,03 W/mK. As áreas interna e externa são respectivamente 4,5 m² e 5,9 m².

De posse dessas informações, foi possível estabelecer graficamente a relação funcional entre a carga térmica e diferentes espessuras de isolamento, como mostrado na figura a seguir.

A fim de manter a capacidade de refrigeração dentro dos limites operacionais da unidade condensadora (~115 W) para a faixa de operação desejada (temperatura de evaporação em torno de -35°C e temperatura de condensação em torno de 40°C), uma espessura de 50 mm foi selecionada, o que corresponde a uma carga térmica de 105 W, ou seja, 90% da capacidade da unidade condensadora na condição de operação.

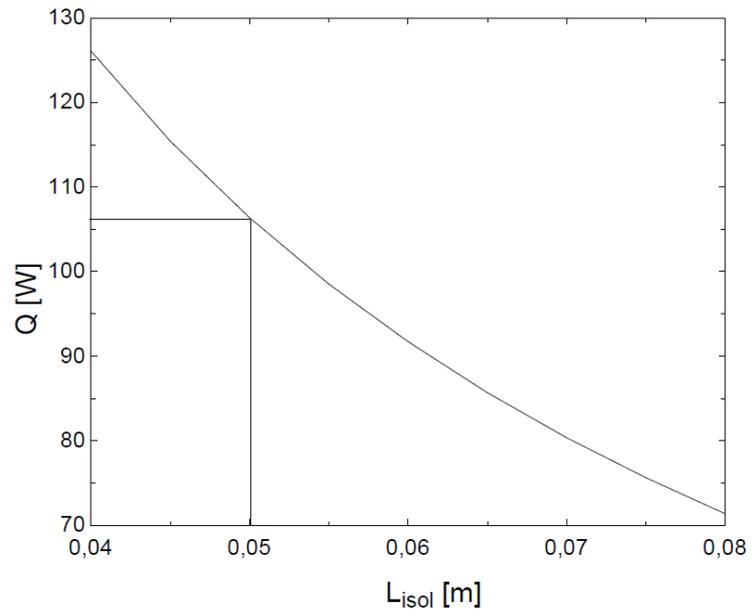


FIGURA 49 - RELAÇÃO ENTRE CARGA TÉRMICA E ESPESSURA DE ISOLAMENTO

APÊNDICE II - SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

O resfriamento do ar na bancada foi realizado através de um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor construído no Laboratório de Termodinâmica e Termofísica. O sistema é composto por 5 componentes, associados em ciclo da seguinte forma: compressor \Rightarrow condensador \Rightarrow trocador de calor interno \Rightarrow evaporador \Rightarrow trocador de calor interno \Rightarrow compressor, como mostra a figura a seguir.

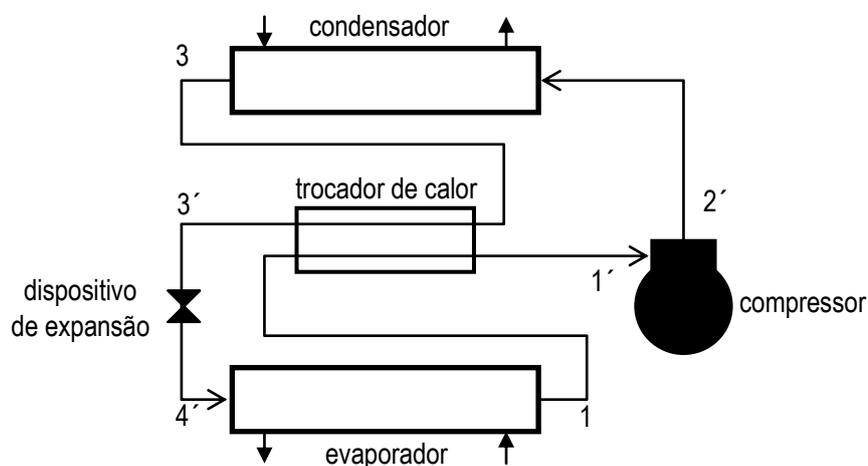


FIGURA 50 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO CONSTRUIDO

O sistema construído consiste numa unidade condensadora, que contempla um condensador do tipo tubo-aleta e um compressor Embraco FGS100HLR 220V/60Hz. A unidade condensadora possui uma capacidade de refrigeração de aproximadamente 115W para uma temperatura de evaporação de -35°C e uma temperatura de condensação de 40°C , sendo essas as condições de operação aproximadas para utilização na bancada. O refrigerante R134a foi empregado.

