



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
POLO LABORATÓRIOS DE PESQUISA EM REFRIGERAÇÃO E TERMOFÍSICA

Aluno: Gabriel L. Podgaietsky
Orientador: Prof. Christian J. L. Hermes, Dr. Eng.

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO CRESCIMENTO E ADENSAMENTO DA GEADA
FORMADA EM CONDIÇÕES TÍPICAS DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS

Florianópolis, SC, Brasil

2026

Gabriel Longen Podgaietsky

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO CRESCIMENTO E ADENSAMENTO DA GEADA
FORMADA EM CONDIÇÕES TÍPICAS DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Christian J. L. Hermes, Dr. Eng.

Florianópolis, SC, Brasil

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

	Longen Podgaietsky, Gabriel AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO CRESCIMENTO E ADENSAMENTO DA GEADA FORMADA EM CONDIÇÕES TÍPICAS DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS /Gabriel Longen Podgaietsky ; orientador, Christian Johann Losso Hermes, 2026. 115 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2026. Inclui referências. 1. Engenharia Mecânica. 2. Transferência de massa. 3. Termodinâmica. 4. Mecânica dos fluidos. 5. Formação de geada. I. Johann Losso Hermes, Christian. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.	
--	--	--

Gabriel Longen Podgaietsky

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO CRESCIMENTO E ADENSAMENTO DA GEADA FORMADA EM CONDIÇÕES TÍPICAS DE REFRIGERADORES DOMÉSTICOS

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado, em 19 de dezembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

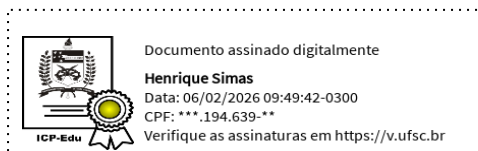
Prof. Christian Johann Losso Hermes (Presidente), Dr. Eng., UFSC

Prof. Diogo Lôndero da Silva, Dr. Eng., UFSC

Prof. Felipe Rezende de Loyola, Dr. Eng., UFPR

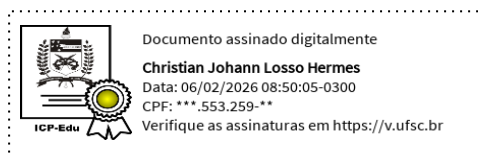
Prof. Alexandre Kupka da Silva, PhD. Eng., UFSC

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, especialidade Engenharia Mecânica, área de concentração Engenharia e Ciências Térmicas.



Coordenador do Curso

Prof. Henrique Simas, Dr. Eng.



Orientador

Prof. Christian Johann Losso Hermes, Dr. Eng.

Florianópolis, SC, Brasil

2026

AGRADECIMENTOS

Início agradecendo ao povo brasileiro, que através do governo federal, financiou parcialmente meus estudos de mestrado.

Agradeço à *Whirlpool Corporation* pelo compartilhamento de informações e de recursos, em especial ao Eng. Rodrigues Stahelin.

Particularmente agradeço a todos que trabalharam juntamente comigo na construção da bancada e execução de testes experimentais. Aos engenheiros Rodrigo Reis e Luiz Braun, aos alunos Lucas Fonseca, Paulo Meller, João Vitor Schwaemmler, Daniel Zanol, Bruno Pereira, Igor Alves, Guilherme Schappo e Plínio Henrique, e aos técnicos Diego Rios, Jorge Lubas e Jean Backer.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Agradeço sobretudo ao Prof. Christian Johann Losso Hermes e ao Dr. Alexsandro dos Santos Silveira pela oportunidade de executar esse trabalho, estrutura oferecida, confiança empregada, e excelência na orientação, não só nesse trabalho, mas ao longo de toda a minha vida acadêmica.

Finalizo encaminhando especiais agradecimentos à minha namorada Marina Zimmermann Köhntopp e aos meus pais Sarajane Longen e Ademar Podgaietsky.

Diversos outros profissionais, colegas, familiares e amigos deram suas contribuições a este trabalho. A eles, que sabem a quem me refiro, muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho aborda a avaliação experimental do crescimento e adensamento da geada em canais de placas paralelas, focando especificamente nas condições de operação de refrigeradores domésticos. Uma revisão da literatura revelou que as correlações existentes para a densidade da geada, quando extrapoladas para tais condições, apresentam divergências, com previsões de espessura variando em até 100 vezes entre si. Para preencher esta lacuna, foi projetado e construído um aparato experimental (túnel de vento vertical) capaz de controlar velocidade, temperatura e umidade do ar, além da temperatura da superfície de teste. A massa de geada foi determinada por balanços no ar a partir de medições psicrométricas na entrada e saída da seção de teste, e a espessura foi medida por um sistema de visualização com câmera e processamento de imagem. Foram realizados 46 testes experimentais que permitiram caracterizar os efeitos sobre a espessura, massa e densidade da geada, dos parâmetros operacionais: diferença de umidade absoluta ($\Delta\omega$); temperatura de superfície (T_w); sobretemperatura (OT); velocidade do ar (u); distância entre superfícies (F_p); e tempo de formação (t). Esta correlação demonstrou o melhor desempenho entre todos os modelos recentes da literatura avaliados, prevendo 98% dos dados experimentais dentro de uma margem de erro de 20%. Finalmente, o estudo avaliou modelos físicos de formação de geada. O modelo algébrico de Hermes (2012), que utiliza a temperatura da superfície da geada (T_f) como entrada para a densidade, apresentou a melhor concordância geral com os dados, com 95% dos pontos dentro de uma margem de 20%, tanto para massa quanto para espessura. Foi verificado também que o modelo de Hermes (2012) é capaz de prever a variação de espessura ao longo do canal devido ao processo natural de desumidificação do ar. Um novo modelo baseado na correlação de densidade proposta neste trabalho, também foi desenvolvido e mostrou-se uma alternativa para simulações de baixo custo computacional e fácil implementação.

ABSTRACT

This work addresses the experimental evaluation of frost growth and densification in parallel plate channels, focusing specifically on the operating conditions typical of household evaporator coils. A literature review revealed that existing correlations for frost density, when extrapolated to such conditions, exhibit discrepancies, with thickness predictions varying by up to 100 times among them. To fill this gap, an experimental apparatus (vertical wind tunnel) was designed and built, capable of controlling air velocity, temperature, and humidity, in addition to the test surface temperature. The frost mass was determined by air-side mass balances from psychrometric measurements at the inlet and outlet of the test section, and the thickness was measured by a visualization system with a camera and image processing. 46 experimental tests were carried out, which allowed characterizing the effects on frost thickness, mass, and density, of the operational parameters: absolute humidity difference ($\Delta\omega$); surface temperature (T_w); overtemperature (OT); air velocity (u); distance between surfaces (F_p); and formation time (t). Based on these measurements, a new semi-empirical correlation for frost density was derived. This correlation demonstrated the best performance among all recent literature models evaluated, predicting 98% of the experimental data within a 20% error margin. Finally, the study evaluated physical models of frost formation. Hermes (2012) algebraic model, which uses the frost surface temperature (T_f) as input for density, showed the best overall agreement with the data, with 95% of the points within a 20% margin, for both mass and thickness. It was also verified that Hermes (2012) model can predict the variation of thickness along the channel due to the natural air dehumidification process. A new model based on the density correlation proposed in this work was also developed and proved to be an alternative for low computational cost and easy implementation simulations.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VI
ABSTRACT.....	VII
SUMÁRIO	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
NOMENCLATURA.....	XIII
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 FORMAÇÃO DE GELO E GEADA	17
1.2 MORFOLOGIA DA GEADA.....	20
1.3 CRESCIMENTO DA GEADA	24
1.4 DENSIDADE DA GEADA.....	26
1.4.1 Correlações baseadas em T_f	27
1.4.2 Correlações com $\sqrt[2]{t}$	28
1.4.3 Correlações com t^n ($n \neq 0,5$)	29
1.4.4 Região de validade das correlações.....	31
1.4.5 Análise quantitativa das correlações.....	34
1.5 ESPESSURA DA GEADA	37
1.5.1 Modelo de Piucco (2008).....	37
1.5.2 Modelo de Hermes (2012)	39
1.5.3 Modelo de Loyola et al. (2014).....	40
1.5.4 Modelo de Hermes et al. (2018).....	41
1.5.5 Modelo de Hollon et al. (2023)	42
1.6 IMPACTO DAS PROPRIEDADES DA GEADA EM SUA ESPESSURA.....	43
1.7 OBJETIVOS E METODOLOGIA	45
1.8 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	46
2 TRABALHO EXPERIMENTAL.....	48
2.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	48
2.1.1 Controle da vazão de ar.....	49
2.1.2 Condicionamento do fluxo de ar	49
2.1.3 Medição da vazão de ar	50
2.1.4 Isolamento da seção de testes	50

2.1.5	<i>Condicionamento psicrométrico</i>	50
2.1.6	<i>Medição do estado psicrométrico</i>	51
2.1.7	<i>Secagem da seção</i>	52
2.1.8	<i>Superfície de formação de geada</i>	52
2.1.9	<i>Condicionamento da superfície de formação de geada</i>	53
2.1.10	<i>Medição da espessura de geada</i>	54
2.2	MATRIZ DE TESTES	57
2.3	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA BANCADA	61
2.3.1	<i>Controle dos parâmetros</i>	61
2.3.2	<i>Repetibilidade</i>	62
2.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO	64
3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	65
3.1	EFEITO DOS PARÂMETROS SOBRE A GEADA.....	65
3.1.1	<i>Efeito de $\Delta\omega$ e ΔT_s</i>	65
3.1.2	<i>Efeito da sobretemperatura</i>	67
3.1.3	<i>Efeito da velocidade</i>	69
3.1.4	<i>Efeito da distância entre placas</i>	72
3.1.5	<i>Efeito do tempo</i>	75
3.2	SÍNTESE DO CAPÍTULO	80
4	MODELOS PARA FORMAÇÃO DE GEADA.....	82
4.1	CORRELAÇÕES PARA DENSIDADE	82
4.1.1	<i>Correlação proposta</i>	83
4.1.2	<i>Avaliação das correlações</i>	85
4.1.3	<i>Avaliação das tendências da correlação proposta</i>	88
4.2	MODELOS PARA A ESPESSURA DA GEADA.....	90
4.2.1	<i>Modelo proposto</i>	90
4.2.2	<i>Avaliação dos modelos</i>	91
4.2.3	<i>Modelagem da variação de espessura da geada</i>	95
4.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	97
5	CONCLUSÕES	99
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	100
6	REFERÊNCIAS.....	101
	APÊNDICE I – SUBSISTEMAS DE POTÊNCIA E DE CONTROLE.	106
	APÊNDICE II – ANÁLISE DE INCERTEZAS	112