Um forçador de ar foi selecionado dentre os modelos disponíveis no mercado para ser empregado como evaporador em virtude do seu elevado espaçamento de aletas, em comparação com os evaporadores tubo-aleta convencionais, a fim de evitar o bloqueio deste componente pela formação de

geada. Optou-se por um trocador de calor área de aleta em torno de 1 m^2 e espaçamento entre aletas em torno de 10 mm. O evaporador selecionado consta na figura a seguir, onde se observa a intensa formação de geada nas aletas.

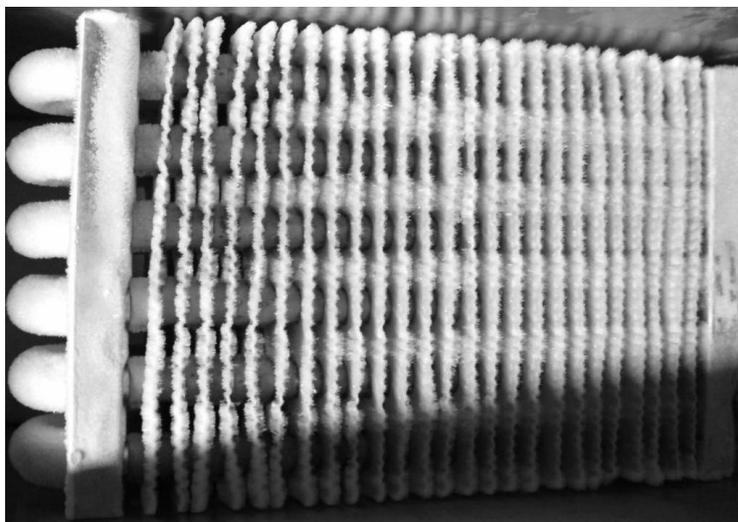


FIGURA 51 - EVAPORADOR EMPREGADO NA BANCADA (COM DEPOSIÇÃO DE GEADA)

A linha de sucção e o tubo capilar foram dimensionados segundo a metodologia proposta por Hermes et al. (2010). A linha de sucção foi amarrada ao tubo capilar através de fita alumínio. O arranjo foi isolado do ambiente com isotubos de 20 mm de diâmetro externo e 10 mm de diâmetro interno.

APÊNDICE III - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE AR

A vazão de ar foi calculada seguindo as recomendações da norma ASHRAE 51 (1999), como mostra a figura a seguir, em que a vazão, \dot{V} , é calculada como função da diferença de pressão medida pelo transdutor diferencial de pressão com tomadas situadas antes e depois do bocal, Δp [Pa], da pressão atmosférica, p_{atm} , da densidade, ρ_a [kg/m³], e viscosidade, μ_a [Pa s], do ar no interior da bancada, do diâmetro hidráulico da seção, D_h [m], o diâmetro do bocal, d [mm], da área do bocal, A_{bc} [m²], da relação de contração do bocal, β_b , do coeficiente de descarga, C_d , do coeficiente de expansão dos bocais, Y , a relação de pressão, α_p , e o número de Reynolds, Re .

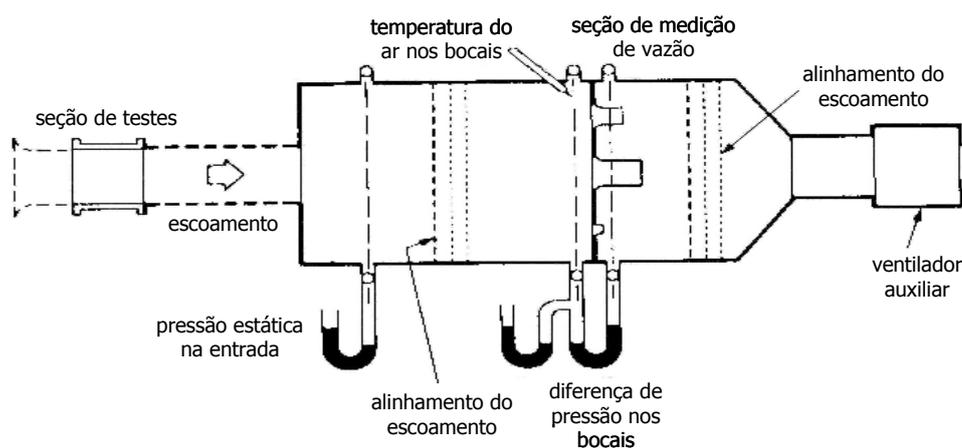


FIGURA 52 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO DA VAZÃO DE AR EM TÚNEL DE VENTO (ASHRAE 51, 1999)

O cálculo da vazão é um processo iterativo obtido através das seguintes equações (ASHRAE 51, 1999):

$$\dot{V} = 3600 C_d A_{bc} Y \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_a (1 - \beta_b^4)}}$$

onde

$$\beta_b = \frac{d}{D_h}$$

$$C_d = 0,9986 - \frac{7,006}{\sqrt{Re}} + \frac{134,6}{Re}$$

$$Y = 1 - (0,548 + 0,71\beta^4)(1 - \alpha_p)$$

$$\alpha_p = \frac{p_{atm}}{p_{atm} + \Delta p}$$

$$Re = \frac{1097}{60\mu_a} C_d d Y \sqrt{\rho_a \Delta p}$$

Para escolha do transdutor diferencial de pressão, diversas configurações de transdutores e bocais foram analisadas. A tabela a seguir expressa as análises com a incerteza de medição obtidas a partir dois transdutores de pressão distintos, um com faixa de operação de 0-124 Pa e erro de 0,25% sobre o fundo de escala, e outro com faixa de 0-249 Pa e erro de 0,50% sobre o fundo de escala. Adicionalmente, foram analisados três bocais de diâmetro diferentes. Optou-se pelo bocal de ½ polegada.

TABELA 18 - COMPARATIVO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA DOIS TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Vazões [m ³ /h]	Δp (@8,2°C)	Incerteza %		Bocal
		124Pa	249Pa	
1,3716	17,016	0,554	2,151	¼ inch
2,7432	66,931	0,195	0,561	
3,4290	104,147	0,164	0,375	
5,4864	23,710	0,392	1,536	½ inch
6,8580	36,889	0,260	0,988	
10,9728	20,991	0,437	1,732	1 inch
13,7160	32,678	0,285	1,112	
21,9456	83,130	0,126	0,440	

APÊNDICE IV - COMPRIMENTO DE ENTRADA

O comprimento de entrada necessário para obter um escoamento completamente desenvolvido antes da seção de testes pode ser estimado a partir da seguinte expressão (Fox et al., 2006):

$$\frac{L_{ent}}{D_h} = 1,36 Re_{D_h}^{1/4}$$

onde Re_{D_h} é o número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico, D_h :

$$Re_{D_h} = \frac{\rho_a v_a D_h}{\mu_a}$$

o diâmetro hidráulico é dado por:

$$D_h = \frac{2HW}{H + W}$$

As análises foram realizadas para as condições de operação mais adversas, com velocidade média do escoamento de 2 m/s e espaçamento de canal de 20 mm, quando se obteve $Re \approx 5000$ que implica em $L_{ent} \approx 0,35$ m. Na bancada, empregou-se $L_{ent} \approx 0,65$ m, tal que a condição de escoamento plenamente desenvolvido foi obtida.