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - GEADA FORMADA NA SUPERFÍCIE DE UM EVAPORADOR (DA SILVA, 2012).....	17
FIGURA 2 - GELO (A) E GEADA (B) (NEGRELLI, 2016).....	18
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE FASES DA ÁGUA (NEGRELLI, 2016).....	18
FIGURA 4 - FORMAÇÃO DA GEADA NA CARTA PSICROMÉTRICA, ADAPTADO DE PIUCCO (2008)	19
FIGURA 5 – DIAGRAMA DE NAKAYA ORIGINAL (TRADUZIDO) (NAKAYA, 1954)	21
FIGURA 6 – DIAGRAMA DE KOBAYASHI (ADAPTADO) (KOBAYASHI, 1961).....	22
FIGURA 7 – VELOCIDADE DO CRESCIMENTO DE CRISTAIS DE GELO (SHIBKOV, 2002).....	23
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO (ADAPTADO DE HERMES, 2012)	25
FIGURA 9 – INTERVALO DE VALIDADE PARA CADA CORRELAÇÃO DE DENSIDADE DA GEADA	32
FIGURA 10 – REGIÃO ATENDIDA POR CADA CORRELAÇÃO DE DENSIDADE, CLASSES Tf E T.....	33
FIGURA 11 – REGIÃO ATENDIDA POR CADA CORRELAÇÃO DE DENSIDADE, CLASSE TN.....	33
FIGURA 12 – VALORES DE DENSIDADE DE GEADA PARA A CORRELAÇÃO DE YANG E LEE (2004).....	35
FIGURA 13 – VALORES DE DENSIDADE DE GEADA PARA A CORRELAÇÃO DE HERMES (2014)	35
FIGURA 14 – VALORES DE DENSIDADE DE GEADA PARA A CORRELAÇÃO DE LEONI <i>ET AL.</i> (2016)	36
FIGURA 15 – COMPARAÇÃO GRÁFICA ENTRE CORRELAÇÕES PARA DENSIDADE DE GEADA	37
FIGURA 16 – PREVISÃO DE Δf COM CORRELAÇÕES DE Pf DA LITERATURA (REGIÃO DE VALIDADE).....	44
FIGURA 17 – PREVISÃO DE Δf COM CORRELAÇÕES DE Pf DA LITERATURA (CONDIÇÃO DE EVAPORADORES).....	44
FIGURA 18 – EFEITO DAS PROPRIEDADES SOBRE A ESPESSURA DA GEADA.....	45
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO DO TÚNEL UTILIZADO PARA O ESTUDO DE FORMAÇÃO DE GEADA	48
FIGURA 20 – SISTEMA DE CONDICIONAMENTO PSICROMÉTRICO DO TÚNEL	51
FIGURA 21 – SUPERFÍCIE DE FORMAÇÃO DE GEADA (ESQ.) E SUA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA (DIR.)	53
FIGURA 22 – SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DA SUPERFÍCIE DE FORMAÇÃO DE GEADA DO TÚNEL.....	54
FIGURA 23 – SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ESPESSURA	55
FIGURA 24 – CAPTURA DE IMAGEM DA CÂMERA	55
FIGURA 24 – HISTOGRAMA DE UMA IMAGEM BINARIZADA DOS TESTES	57
FIGURA 25 – RESULTADO DE UM TRECHO BINARIZADO	57
FIGURA 26 – PONTOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS, REPRESENTADOS NA CARTA PSICROMÉTRICA	59
FIGURA 27 – EXEMPLO DE CONTROLE DE UM TESTE EXPERIMENTAL	61
FIGURA 28 – REPETIBILIDADE DA MASSA (RESULTADOS PARA 6 HORAS)	63
FIGURA 29 – REPETIBILIDADE DA ESPESSURA (RESULTADOS PARA 6 HORAS)	63
FIGURA 30 – DESVIO PADRÃO PARA MASSA (ESQ.) E ESPESSURA (DIR.).....	64
FIGURA 31 – GRÁFICOS DO EFEITO DE $\Delta\Omega$ E ΔTs SOBRE A MASSA E ESPESSURA DA GEADA.....	66
FIGURA 32 – FOTOS DO EFEITO DE $\Delta\Omega$ E ΔTs SOBRE A GEADA	66
FIGURA 33 – GRÁFICOS DO EFEITO DA SOBRETENPERATURA SOBRE A GEADA ($u = 0,5$ M/S, $Fp = 20$ MM).....	67
FIGURA 34 – FOTOS DO EFEITO DA SOBRETENPERATURA SOBRE A GEADA ($u = 0,5$ M/S, $Fp = 20$ MM).	68
FIGURA 35 – GRÁFICOS DO EFEITO DA SOBRETENPERATURA SOBRE A GEADA ($u = 1,0$ M/S, $Fp = 20$ MM).....	69
FIGURA 36 – FOTOS DO EFEITO DA SOBRETENPERATURA SOBRE A GEADA ($u = 1,0$ M/S, $Fp = 20$ MM).	69
FIGURA 37 – GRÁFICOS DO EFEITO DA VELOCIDADE SOBRE A GEADA ($OT \sim 4$ K, $Fp = 20$ MM).....	70
FIGURA 38 – FOTOS DO EFEITO DA VELOCIDADE SOBRE A GEADA ($OT \sim 4$ K, $Fp = 20$ MM).	71

FIGURA 39 – GRÁFICOS DO EFEITO DA VELOCIDADE SOBRE A GEADA (OT = 10 K, Fp = 20 mm).....	71
FIGURA 40 – FOTOS DO EFEITO DA VELOCIDADE SOBRE A GEADA (OT = 10 K, Fp = 20 mm).	72
FIGURA 41 – GRÁFICOS DO EFEITO DO ESPAÇAMENTO SOBRE A GEADA (OT = 10 K, u = 0,5 m/s).	73
FIGURA 42 – FOTOS DO EFEITO DA VELOCIDADE SOBRE A GEADA (OT = 10 K, u = 0,5 m/s).....	73
FIGURA 43 – GRÁFICOS DO EFEITO DO ESPAÇAMENTO SOBRE A GEADA (OT = 10 K, u = 1,0 m/s).	74
FIGURA 44 – FOTOS DO EFEITO DA VELOCIDADE SOBRE A GEADA (OT = 10 K, u = 1,0 m/s).....	74
FIGURA 45 - GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DA MASSA DA GEADA.	76
FIGURA 46 – PROCESSO DE NORMALIZAÇÃO DO TEMPO NO GRÁFICO PARA ESPESSURA (TESTE 18).....	78
FIGURA 47 – FASES DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GEADA (TESTE 18).	78
FIGURA 48 – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ESPESSURA DA GEADA (NORMALIZADOS).	79
FIGURA 49 – GRÁFICOS DAS EVOLUÇÕES MÉDIAS DA ESPESSURA DA GEADA (NORMALIZADOS).....	80
FIGURA 50 – EXEMPLO DE REGRESSÃO REALIZADA NA VALIDAÇÃO CRUZADA.	85
FIGURA 51 – AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES PARA DENSIDADE	86
FIGURA 52 – CAPACIDADE DE EXTRAPOLAÇÃO DE Tw DO MODELO PROPOSTO	88
FIGURA 53 – VALORES DE DENSIDADE DA GEADA PARA A CORRELAÇÃO DE HERMES <i>ET AL.</i> (2014) E PROPOSTA.....	89
FIGURA 54 – AVALIAÇÃO DOS MODELOS PARA PREVISÃO DE MASSA DE GEADA.	93
FIGURA 55 – AVALIAÇÃO DOS MODELOS PARA PREVISÃO DE ESPESSURA DE GEADA.	94
FIGURA 56 – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE GEADA PARA DIFERENTES Tw (u = 0,5 m/s).....	96
FIGURA 57 – FOTOS DA DISTRIBUIÇÃO DE GEADA PARA DIFERENTES Tw (u = 0,5 m/s).	96
FIGURA 58 – GRÁFICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE GEADA PARA DIFERENTES Tw (u = 1,0 m/s).....	97
FIGURA 59 – FOTOS DA DISTRIBUIÇÃO DE GEADA PARA DIFERENTES Tw (u = 1,0 m/s).	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EFEITO DAS CONDIÇÕES DE FORMAÇÃO NA DENSIDADE DA GEADA (LONG <i>ET AL.</i> , 2022)....	26
TABELA 2 – MATRIX EXPERIMENTAIS	60
TABELA 3 – AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES PARA DENSIDADE DE GEADA	87
TABELA 4 – AVALIAÇÃO DOS MODELOS PARA FORMAÇÃO DE GEADA.....	91

NOMENCLATURA

Letras romanas

a, b	Parâmetro da equação (4.10)	-
a, b, c	Parâmetros da correlação de Hayashi	-
A_s	Área de superfície de formação	m^2
b_0, b_1, b_2, b_3	Parâmetros da equação (1.35)	-
B	Número de pixels brancos na imagem atual de binarização	-
B_{ini}	Número de pixels brancos na imagem inicial de binarização	-
c	Parâmetro da equação (4.13)	-
c, n	Parâmetros da equação (1.31)	-
c, n	Parâmetros da equação (1.14)	-
c_p	Calor específico do ar úmido	$J\ kg^{-1}K^{-1}$
c_1, c_2	Parâmetros da equação (1.9)	-
c_1, c_2, c_3, n	Parâmetros da equação (1.34)	-
d_0, d_1	Parâmetros da equação (1.26)	-
D_f	Difusividade efetiva de vapor d'água no ar dentro da geada	$m^2\ s^{-1}$
D	Difusividade do vapor de água no ar	$m^2\ s^{-1}$
D_h	Diâmetro hidráulico	m
F_p	Distância entre as superfícies de formação	m
Fo	Número de Fourier	-
Fo_m	Número de Fourier para transporte de massa	-
h_c	Coeficiente de transferência de calor	$W\ m^{-2}K^{-1}$
h_m	Coeficiente de transferência de massa	$kg\ m^{-2}s^{-1}$
i_{sv}	Coeficiente de dessublimação	$J\ kg^{-1}$
Ja	Número de Jacob modificado	-
k_a	Condutividade térmica do ar	$W\ m^{-1}K^{-1}$
k_f	Condutividade da geada	$W\ m^{-1}K^{-1}$
$\tilde{k}$	Condutividade adimensional	-
L	Comprimento da superfície resfriada	m
Le	Número de Lewis	-
m''	Fluxo mássico total de geada	$kg\ m^{-2}s^{-1}$
m''_a	Fluxo mássico de adensamento de geada	$kg\ m^{-2}s^{-1}$
m''_c	Fluxo mássico de crescimento de geada	$kg\ m^{-2}s^{-1}$
m_a	Vazão mássica de ar	$kg\ s^{-1}$
m_f	Vazão mássica de geada	$kg\ s^{-1}$
M_f	Massa de geada	kg

Nu	Número de Nusselt	-
OT	Sobret temperatura	K
P _{ini}	Número de pixels pretos na imagem inicial de binarização	-
Pr	Número de Prandtl	-
q"	Fluxo de calor sensível	W m ⁻²
q _t "	Fluxo de calor total	W m ⁻²
R ²	Coeficiente de determinação	-
R _c ²	Coeficiente de determinação na validação cruzada	-
Re	Número de Reynolds	-
Re _c	Número de Reynolds Crítico	-
Sc	Número de Schmidt	-
t	Tempo	s
T	Temperatura	K
T _a	Temperatura do ar	K
T _{dew}	Temperatura de orvalho do ar	K
T _f	Temperatura da superfície da geada	K
T _m	Temperatura de fusão da água	K
$\bar{T}$	Diferença de temperatura adimensional	K
T _{tp}	Temperatura de ponto triplo da água	K
T _w	Temperatura da superfície resfriada	K
u	Velocidade do ar	m s ⁻¹
V _a	Vazão de ar	m ³ s ⁻¹
x	Distância do bordo de ataque da superfície de formação	m
x _{cor}	Fator de correção para escoamentos com região sem troca térmica	-
y	Direção perpendicular a superfície de formação	m