APÊNDICE V - CÁLCULO DE INCERTEZAS

Os cálculos de incerteza de medição levam em conta dois tipos de erro experimental. Enquanto a incerteza do tipo B expressa, por u_{sm} , é baseada na incerteza padrão do sistema de medição, a incerteza do tipo A, expressa por u_{ob} , é baseada na incerteza padrão das observações. A incerteza total, u_t , é obtida através da seguinte expressão (ABNT, INMETRO, 2003):

$$u_t = \sqrt{u_{sm}^2 + u_{ob}^2}$$

Temperatura

A incerteza do termopar, tipo B, é 0,2 K e segue uma distribuição normal (divisor 2), de modo que $u_T = 0,1$ K. A incerteza da junta de referência é 0,15 K e segue uma distribuição retangular (divisor $\sqrt{3}$), de modo que $u_j = 0,0867$ K. A incerteza tipo A é $u_{ob} = 0,12$ K, tal que a incerteza combinada é $u_T = 0,18$ K.

Umidade Relativa

A incerteza do transdutor de umidade, tipo B, é 1,7 % e segue uma distribuição retangular (divisor $\sqrt{3}$), de modo que $u_{UR} = 0,98$ %. A incerteza tipo A é $u_{ob} = 0,6$ %, tal que a incerteza combinada é $u_{UR} = 1,15$ %.

Diferencial de Pressão

A incerteza do transdutor de pressão diferencial, tipo B, é 0,02 Pa e segue uma distribuição retangular (divisor $\sqrt{3}$), de modo que $u_{\Delta p} = 0,18$ Pa. A incerteza tipo A é $u_{ob} = 0,02$ Pa, tal que a incerteza combinada é $u_{\Delta p} = 0,18$ Pa.

Balança

A incerteza da balança, tipo B, é 0,01 g e segue uma distribuição retangular (divisor $\sqrt{3}$), de modo que $u_m = 5,8 \times 10^{-3}$ g. A incerteza tipo A é $u_{ob} = 0,05$ g, tal que a incerteza combinada é $u_M = 0,0503$ g.

Espessura

A incerteza da balança, tipo B, é 0,05 mm e segue uma distribuição retangular (divisor $\sqrt{3}$), de modo que $u_M = 0,029$ mm. A incerteza tipo A é $u_{ob} = 0,1$ mm, tal que a incerteza combinada é $u_\delta = 0,104$ mm.

Densidade

A densidade da geada é calculada de forma indireta, através das medidas efetuadas na balança e das imagens observadas através do estereomicroscópio, tal que $\rho_f = f(M, \delta)$. A incerteza propagada, u_{ρ_f} , é dada por:

$$u_{\rho_f} = \sqrt{\left(\frac{d\rho_f}{dM} u_M\right)^2 + \left(\frac{d\rho_f}{d\delta} u_\delta\right)^2}$$

Estimando-se uma espessura máxima da geada de 10 mm, massa de 2 gramas, para o canal com $W=60$ mm e $L=40$ mm, tem-se que:

$$\frac{d\rho_f}{dM} u_M = \frac{4,19 \times 5,03 \cdot 10^{-2}}{1,006 \cdot 10^{-1}} = 2,095$$

$$\frac{d\rho_f}{d\delta} u_\delta = \frac{1,73 \times 0,104}{0,208} = 0,865$$

Logo, a incerteza propagada para essa condição extrema é dada por:

$$u_{\rho_f} = \sqrt{(0,865)^2 + (0,835)^2} = 2,26 \text{ kg/m}^3$$

APÊNDICE VI - MATRIZ DE DADOS

H - 10mm		Teste 1					
Cond. Bocal	$T_{bc}=7,6(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=0,8(^{\circ}\text{C}); \phi=53,6(\%); \Delta P=(48,8\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,3(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,7(^{\circ}\text{C}); T_a=2,6(^{\circ}\text{C}); v=1,8(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ϵ	Massa (g)
0min	9,86	9,93	9,90	0,00			
30min	5,26	5,31	5,28	4,61	38,85	0,96	0,43
60min							
90 min							
120 min							

H - 10mm		Teste 2					
Cond. Bocal	$T_{bc}=7,1(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=0,6(^{\circ}\text{C}); \phi =51,6(\%); \Delta P=(52,3\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,3(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,8(^{\circ}\text{C}); T_a=2,7(^{\circ}\text{C}); v=1,9(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ϵ	Massa (g)
0min	9,12	9,20	9,16	0,00			
30min	5,26	5,26	5,26	3,90	39,10	0,96	
60min	3,39	3,50	3,44	5,72	64,88	0,93	0,89
90 min							
120 min							

H - 10mm		Teste 3					
Cond. Bocal	$T_{bc}=8(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=0,8(^{\circ}\text{C}); \phi =59,2(\%); \Delta P=(50,6\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,3(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,8(^{\circ}\text{C}); T_a=2,8(^{\circ}\text{C}); v=1,8(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ϵ	Massa (g)
0min	9,13	9,17	9,15	0,00			
30min	4,75	4,79	4,77	4,38	38,47	0,96	
60min	2,99	3,01	3,00	6,15	64,65	0,93	
90 min	1,73	1,75	1,74	7,41	74,20	0,92	1,32
120 min							

H - 10mm	Teste 4						
Cond. Bocal	$T_{bc}=7,7(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=0,7(^{\circ}\text{C}); \phi =49,9(\%); \Delta P=(47,6\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,2(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,7(^{\circ}\text{C}); T_a=2,5(^{\circ}\text{C}); v=1,8(\text{m s}^{-1})$						
	Dist.min. (mm)	Dist.max. (mm)	Dist.med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	8,78	8,81	8,80	0,00			
30min	5,13	5,17	5,15	3,65	41,57	0,96	
60min	3,66	3,74	3,70	5,10	67,11	0,93	
90 min	2,33	2,46	2,40	6,40	81,52	0,91	
120 min	1,09	1,33	1,21	7,59	85,67	0,91	1,56

H - 10mm	Teste 5						
Cond. Bocal	$T_{bc}=9,7(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=3,7(^{\circ}\text{C}); \phi =50,6(\%); \Delta P=(23,5\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,8(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-20,2(^{\circ}\text{C}); T_a=5(^{\circ}\text{C}); v=1,26(\text{m s}^{-1})$						
	Dist.min. (mm)	Dist.max. (mm)	Dist.med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	8,65	8,69	8,67	0,00			
30min	4,94	5,00	4,97	3,71	53,81	0,94	
60min	3,39	3,50	3,44	5,23	81,83	0,91	
90 min	2,07	2,23	2,15	6,52	91,48	0,90	
120 min	0,96	1,08	1,02	7,65	93,65	0,90	1,72

H - 10mm	Teste 6						
Cond. Bocal	$T_{bc}=10,4(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=3,5(^{\circ}\text{C}); \phi =50,8(\%); \Delta P=(29,6\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,8(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-20(^{\circ}\text{C}); T_a=5,1(^{\circ}\text{C}); v=1,42(\text{m s}^{-1})$						
	Dist.min. (mm)	Dist.max. (mm)	Dist.med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	8,90	8,96	8,93	0,00			
30min	4,86	4,92	4,89	4,03	46,26	0,95	
60min	3,16	3,23	3,20	5,73	68,92	0,93	
90 min	1,88	2,01	1,94	6,98	83,00	0,91	
120 min	0,71	0,89	0,80	8,13	86,14	0,91	1,68

H - 10mm	Teste 7						
Cond. Bocal	$T_{bc}=9(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=2,7(^{\circ}\text{C}); \phi =52,7(\%); \Delta P=(46,1\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,7(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-19,9(^{\circ}\text{C}); T_a=4,6(^{\circ}\text{C}); v=1,78(\text{m s}^{-1})$						
	Dist.min. (mm)	Dist.max. (mm)	Dist.med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	8,93	8,94	8,93	0,00			
30min	5,10	5,17	5,13	3,80	43,59	0,95	
60min	3,39	3,54	3,47	5,47	72,70	0,92	
90 min	2,21	2,23	2,22	6,71	90,41	0,90	
120 min	1,06	1,08	1,07	7,86	92,19	0,90	1,74