Letras gregas

α	Expoente do tempo na correlação de densidade	-
α_t	Difusividade térmica	m ² s ⁻¹
δ_f	Espessura da geada	m
ΔT_s	Super-resfriamento	K
$\Delta \omega$	Diferença de umidade absoluta entre ar e superfície resfriada	kg _{água} kg _{ar} ⁻¹
ϵ	Efetividade de troca de calor e massa	-
ε	Porosidade da geada	-
θ	ângulo de contato entre a água e a superfície	rad
ν	Viscosidade cinemática	m ² s ⁻¹
ξ	comprimento da região de desenvolvimento	m
ρ_a	Densidade do ar	kg m ⁻³

ρ_f	Densidade da geada	kg m^{-3}
ρ_i	Densidade do gelo	kg m^{-3}
τ	Tempo adimensional	-
ϕ	Umidade relativa do ar	%
ψ	Tortuosidade da geada	-
ω	Umidade absoluta	$\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{ar}}^{-1}$
ω_a	Umidade absoluta do ar na entrada do canal	$\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{ar}}^{-1}$
ω_f	Umidade absoluta na superfície da geada	$\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{ar}}^{-1}$
ω_{out}	Umidade absoluta do ar na saída do canal	$\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{ar}}^{-1}$
ω_{sat}	Umidade absoluta para condição saturada	$\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{ar}}^{-1}$
ω_w	Umidade absoluta da superfície resfriada	$\text{kg}_{\text{água}} \text{kg}_{\text{ar}}^{-1}$

Subscritos

Dh	Diâmetro hidráulico
L	Comprimento da superfície
loc	Local
x	Distância do bordo de ataque da superfície

*“Whenever possible, substitute constructions out of known entities
for inferences to unknown entities”*

Bertrand Russell (1872-1970)

1 INTRODUÇÃO

1.1 FORMAÇÃO DE GELO E GEADA

A geada é um material poroso formado por cristais de gelo e ar úmido, originado pela transferência de vapor d'água do ar para uma superfície. Devido à sua estrutura porosa, a geada possui densidade e condutividade térmica significativamente inferiores às do gelo – cerca de uma ordem de grandeza. Essas propriedades tornam a geada mais prejudicial que o gelo em diversas aplicações de engenharia. Um exemplo é sua formação na superfície de evaporadores em sistemas de refrigeração, como ilustrado na Figura 1.

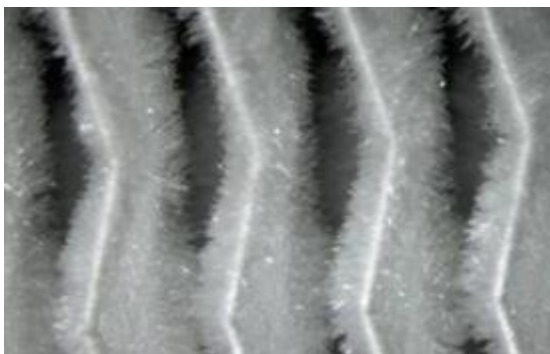


Figura 1 - Geada formada na superfície de um evaporador (Da Silva, 2012)

Por ocupar um volume maior que o gelo para uma mesma massa, a geada oferece maior resistência ao escoamento de ar. Em conjunto com sua baixa condutividade térmica, a capacidade de refrigeração do equipamento é reduzida (Da Silva, 2012). A Figura 2 apresenta gelo e geada, destacando a diferença entre a estrutura sólida do gelo e a porosa da geada. A Figura 3 mostra o diagrama de fases da água, no qual o processo II representa a dessublimação do vapor na formação da geada, enquanto o processo I descreve a formação do gelo, que ocorre por condensação seguida de congelamento (Negrelli, 2016).

O processo de mudança de fase pode ocorrer de duas maneiras. Quando não há contato do vapor com qualquer tipo de substrato, a mudança de fase é dita homogênea. Isso ocorre, por exemplo, quando o vapor congela formando flocos de neve ou então quando há condensação na atmosfera formando névoa. Já quando há interação com algum substrato (como uma superfície ou mesmo grãos de poeira) a mudança é dita heterogênea, o que ocorre, por exemplo, quando há formação de orvalho ou geada sobre as superfícies resfriadas em um refrigerador (Piucco, 2008).

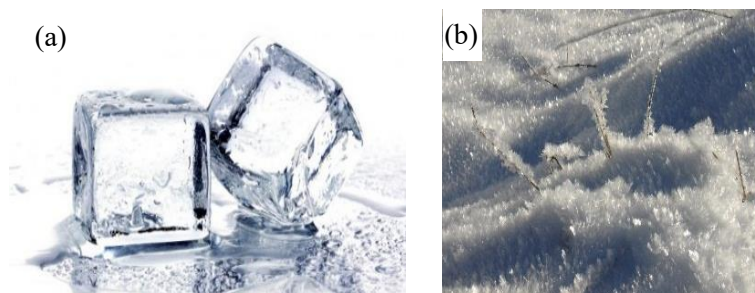


Figura 2 - Gelo (a) e geada (b) (Negrelli, 2016)

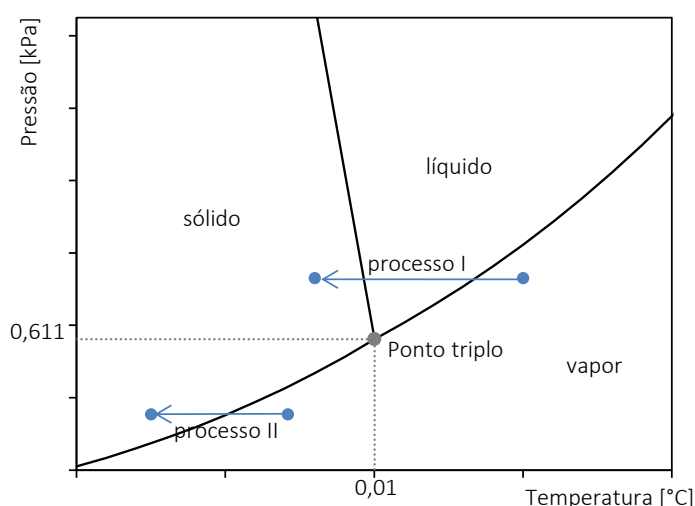


Figura 3 - Diagrama de fases da água (Negrelli, 2016)

A formação da geada envolve três etapas: nucleação, crescimento e adensamento (Fletcher, 1970). Contudo, após a nucleação, as demais etapas se iniciam, ocorrendo de forma simultânea. A nucleação resulta de uma série de processos psicrométricos (Figura 4), nos quais o vapor d'água, ao entrar em contato com uma superfície fria a uma temperatura T_w , resfria-se até o ponto de orvalho (processo A-A'). Devido à tensão superficial, uma grande quantidade de energia é necessária para a mudança de fase, caracterizando um resfriamento (processo A'-B) metaestável (Piucco, 2008). Quando o equilíbrio se rompe, a mudança de fase se inicia (processo B-C). Assim, o resfriamento e a mudança de fase ocorrem simultaneamente durante toda a formação da geada (Fletcher, 1970).

Uma vez que a nucleação é deflagrada, passam a ocorrer também os processos de crescimento, devido à adição de novas moléculas de vapor que se solidifica sobre o meio, e de adensamento, por meio da difusão do vapor d'água em seu interior. Devido ao processo contínuo de nucleação, crescimento e adensamento, forma-se um meio poroso que pode adquirir diferentes características de acordo com as condições psicrométricas e de superfície.

Com base na descrição de Piucco (2008) do fenômeno de formação de geada, no presente trabalho, é proposta uma parametrização das condições de formação, buscando dar ênfase às grandezas mais relevantes. Para tanto, define-se:

- Temperatura de superfície resfriada (T_w);
- Diferença de umidade absoluta¹ ($\Delta\omega$): diferença entre a umidade absoluta do ar (ω_a) e a umidade absoluta da superfície resfriada, calculada considerando a condição saturada $\omega_{sat}(T_w)$;
- Sobretemperatura² (OT): diferença entre a temperatura do ar e a temperatura de orvalho (T_{dew});
- Super-resfriamento (ΔT_s): diferença entre a temperatura de orvalho do ar (T_{dew}) e a temperatura da superfície resfriada.

Nota-se que, para a definição psicrométrica de um processo de formação de geada, bastam: T_w , $\Delta\omega$ e OT, sendo ΔT_s uma consequência, aqui ressaltado devido à sua importância na caracterização do fenômeno.

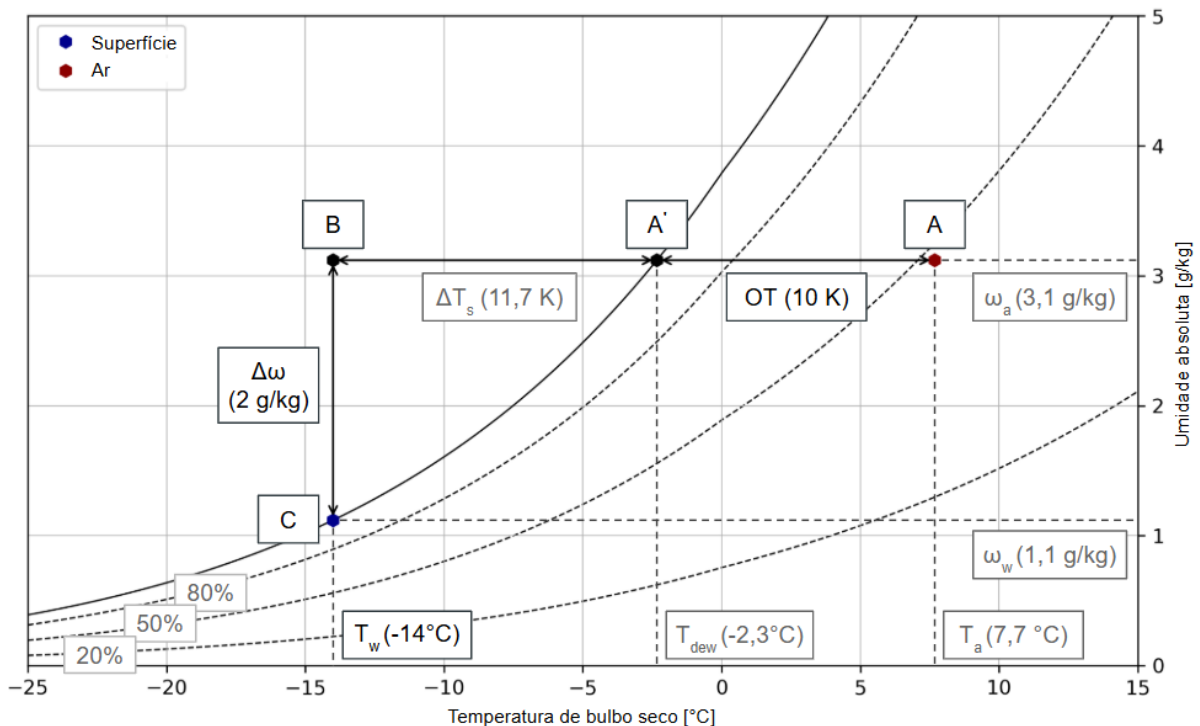


Figura 4 - Formação da geada na carta psicrométrica, adaptado de Piucco (2008)

¹ Também chamada de grau de supersaturação

² Parâmetro conhecido pelo termo em inglês *dew point spread*.

1.2 MORFOLOGIA DA GEADA

As diversas morfologias que a geada pode assumir são objeto de vasto estudo nos campos da meteorologia. Essa investigação visa classificar e compreender o crescimento dos cristais de gelo, frequentemente com base nos modelos estabelecidos para os cristais de neve naturais. Embora o processo de formação de geada em evaporadores apresente diferenças, os conceitos e as previsões morfológicas derivados do estudo dos cristais formados em nuvens podem ser aplicados. Isso ocorre porque os fatores determinantes para a morfologia do gelo, temperatura de superfície e grau de supersaturação, são os mesmos, tanto na formação de cristais de neve quanto na formação de geada sobre superfícies de evaporadores.

Os primeiros avanços científicos relacionados à morfologia dos cristais de gelo devem-se ao físico japonês Ukichiro Nakaya (Bender, 1962). Através de experimentos, ele concluiu que os cristais de gelo adquiriam diferentes morfologias em função das condições nas quais eles se formavam, e que apresentavam uma forte relação com a temperatura do ar e com o grau de supersaturação. Tais observações foram agrupadas em diferentes categorias, dando origem ao diagrama de Nakaya (Figura 5), que permite estimar as condições meteorológicas nas quais os cristais de neve foram formados. Mais especificamente, o diagrama mostra as características dos cristais de gelo em função da temperatura do ar (eixo x) e da supersaturação (eixo y). Nakaya dividiu os tipos de cristais de neve em 8 morfologias que foram agrupadas em 7 regiões do diagrama. Esse primeiro diagrama já indicava uma transição marcante de morfologia, com estruturas mais esbeltas (agulhas e colunas) para valores de temperatura do ar superiores a -10°C e estruturas com maior crescimento lateral (placa e dendritas) para valores entre -10°C e -20°C .

O pioneiro diagrama de Nakaya foi reproduzido ao longo dos anos por numerosos autores (Kobayashi, 1958) (Yokoyama, 1990) (Bailey, 2009). Na Figura 6 é apresentada uma adaptação do diagrama obtido por Kobayashi, que é mais próximo das condições de formação de geada em evaporadores. No diagrama, as morfologias de cristais de neve geralmente exibem um comportamento geral semelhante a uma placa perto de -2°C , mudando para formas colunares delgadas perto de -5°C , seguido por estruturas especialmente finas semelhantes a placas perto de -15°C e cristais colunares novamente em torno de -30°C . Além disso, há uma tendência geral em direção a uma maior complexidade morfológica à medida que a supersaturação aumenta: prismas facetados simples são mais comuns em supersaturações baixas, enquanto estruturas dendríticas

aparecem em supersaturações mais altas.

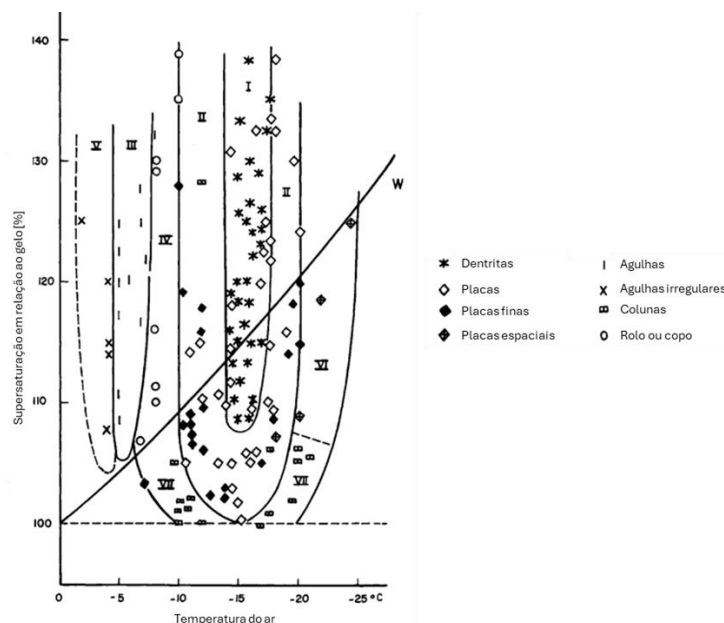


Figura 5 – Diagrama de Nakaya original (traduzido) (Nakaya, 1954)

Uma menor complexidade morfológica para menores supersaturações pode ser explicada pelo fato de que, nessa condição, o fenômeno se aproxima de uma condição de quase-equilíbrio, com um crescimento mais lento e uniforme. A explicação relacionada ao efeito da temperatura por sua vez é mais complexa e ainda não foi totalmente entendida. Recentemente, Libbrecht (2019) publicou um trabalho que propõe um modelo quantitativo, capaz de realizar previsões e ser testado experimentalmente. Com esse modelo, Libbrecht busca explicar o comportamento não usual da morfologia com a temperatura que varia alternadamente entre estruturas com crescimento axial e lateral.

Devido às suas distintas morfologias, a geada formada pode apresentar propriedades variáveis conforme sua estrutura. Um exemplo claro é a porosidade: enquanto a geada em forma de placa tende a ser mais compacta, a geada em forma de dendritas é mais porosa, o que impacta diretamente sua densidade e, conseqüentemente, sua condutividade térmica. Devido à natureza porosa da geada, a maioria dos modelos empíricos para cômputo das propriedades termofísicas utiliza a densidade como parâmetro principal, uma vez que esta se relaciona diretamente com a porosidade do material.

Utilizando o diagrama apresentado na Figura 6, é possível realizar certas previsões quanto à densidade da geada. A mais clara é que com o aumento da supersaturação, há um distanciamento da condição de equilíbrio (Kobayashi, 1958). Logo, verifica-se um aumento de complexidade morfológica e porosidade dos cristais, indicando uma tendência

de decréscimo da densidade com o aumento da supersaturação. É importante ressaltar que o diagrama de Kobayashi conta com supersaturações inferiores às usualmente observadas em aplicações de refrigeradores domésticos.

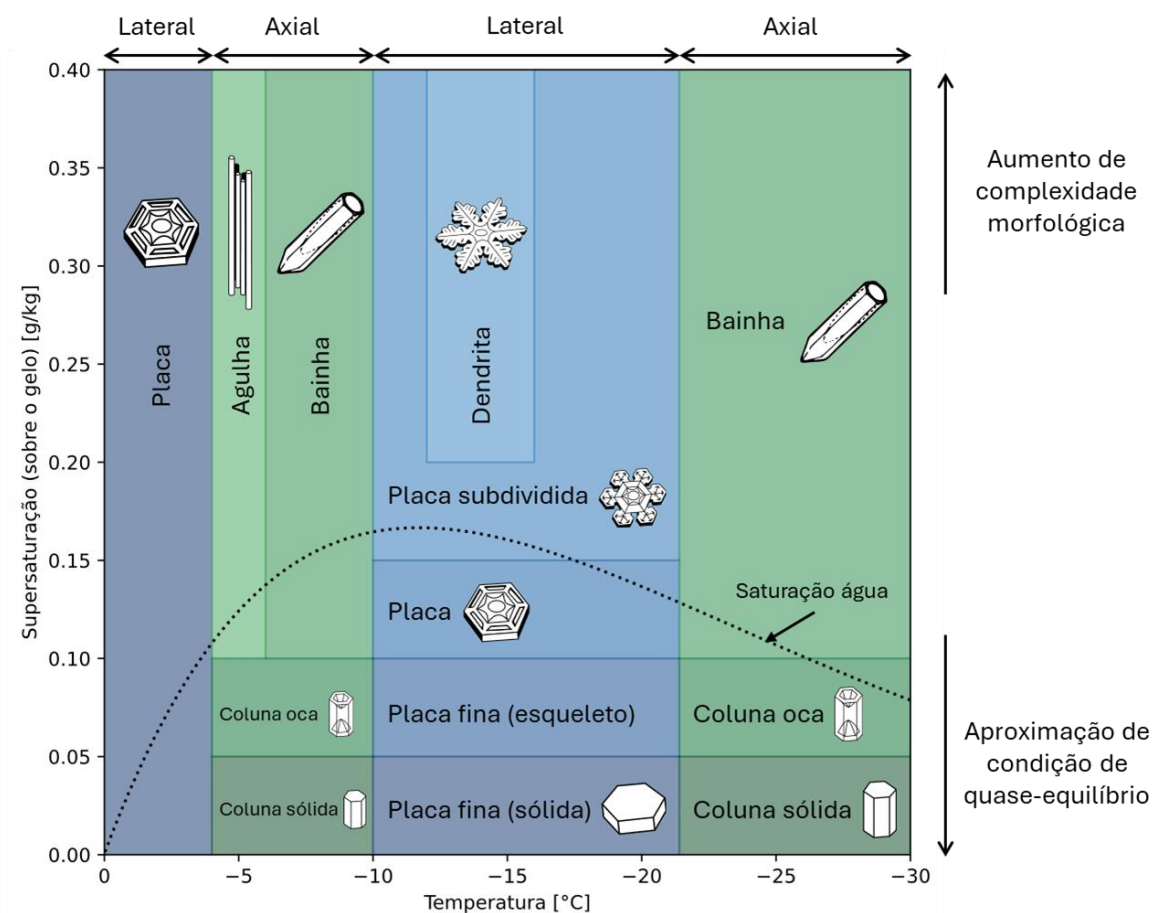


Figura 6 – Diagrama de Kobayashi (adaptado) (Kobayashi, 1961)

Quanto ao eixo de temperatura do diagrama de Kobayashi, é difícil, em um primeiro momento, traçar qualquer tendência para a densidade, devido a uma alternância de morfologias. Porém, como será mostrado, analisando correlações da literatura observa-se um comportamento experimental claro de aumento de densidade com o aumento de temperatura da superfície. No entanto, na maioria dos trabalhos, os autores não realizam nenhuma tentativa para explicar fisicamente esse fenômeno. O estudo mais próximo de indicar algum caminho a ser seguido se deve à Biguria e Wenzel (1970), onde é analisada a dependência da densidade da geada com respeito a diferentes fatores como temperatura da placa, umidade e velocidade do ar. Ao final da análise, os autores comentam que nenhuma tentativa foi realizada para explicar a natureza dos fenômenos observados, porém indicam que o crescimento do cristal e a nucleação heterogênea têm papel

importante na explicação das tendências.