H - 10mm	Teste 8						
Cond. Bocal	$T_{bc}=1,7(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=-8,1(^{\circ}\text{C}); \phi =32,9(\%); \Delta P=(51,9\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=1,1(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-30,3(^{\circ}\text{C}); T_a=-6,1(^{\circ}\text{C}); v=1,86(\text{m s}^{-1})$						
	Dist.min. (mm)	Dist.max. (mm)	Dist.med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	9,31	9,32	9,31	0,00			
30min	7,98	8,04	8,01	1,30	51,56	0,95	
60min	7,15	7,25	7,20	2,11	62,70	0,93	
90 min	6,61	6,71	6,66	2,65	73,82	0,92	
120 min	6,16	6,29	6,23	3,09	83,67	0,91	0,62

H - 10mm	Teste 9						
Cond. Bocal	$T_{bc}=2,9(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=6,2(^{\circ}\text{C}); \phi =32,2(\%); \Delta P=(47,2\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=1,1(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-25(^{\circ}\text{C}); T_a=-5(^{\circ}\text{C}); v=1,91(\text{m s}^{-1})$						
	Dist.min. (mm)	Dist.max. (mm)	Dist.med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	9,31	9,34	9,33	0,00			
30min	8,59	8,63	8,61	0,71	79,38	0,91	
60min	7,91	8,04	7,97	1,35	83,76	0,91	
90 min	7,77	7,87	7,82	1,51	111,40	0,88	
120 min	7,54	7,64	7,59	1,73	127,40	0,86	0,53

H - 10mm	Teste 10						
Cond. Bocal	$T_{bc}=0,8(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=-6,5(^{\circ}\text{C}); \phi =34,7(\%); \Delta P=(52,4\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=1,1(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-20,3(^{\circ}\text{C}); T_a=-6(^{\circ}\text{C}); v=1,86(\text{m s}^{-1})$						
	Dist.min. (mm)	Dist.max. (mm)	Dist.med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	9,19	9,26	9,23	0,00			
30min	8,78	8,81	8,80	0,43	160,94	0,83	
60min	8,59	8,64	8,61	0,61	218,40	0,76	
90 min	8,42	8,49	8,45	0,77	255,53	0,72	
120 min	8,18	8,26	8,22	1,00	257,10	0,72	0,23

H - 10mm	Teste 11						
Cond. Bocal	$T_{bc}=12,3(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=10,3(^{\circ}\text{C}); \phi =71(\%); \Delta P=(21,3\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=8,4(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,7(^{\circ}\text{C}); T_a=15,9(^{\circ}\text{C}); v=1,21(\text{m s}^{-1})$						
	Dist.min. (mm)	Dist.max. (mm)	Dist.med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	8,42	8,46	8,44	0,00			
30min	2,92	3,13	3,02	5,42	74,01	0,92	
60min	0,52	0,62	0,57	7,87	84,20	0,91	1,59
90 min							
120 min							

H - 10mm	Teste 12						
Cond. Bocal	$T_{bc}=11,5(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=7,1(^{\circ}\text{C}); \phi =60,9(\%); \Delta P=(23,6\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=5,7(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,5(^{\circ}\text{C}); T_a=10,6(^{\circ}\text{C}); v=1,3(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	8,74	8,87	8,80	0,00			
30min	5,55	3,64	4,60	4,21	42,43	0,93	
60min	1,37	1,41	1,39	7,41	60,00	0,93	
90 min	0,29	0,36	0,33	8,48	73,48	0,92	1,53
120 min							

H - 10mm	Teste 13						
Cond. Bocal	$T_{bc}=10,1(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=3,3(^{\circ}\text{C}); \phi =51,1(\%); \Delta P=(24,3\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,8(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,8(^{\circ}\text{C}); T_a=4,9(^{\circ}\text{C}); v=1,29(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	8,64	8,69	8,67	0,00			
30min	4,69	4,76	4,73	3,94	46,27	0,95	
60min	2,87	2,91	2,89	5,77	62,65	0,93	
90 min	1,41	1,49	1,45	7,22	68,56	0,93	
120 min	0,61	0,70	0,66	8,01	69,71	0,93	1,34