Nesse contexto, Shibkov (2002) publicou um estudo que correlacionou a velocidade de crescimento de cristais em água pura com uma ampla faixa de super-resfriamento, variando de 0,1°C a cerca de 30°C. Em tal experimento, é possível observar diferentes morfologias e regimes de crescimento dos cristais de gelo. Os resultados desse estudo são apresentados na Figura 7, que mostra a velocidade de crescimento de cristais de gelo em função do super-resfriamento, e compara os resultados experimentais com uma previsão teórica baseada no modelo de difusão térmica de Langer e Müller-Krumbhaar (LM-K). O aumento da velocidade de crescimento da ponta do cristal com o aumento do super-resfriamento deve-se ao aumento da força motriz térmica que impulsiona o crescimento do cristal. Fisicamente, esse comportamento ocorre porque à medida que a temperatura do sistema é reduzida abaixo do ponto de fusão, a diferença entre a temperatura de equilíbrio (onde o gelo e a água coexistem) e a temperatura do ambiente super-resfriado aumenta. Essa diferença cria um gradiente de temperatura mais acentuado próximo à interface sólido-líquido, o que facilita a difusão de calor para longe do cristal em crescimento. A análise do estudo de Shibkov (2002), ilustra claramente o efeito do super-resfriamento na velocidade de crescimento do cristal para o processo de solidificação. Esse trabalho faz então uso dessa observação e irá avaliar se esse comportamento se mantém para o processo de dessublimação.

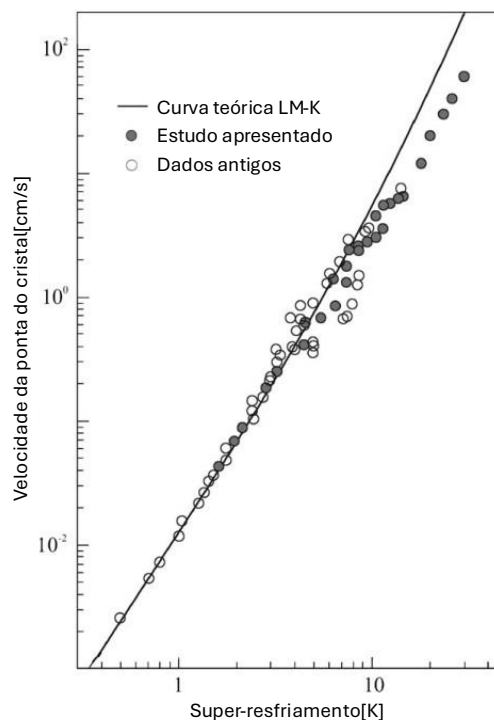


Figura 7 – Velocidade do crescimento de cristais de gelo (Shibkov, 2002)

1.3 CRESCIMENTO DA GEADA

Existem diversos modelos diferentes para prever o crescimento de geada ao longo do tempo. A maioria deles se baseia no cálculo da temperatura de superfície da geada para determinar o fluxo de calor e massa e, em muitos modelos, o valor de densidade da geada. Em geral, para desenvolver um modelo para prever a espessura da geada são adotadas as seguintes hipóteses simplificativas (Hermes *et al.*, 2009):

- (i) os processos de transferência de calor e massa são considerados quase estáticos e unidimensionais;
- (ii) o ar úmido é considerado uma mistura de gases ideais, já que a pressão parcial do vapor d'água é baixa em relação à pressão atmosférica. Assim as propriedades podem ser estimadas com base na psicrometria;
- (iii) a espessura da camada de geada é uniformemente distribuída ao longo da placa;
- (iv) a pressão do ar é uniforme dentro e fora da camada de geada;
- (v) a analogia de Lewis para a camada limite é aplicável.

O fluxo mássico advindo da dessublimação do vapor de água resulta numa variação temporal da massa da geada, que pode ser expressa pela combinação dos fenômenos de crescimento e adensamento, representado na Figura 8, e expresso pela equação:

$$m'' = \frac{d}{dt} \int_0^{\delta} \rho_f(y) dy = \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} + \delta_f \frac{d\rho_f}{dt} \quad (1.1)$$

onde $m'' = h_m(\omega_a - \omega_f)$ é o fluxo de massa de vapor do ar úmido dessublimado para o meio poroso, sendo que uma parte da massa promove o crescimento ($d\delta_f/dt$), e outra parte promove o adensamento ($d\rho_f/dt$), ρ_f é a densidade média da camada de geada de espessura δ_f , e h_m é o coeficiente convectivo de transferência de massa.

Além do balanço global de massa, balanços de massa de vapor d'água e energia ao longo da camada de geada são necessários. Aplicando-se o princípio da conservação de energia, tem-se que a variação do fluxo de calor sensível ao longo da espessura é igual à taxa com que o vapor d'água sofre dessublimação (Loyola *et al.*, 2014):

$$\frac{dq''}{dy} + \frac{dm''}{dy} i_{sv} = 0 \quad (1.2)$$

onde q'' é o fluxo de calor sensível, i_{sv} é o calor latente de dessublimação e y é a direção de

crescimento. Através do princípio de conservação de massa, pode-se chegar à evolução temporal da densidade da geada:

$$\frac{dm''}{dy} = -\frac{d\rho_f}{dt} \quad (1.3)$$

Através das leis de Fick e de Fourier para difusão de massa e calor, respectivamente, no interior do meio poroso, chega-se à concentração de vapor d'água (umidade) e à distribuição de temperatura ao longo da camada de geada:

$$D_f \frac{d^2\omega}{dy^2} = \frac{d\rho_f}{dt} \quad (1.4)$$

$$k_f \frac{d^2T}{dy^2} = -\frac{d\rho_f}{dt} i_{sv} \quad (1.5)$$

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 densidade do meio, ρ_f , ω é a umidade absoluta do ar e T é a temperatura.

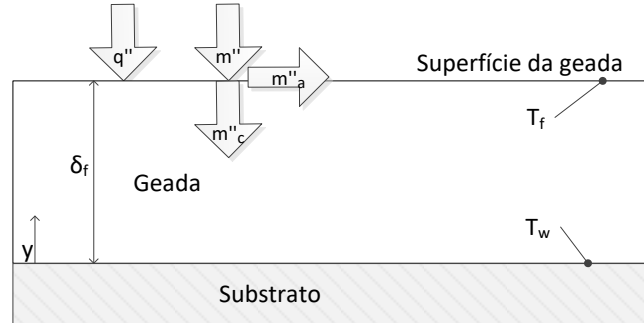


Figura 8 - Representação esquemática do modelo (adaptado de Hermes, 2012)

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

$$k_f \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=\delta_f} = q'' + \rho_f \frac{d\delta}{dt} i_{sv} \quad (1.6)$$

onde $q'' = h_c(T_a - T_s)$ é o fluxo de calor da corrente de ar para a camada de geada. Nessa formulação os efeitos da transferência de calor devido a radiação são absorvidos por h_c . Essa aproximação é razoável pois, para condições de evaporadores domésticos, as temperaturas de trabalho ficam em torno de -30°C a 0°C , tendo uma variação em K de cerca de apenas 10%. Devido ao seu valor reduzido, a variação tem um impacto reduzido no coeficiente de transferência de calor por radiação (governado pelas temperaturas de trabalho). Com uma baixa variação desse coeficiente, é possível agregá-lo a h_c .

A formulação apresentada, que permite o cômputo da espessura da camada de geada ao longo do tempo, $\delta_f(t)$, a partir da solução da equação (1.1), requer que se conheça, de antemão, as propriedades termofísicas do meio poroso, particularmente a densidade e a condutividade térmica da geada. Essas dependem fortemente da morfologia dos cristais, que está relacionada com as condições de formação (representadas na Figura 6). 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.

1.4 DENSIDADE DA GEADA

A densidade da geada pode ser alterada por diferentes fatores, entre eles destacam-se a temperatura, umidade e velocidade do ar e a temperatura da superfície. Nesse contexto, Long *et al.* (2022) publicaram um artigo de revisão sobre os mecanismos de formação de geada, onde é apresentada a Tabela 1. Nessa tabela, os efeitos dos principais fatores sobre a densidade da geada, obtidos através de resultados experimentais, são apresentados.

Tabela 1 – Efeito das condições de formação na densidade da geada (Long *et al.*, 2022)

Autor	Temperatura do ar	Umidade absoluta do ar	Velocidade do ar	Temperatura de superfície
Sanders (1974)	↑	↑	↑	↑
Lee e Ro (1997)	↑	↓	↑	↑
Piucco (2008)	↑	↑	-	↑
Lee e Ro (2005)	↑	↓	↑	↑
Wang <i>et al.</i> (2012)	↑	↑↓	-	↑

Analisando os resultados da Tabela 1, nota-se um efeito positivo da temperatura do ar sobre a densidade em todos os trabalhos. Comportamento que precisa que ser analisado com cautela, pois para muitos casos o aumento da temperatura do ar ocorre com

manutenção da umidade relativa, levando a um aumento da umidade absoluta e confundimento de efeitos. O aumento da umidade absoluta do ar, por sua vez, deveria levar a uma condição mais longe do equilíbrio e, desse modo, levar à menores densidades de geada. Porém, isso não é observado consistentemente em todos os trabalhos. Sendo assim, essa é uma questão ainda a ser melhor esclarecida. A influência da velocidade parece clara em aumentar a densidade da geada, mas, a princípio, não pode ser explicada à luz da análise do crescimento de cristais. Por fim, a temperatura de superfície apresenta uma consistente influência no aumento da densidade da geada. Isso pode ser explicado pelo fato de um maior valor de T_w levar a uma diminuição do super-resfriamento, formando cristais com crescimento mais lento (Shibkov, 2002) e, portanto, com menor espessura e maior densidade.

1.4.1 Correlações baseadas em T_f

Uma das mais importantes correlações para a densidade da geada foi proposta em 1977, por Hayashi. A correlação de Hayashi se destaca por sua simplicidade e poucos coeficientes, possuindo a seguinte forma:

$$\rho_f = 650 \exp(0,277T_f) \quad (1.7)$$

onde T_f é a temperatura de superfície da geada, utilizada em °C, e os coeficientes são ajustados empiricamente. Nota-se que essa correlação expressa um aumento de densidade com a temperatura de superfície da geada de maneira exponencial, variando no intervalo de validade de $-18,6^\circ\text{C} < T_f < -5^\circ\text{C}$, entre $3,8 \text{ kg/m}^3$ e $162,7 \text{ kg/m}^3$. Observa-se que a correlação obedece a tendência de aumento de densidade com o aumento da temperatura de superfície observadas em outros experimentos.

O modelo de Hayashi foi utilizado como referência por Piucco (2008). Nesse trabalho foi adicionado um segundo coeficiente, aprimorando a correlação para a seguinte forma:

$$\rho_f = 207,3 \exp(0,266T_f - 0,0615T_w) \quad (1.8)$$

onde T_w é a temperatura da parede. A correlação de Hermes *et al.* é válida para o intervalo de $-15^\circ\text{C} < T_w < -5^\circ\text{C}$. Com base também no trabalho de Hayashi, Wang *et al.* (2011) acrescentaram à correlação não só a influência da temperatura da parede, mas também a da temperatura do ar:

$$\rho_f = 650 \exp(0,277T_f) c_0 c_1 \quad (1.9)$$

onde,

$$c_0 = 0,70132 - 0,11346T_w - 0,00203T_w^2 \quad (1.10)$$

$$c_1 = 1,4333 - 0,17389T_a + 0,00722T_a^2 \quad (1.11)$$

Ainda com base no modelo de Hayashi, Kandula (2012) propôs uma correlação que absorvesse também os efeitos da temperatura de parede e da velocidade do ar:

$$\rho_f = \rho_i 0,5 \left(\frac{T_f - T_w}{T_m - T_w} \right) \exp \left\{ - \left[0,376 + 1,5 \left(1 - \frac{T_f - T_w}{T_m - T_w} \right) \right] \left[1 - \sqrt{\frac{Re_L}{Re_c}} \right] \right\} \quad (1.12)$$

onde ρ_i é a densidade do gelo, T_m é a temperatura de fusão da água, Re_L é o número de Reynolds baseado no comprimento da placa L , sobre a qual a geada está sendo formada e Re_c é o número de Reynolds crítico de transição laminar-turbulenta, adotado no trabalho como sendo igual a 10^5 . Nota-se, na correlação, que quando a temperatura da superfície da geada se aproxima da temperatura da parede, o valor da densidade tende a zero. Ou seja, para os instantes iniciais, devido à baixa espessura de geada, a densidade partirá de valores próximo a zero, assim como é o esperado. Além disso, a densidade máxima é atingida quando a T_f se aproxima de T_m , máximo valor possível fisicamente. Para esse ponto, e considerando Re_L na transição laminar-turbulenta, a densidade atinge 500 kg/m^3 , valor máximo para o regime laminar de convecção forçada segundo Brian (1970).

1.4.2 Correlações com $\sqrt{t}$

Outra classe de correlações para a densidade da geada estabelece uma dependência com a raiz quadrada do tempo. Uma das primeiras correlações dessa categoria foi desenvolvida por Tokura (1983). Baseado em uma análise dimensional, Tokura demonstrou inicialmente essa dependência para fenômenos de convecção natural. Posteriormente, em 1988, a mesma correlação foi aplicada a formação de geada com convecção forçada. Essa correlação é expressa da seguinte forma:

$$\rho_f = 0,001\rho_i \sqrt{\frac{h * h_m}{3600k_a}} \sqrt{t} \quad (1.13)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor, h_m é o coeficiente de transferência de massa, k_a é a condutividade térmica do ar, e t é o tempo decorrido desde o início do

processo de formação da geada.

Com base também na raiz do tempo, Hermes *et al.* (2014) conduziram um estudo teórico-experimental dos processos de crescimento e adensamento de geada em canais formados por placas paralelas isotérmicas e obtiveram um modelo que prevê de forma bastante satisfatória ($\pm 15\%$ de erro) a densidade para uma ampla faixa de operação:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = c \left(\frac{c_p(T_{\text{dew}} - T_w)}{i_{sv}(\omega_a - \omega_w)} \right)^{-n} \sqrt{t} \quad (1.14)$$

onde c_p é o calor específico do ar úmido, T_{dew} é a temperatura de orvalho do ar, ω_a é a umidade absoluta do ar, ω_w é a umidade absoluta do ar na temperatura da superfície resfriada (saturado), e os coeficientes “c” e “n” são determinados experimentalmente. No caso de placa plana, $n = 3/2$ e $c = 0,0024$, e em canal de placas paralelas, $n = 3/4$ e $c = 0,0022$. Mesmo necessitando de coeficientes empíricos, a correlação de Hermes *et al.* (2014) carrega consigo uma base física bastante consistente, pois foi desenvolvida a partir da análise das escalas do problema, tal que $\rho_f \sim \sqrt{t}$, que é próprio dos fenômenos dominados pela difusão (Hermes, 2012).

Com base na correlação de Hermes *et al.* (2014), Sommers et al. (2017) publicaram um estudo apresentando uma correlação semiempírica para densidade da camada de geada, associando o ângulo de contato com as características macroscópicas de formação de geada (i.e., temperatura do substrato, temperatura e umidade do ar). A equação que relaciona a densidade da camada de geada em função do tempo, do ângulo de contato e da umidade relativa da corrente de ar, regredida pelos autores, é descrita por:

$$\rho_f = 2,17 \left(\frac{c_p(T_{\text{dew}} - T_w)}{i_{sv}(\omega_a - \omega_w)} \right)^{-3/2} \left(\frac{4,5}{\ln \theta} \right)^{0,95} \left(\frac{0,80}{\phi} \right)^{0,61} \sqrt{t} \quad (1.15)$$

onde θ é o ângulo de contato entre a água e a superfície e ϕ é a umidade relativa do ar.

1.4.3 Correlações com t^n ($n \neq 0,5$)

A última classe de correlações também expressa uma dependência da densidade com o tempo, porém não se baseia em análise de escalas para determinar o expoente apropriado, utilizando somente resultados experimentais. Mao *et al.* (1993) propuseram uma correlação de base empírica, envolvendo parâmetros adimensionais:

$$\frac{\rho_{f,loc}}{\rho_i} = 5,559 \times 10^{-5} \left(\frac{x}{D_h} \right)^{-0,137} \omega_a^{-0,413} Re_{Dh}^{0,715} Fo_{Dh}^{0,252} \left(\frac{T_{tp} - T_w}{T_a - T_w} \right)^{-0,997} \quad (1.16)$$

onde $\rho_{f,loc}$ é a densidade local da geada, x a distância do bordo de ataque da placa de formação, T_{tp} é a temperatura do ponto triplo da água, Re_{Dh} é o número de Reynolds e Fo_{Dh} é o número de Fourier (ambos baseados no diâmetro hidráulico do canal). A correlação é válida somente para a faixa de temperatura $-15^\circ C < T_w < -5^\circ C$.

Dando continuidade ao trabalho de 1993, Mao *et al.* (1999) realizaram experimentos em condições típicas de refrigeradores domésticos, com uma faixa de temperatura de $-41^\circ C < T_w < -20,5^\circ C$. Com isso, uma nova correlação foi elaborada:

$$\frac{\rho_{f,loc}}{\rho_i} = 1,714 \times 10^{-4} \left(\frac{x}{D_h} \right)^{-0,056} \omega_a^{-0,011} Re_{Dh}^{0,463} Fo_{Dh}^{0,217} \left(\frac{T_{tp} - T_w}{T_a - T_w} \right)^{0,845} \quad (1.17)$$

nesta nota-se a manutenção do sinal dos expoentes da posição da placa, umidade absoluta e número de Reynolds e Fourier. O expoente da temperatura adimensional, por sua vez, tem sinal oposto. Porém, para os experimentos de 1992, a temperatura do ar fica acima do ponto triplo ($15^\circ C < T_a < 23^\circ C$), e por isso a densidade aumenta com o crescimento da temperatura da parede (como esperado fisicamente e observado em outros experimentos). Nos experimentos de 1999, a temperatura do ar fica abaixo do ponto triplo ($-25,8^\circ C < T_a < -10,1^\circ C$), o que juntamente com um expoente positivo, leva a um aumento de densidade com a temperatura da parede. Portanto, é possível dizer que as tendências físicas se mantêm nos dois trabalhos de Mao *et al.*

Dando sequência nas modelagens empíricas, utilizando parâmetros adimensionais, Lee e Ro (2002) propuseram a seguinte correlação:

$$\rho_{f,loc} = 0,2416 \left(\frac{x}{D_h Re_{Dh} Sc} \right)^{-0,1819} \omega_a^{-0,5011} Re_{Dh}^{0,0413} Fo_{m;Dh}^{0,251} \left(\frac{T_{tp} - T_w}{T_a - T_w} \right)^{-1,827} \left(\frac{D_{T=T_a}}{D_{T=T_{tp}}} \right)^{-5,591} \quad (1.18)$$

onde D é a difusividade do vapor de água no ar, Sc é o número de Schmidt (v/D , v sendo a viscosidade cinemática), e $Fo_{m;Dh}$ é o número de Fourier para o transporte de massa que considera a difusividade na temperatura do ar. Nessa correlação Lee e Ro buscaram adicionar novos grupos adimensionais e relacionar a densidade da geada ao fenômeno de transporte de massa e não de calor.

O modelo de Mao *et al.* (1993) foi também revisitado por Yang e Lee (2004), que regrediram novos coeficientes para a faixa de temperatura observada em seu experimento ($-35^\circ C < T_w < -15^\circ C$). A correlação obtida tem a seguinte forma:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 1,54 \times 10^{-4} \omega_a^{-0,368} \text{Re}_L^{0,351} \text{Fo}_L^{0,311} \left(\exp \left(\frac{T_a - T_{tp}}{T_a - T_w} \right) \right)^{2,4} \quad (1.19)$$

Destacam-se no modelo de Yang e Lee a mudança para considerar os números de Reynolds e Fourier com base no comprimento da placa e não do diâmetro hidráulico. Além disso, Yang e Lee consideraram a densidade média e não local da geada. Os sinais dos expoentes se mantiveram, indicando uma concordância de tendências. Por fim, a consideração da temperatura adimensional também sofreu mudanças na forma como é calculada, alterando o numerador para a diferença entre a temperatura do ar e o ponto triplo e passando por uma operação exponencial antes da potência. Apesar disso, a tendência de aumento de densidade com o aumento da temperatura da parede observado por Mao *et al.* (1992) foi mantida.

Mais recentemente, Leoni *et al.* (2016) publicaram um trabalho de revisão sobre formação de geada. Utilizando os dados de 6 trabalhos diferentes com um total de 149 pontos experimentais, Leoni *et al.* desenvolveram a correlação que segue:

$$\rho_f = 5,47 \text{Re}_L^{0,16} \left(\frac{c_p(T_a - T_w)}{i_{sv}(\omega_a - \omega_w)} \right)^{0,29} \left(\frac{\omega_w}{\omega_a} \right)^{0,61} t^{0,34} \quad (1.20)$$

o trabalho de Leoni *et al.* se difere um pouco dos demais dessa categoria por incluir um grupo adimensional introduzido por Hermes *et al.* (2014), chamado de Jakob modificado, porém substituindo T_{dew} por T_a . Além disso é o primeiro que traz a razão entre a umidade da parede e umidade do ar como grupo adimensional a ser considerado.

1.4.4 Região de validade das correlações

As correlações apresentadas no grupo t^n apresentam uma natureza empírica, por isso devem ser utilizadas com cautela, apenas para a região na qual os dados foram ajustados. As correlações da classe $\sqrt{t}$, por serem obtidas através de uma análise de escalas, tem uma natureza mais física. Assim como as correlações da classe T_f , em especial a correlação de Kandula (2012), que possuem recursos que lhe conferem consistência na modelagem levando a melhor captação de tendências. Desse modo, as correlações da classe $\sqrt{t}$ e T_f podem fornecer previsões razoáveis fora da região de regressão. Nesse contexto, a Figura 9 mostra a região de validade de cada correlação para os principais parâmetros de controle dos experimentos, temperatura de superfície resfriada; umidade, temperatura e velocidade do ar.