H - 10mm	Teste 14						
Cond. Bocal	$T_{bc}=12,8(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=8,2(^{\circ}\text{C}); \phi =59,6(\%); \Delta P=(22,1\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=5,7(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-10,2(^{\circ}\text{C}); T_a=10,7(^{\circ}\text{C}); v=1,2(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	10,50	10,61	10,56	0,00			
30min	7,50	7,61	7,56	3,00	45,63	0,95	
60min	5,95	6,18	6,06	4,49	72,79	0,92	
90 min	4,53	4,66	4,60	5,96	101,66	0,89	
120 min	3,52	3,56	3,54	7,02	124,12	0,87	2,09

H - 10mm	Teste 15						
Cond. Bocal	$T_{bc}=12,8(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=8,2(^{\circ}\text{C}); \phi =59,6(\%); \Delta P=(22,1\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=5,7(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-10,2(^{\circ}\text{C}); T_a=10,7(^{\circ}\text{C}); v=1,2(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	9,48	9,52	9,50	0,00			
30min	8,32	8,49	8,40	1,10	105,27	0,89	
60min	7,09	7,24	7,17	2,34	102,19	0,89	
90 min	5,93	5,96	5,94	3,56	105,30	0,89	
120 min	5,00	5,04	5,02	4,49	117,05	0,87	1,26

H - 20mm	Teste 16						
Cond. Bocal	$T_{bc}=11,9(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=10(^{\circ}\text{C}); \phi =64,9(\%); \Delta P=(54\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=5,8(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,5(^{\circ}\text{C}); T_a=11,7(^{\circ}\text{C}); v=1(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	18,65	18,69	18,67	0,00			
30min	13,50	13,40	13,45	5,22	43,59	0,95	
60min	11,52	11,69	11,60	7,06	67,54	0,93	
90 min	10,31	10,33	10,32	8,34	90,35	0,90	
120 min	9,40	9,44	9,42	9,25	115,32	0,88	2,56

H - 20mm	Teste 17						
Cond. Bocal	$T_{bc}=8,1(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=4,6(^{\circ}\text{C}); \phi =58,5(\%); \Delta P=(54,7\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,8(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-24,8(^{\circ}\text{C}); T_a=6(^{\circ}\text{C}); v=1(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	18,56	18,67	18,61	0,00			
30min	14,50	14,60	14,55	4,06	37,41	0,96	
60min	12,69	12,75	12,72	5,90	49,19	0,95	
90 min	11,52	11,56	11,54	7,07	65,29	0,93	
120 min	10,60	10,66	10,63	7,98	81,41	0,91	1,56

H - 20mm	Teste 18						
Cond. Bocal	$T_{bc}=13,2(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=10,8(^{\circ}\text{C}); \phi =63,4(\%); \Delta P=(49\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=6(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-10,3(^{\circ}\text{C}); T_a=11,8(^{\circ}\text{C}); v=0,9(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	18,71	18,50	18,60	0,00			
30min	15,67	15,79	15,73	2,87	83,07	0,91	
60min	14,46	14,48	14,47	4,14	106,11	0,89	
90 min	13,27	13,27	13,27	5,33	125,68	0,86	
120 min	12,60	12,85	12,73	5,87	160,99	0,83	2,27

H - 20mm	Teste 19						
Cond. Bocal	$T_{bc}=7,9(^{\circ}\text{C}); T_{tu}=5(^{\circ}\text{C}); \phi =58,3(\%); \Delta P=(54,7\text{Pa})$						
Cond. Teste	$\omega_a=3,7(\text{g}_v \text{Kg}_a^{-1}); T_w=-10,3(^{\circ}\text{C}); T_a=5,7(^{\circ}\text{C}); v=1(\text{m s}^{-1})$						
	Dist .min. (mm)	Dist .max. (mm)	Dist .med. (mm)	$\delta_{sup} + \delta_{inf}$ (mm)	ρ (Kg/m ³)	ε	Massa (g)
0min	18,96	18,93	18,99	0,00			
30min	17,54	17,58	17,56	1,44	127,35	0,86	
60min	16,75	16,80	16,74	2,26	141,02	0,85	
90 min	15,70	15,85	15,77	3,22	136,38	0,85	
120 min	14,98	15,13	15,05	3,94	129,26	0,86	1,36