Um dos primeiros pontos de destaque na

Figura 9 é o grande intervalo de validade da correlação de Leoni *et al.* (2016). Cabe ressaltar que tal correlação é resultado de uma revisão de diversos trabalhos experimentais, e por isso acaba absorvendo os intervalos máximos dos trabalhos consultados. Seguindo a análise, e observando o gráfico para a temperatura de superfície resfriada da Figura 9, é possível perceber que todas as correlações apresentadas utilizam resultados experimentais em um intervalo habitual para evaporadores de refrigeradores, que varia entre -40°C a -10°C. Para a umidade absoluta do ar, as únicas correlações que atingem valores próximos a condições de evaporadores domésticos (<3 g/kg) são as de Mao *et al.* (1999), Wang *et al.* (2011) e Leoni *et al.* (2016) (que utiliza os resultados de Wang *et al.*). A temperatura do ar se apresenta como ponto mais crítico, devido a dificuldades experimentais na umidificação e controle do ar a temperaturas inferiores a 0°C, que é a zona de trabalho para evaporadores domésticos. Isso é confirmado pelo fato de apenas três trabalhos apresentam resultados nessa região, Mao *et al.* (1999) e Wang *et al.* (2011) e Leoni *et al.* (2016). Por fim, a velocidade do ar em evaporadores domésticos usualmente fica abaixo de 1 m/s, condição que é observada em quase todos os trabalhos, com a exceção de Tokura (1988), Mao *et al.* (1993) e Wang *et al.* (2011). Desse modo, o único trabalho com resultados experimentais que atende a condições habituais de trabalho de evaporadores domésticos para todas as variáveis de controle é o de Mao *et al.* (1999).

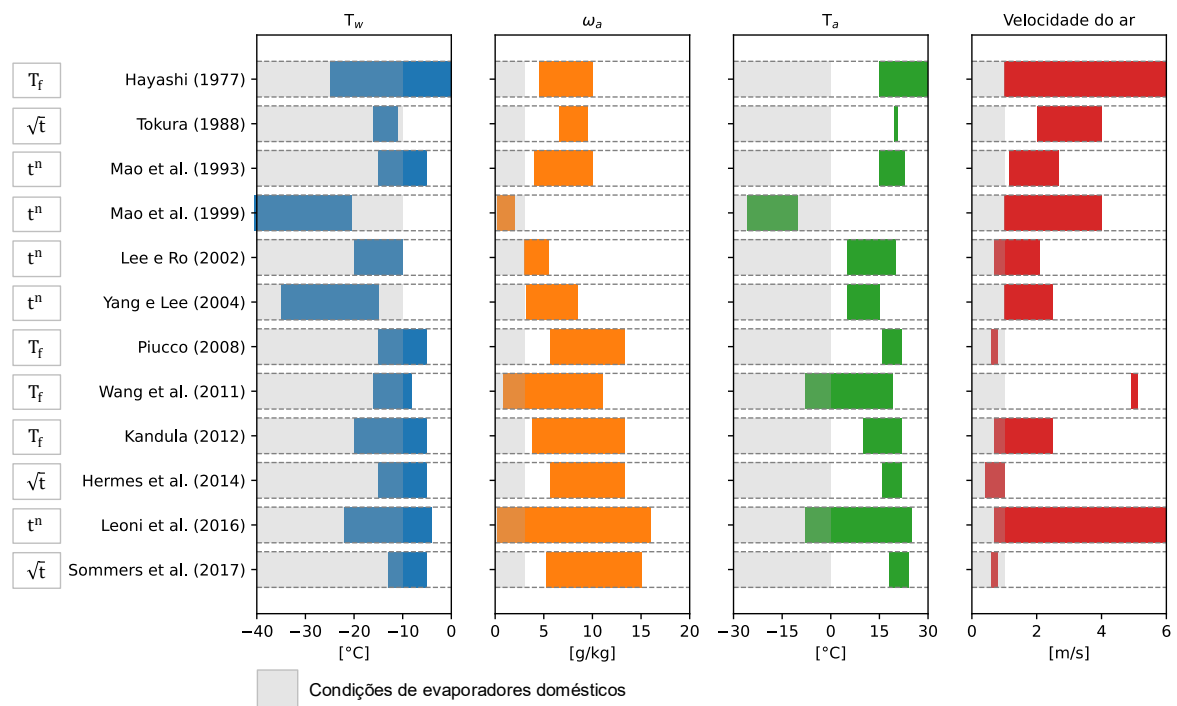


Figura 9 – Intervalo de validade para cada correlação de densidade da geada

Para melhor visualizar o atendimento a região de interesse - operação de evaporadores domésticos - a zona de validade para cada correlação foi representada em gráficos, expostos nas Figura 10 e 11, com mesmos eixos do diagrama de Nakaya. A Figura 10 conta com as regiões de validade das correlações baseadas na temperatura de superfície da geada e na raiz do tempo. Observa-se que, para essas classes, apenas a correlação de Wang *et al.* (2011) consegue cobrir uma parte expressiva da região de interesse. Enquanto para as demais, apenas as correlações de Kandula *et al.* (2012) e de Hayashi (1977) tem uma pequena intersecção com aplicações típicas de refrigeradores domésticos.

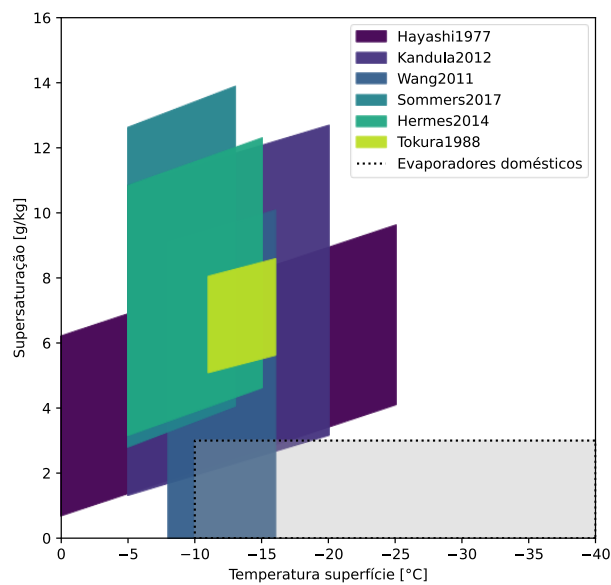


Figura 10 – Região atendida por cada correlação de densidade, classes T_f e $\sqrt{t}$

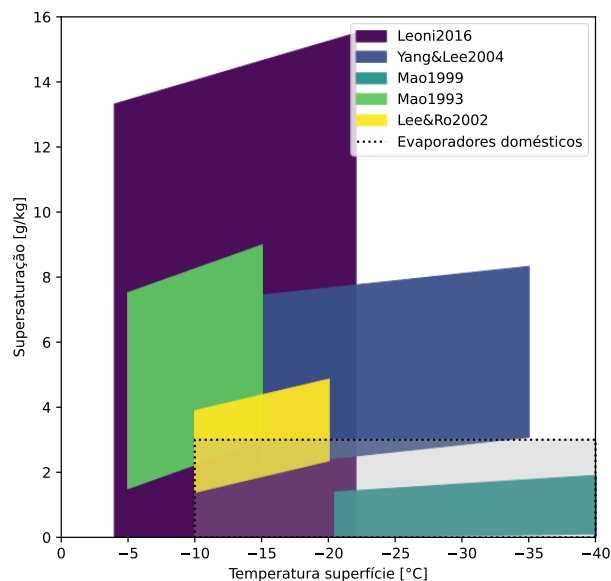


Figura 11 – Região atendida por cada correlação de densidade, classe t^n

Na Figura 11, que conta com correlações baseada em t^n , a intersecção é maior, com todos os trabalhos atendendo pelo menos em parte a região de interesse. Destaca-se mais uma vez o trabalho de Mao et al. (1999), que atende a uma grande zona não alcançada por nenhuma outra correlação, no centro da região de interesse.

1.4.5 Análise quantitativa das correlações

Com o objetivo de analisar e comparar de maneira quantitativa as correlações disponíveis, foram escolhidas 3 delas para realizar uma análise de sensibilidade com relação aos parâmetros de entrada. Para facilitar a comparação foram escolhidas correlações sem dependência com a temperatura de superfície da geada, uma vez que seria necessário um modelo completo de formação de geada para compará-la apropriadamente com as correlações de $\sqrt{t}$ e t^n . Destes dois grupos foram escolhidas as duas correlações mais recentes para t^n , Yang e Lee (2004) e Leoni *et al.* (2016), e a correlação de Hermes *et al.* (2014) do grupo $\sqrt{t}$, uma vez que a correlação de Sommers *et al.* (2017) leva em conta parâmetros como o ângulo de contato da superfície, que não é explorado nas outras correlações. A análise foi realizada considerando fixos para as 3 correlações os seguintes parâmetros: temperatura do ar (15°C); tempo (120 min); velocidade (1 m/s); e comprimento da placa (0,3 m). Esses valores foram escolhidos de modo a atingir a intersecção de validade das três correlações. O valor de temperatura da superfície foi então variado entre -40°C e 0°C, juntamente com a umidade absoluta do ar, que variou entre 1 g/kg até 11 g/kg. Os resultados para as correlações de Yang e Lee (2004), Hermes *et al.* (2014) e Leoni *et al.* (2016) são apresentados nas Figuras 12, 13 e 14, respectivamente.

Os gráficos apresentam a temperatura de superfície no eixo das abscissas (x) e a umidade absoluta do ar no eixo das ordenadas (y). As cores, por sua vez, representam o valor de densidade obtido pelas correlações. Foram também ilustradas isolinhas de densidade constante para auxiliar na análise quantitativa dos trabalhos. Além disso, as isolinhas auxiliam na leitura de densidade para regiões onde os valores extrapolam a escala máxima de cores. A Figura 12 mostra que, dentro da região de validade, a correlação de Yang e Lee fornece resultados entre ~40 e 150 kg/m³. Ademais, percebe-se um aumento da densidade com o aumento da temperatura de superfície, assim como visto em outros trabalhos, e uma redução da densidade com o aumento da umidade absoluta, resultado esperado pela análise do crescimento dos cristais.

A Figura 13 conta com os resultados para a correlação de Hermes *et al.* (2014). Em

uma primeira análise é evidente que os resultados de Hermes *et al.* possuem valores de densidade bem inferiores aos de Yang e Lee (2004). Porém analisando a região de validade, percebe-se uma certa concordância entre os dois trabalhos, com a correlação de Hermes *et al.* (2014) variando de 100 a 200 kg/m³, valores factíveis para a geada. Observando as tendências, tem-se que a densidade aumenta com a temperatura de superfície (assim como em Yang e Lee), no entanto, há também um aumento de densidade com o aumento de umidade absoluta, em oposição ao trabalho de Yang e Lee.

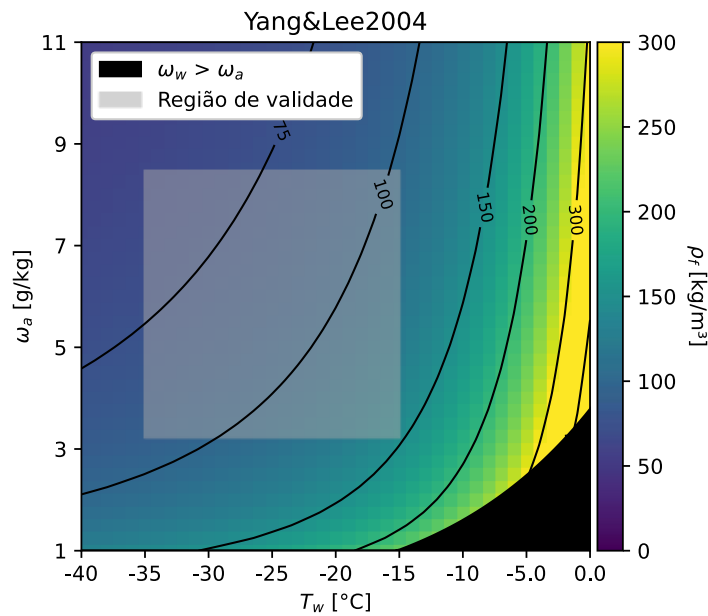


Figura 12 – Valores de densidade de geada para a correlação de Yang e Lee (2004)

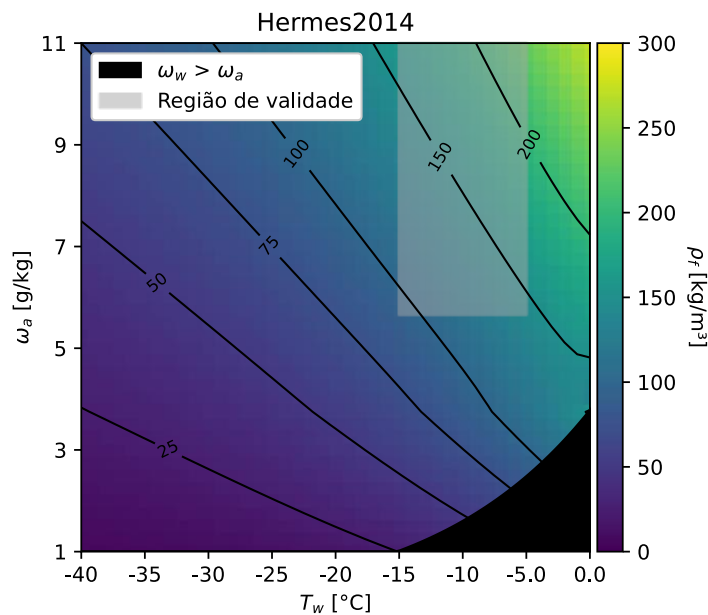


Figura 13 – Valores de densidade de geada para a correlação de Hermes (2014)

A correlação de Leoni *et al.* (2016) é analisada na Figura 14, indicando os maiores valores de densidade entre as três correlações. Destaca-se aqui que, mesmo dentro da região de validade, existem pontos onde a previsão para a densidade de geada excede a própria densidade do gelo, o que é impossível fisicamente. Isso pode ser atribuído ao fato da correlação agregar diferentes trabalhos e considerar os extremos de cada um deles sua região de validade. Combinando valores extremos de umidade e temperatura do ar, e temperatura de superfície, é possível chegar a uma grande região de validade, mas que na verdade possui muitas zonas sem pontos experimentais correspondentes, o que pode levar a resultados absurdos, indicando que essa correlação deve ser utilizada com muita cautela. Em relação às tendências, o aumento da temperatura de superfície aumenta a densidade (assim como as outras correlações); enquanto o aumento da umidade absoluta leva à sua redução, assim como a correlação de Yang e Lee (2004).

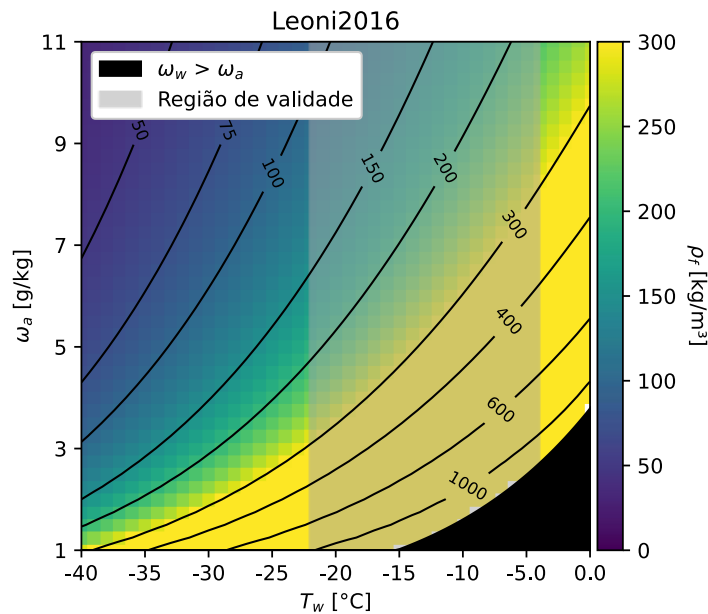


Figura 14 – Valores de densidade de geada para a correlação de Leoni *et al.* (2016)

Por fim, é realizada, na Figura 15, uma comparação da diferença percentual entre o valor obtido com cada uma das correlações. No primeiro gráfico da figura, são comparadas as correlações de Leoni *et al.* (2016) e Yang e Lee (2004), onde é destacada a região onde ambas as correlações possuem validade. Para essa região os erros variam de 50 a 150%, mostrando a grande diferença entre as correlações, mesmo considerando a região de validade de ambas. A mesma análise, agora considerando Leoni *et al.* (2016) e Hermes *et al.* (2014), mostra mais uma vez grandes variações, chegando até 150%. Porém para grandes umidades relativas do ar existe uma boa concordância entre os dois trabalhos.

No último gráfico da figura tem-se a comparação final, entre Hermes *et al.* (2014) e Yang e Lee (2004). O gráfico se destaca pois, apesar de ser apenas uma pequena região, a intersecção das regiões de validade apresenta resultados similares entre as duas correlações, com diferenças de até 25%. Isso indica que os trabalhos de Hermes *et al.* (2014) e Yang e Lee (2004) foram mais conservadores e geraram correlações para a faixa de validade que de fato representam a densidade da geada.

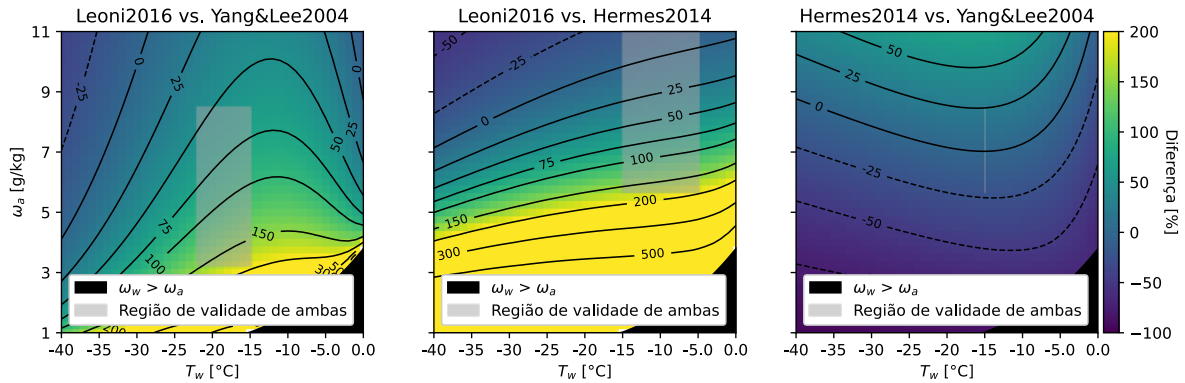


Figura 15 – Comparação gráfica entre correlações para densidade de geada

1.5 ESPESSURA DA GEADA

Em aplicações de refrigeração doméstica, o parâmetro de maior relevância da geada é a sua espessura, pois é ela que vai determinar o ponto de bloqueamento do evaporador e a consequente queda acentuada da capacidade de refrigeração. Ao longo dos anos, diversas estratégias de modelagem da espessura da geada foram propostas. Essas abordagens diferem em termos de complexidade de implementação, custo computacional e precisão. Este capítulo irá explorar essas estratégias, detalhando suas características e especificidades, a fim de apresentar um panorama das soluções disponíveis.

1.5.1 Modelo de Piucco (2008)

A solução proposta por Piucco consiste em um modelo matemático simplificado para placa plana que buscou incorporar as melhores estratégias de modelagem disponíveis na literatura à época. Este modelo se baseia em uma abordagem combinada, extraindo elementos de três trabalhos fundamentais. Do trabalho de Lee et al. (1997), incorporou-se o coeficiente de absorção de vapor e a integração analítica das equações diferenciais obtidas dos balanços de massa e de energia no interior da camada de geada.

Adicionalmente, dos trabalhos de Na e Webb (2004a,b), foram incorporadas algumas características de meio poroso, como porosidade e tortuosidade, ao coeficiente de difusão. Por fim, do trabalho de Hayashi (1977), empregou-se uma correlação empírica para o cômputo da densidade da geada $\rho_f = a \exp(bT_s + cT_w)$, o que permitiu que a taxa de adensamento fosse calculada de maneira analítica.

O trabalho de Piucco realiza um balanço de energia na superfície da geada. Nele a condução do meio é igualada à transferência de calor do ar mais a energia de dessublimação de água para crescimento da geada. Esse balanço de energia incorporado ao balanço de massa da equação (1.1), leva a seguinte expressão:

$$\frac{b\delta_f i_{sv}}{k_f} m_c''^2 + \left\{ h_c(T_a - T_f) \frac{b\delta_f}{k_f} + 1 \right\} m_c'' + h_m(\omega_a - \omega_f) = 0 \quad (1.21)$$

onde b é o coeficiente da expressão para densidade e m_c'' é o fluxo mássico de crescimento da geada. Resolvendo a equação do segundo grau chega-se ao valor de m_c'' , que é utilizado para se obter a taxa de crescimento da geada:

$$\frac{d\delta_f}{dt} = \frac{m_c''}{\rho_f} \quad (1.22)$$

Integrando o termo mencionado, é possível determinar a espessura da geada ao longo do tempo. Nota-se, porém, que as equações descritas dependem da temperatura da superfície da geada, a qual aumenta com o aumento da espessura. Dessa maneira, com base em balanços de energia e massa, deduz-se uma expressão para a distribuição de temperaturas ao longo da geada, o que permite determinar a temperatura da superfície:

$$T_f = T_w + \frac{q_t'' \delta_f}{k_f} - \frac{i_{sv} \rho_{air} D \varepsilon \omega_w}{k_f \psi} \left(\frac{\omega_f}{\omega_w} - 1 \right) \quad (1.23)$$

onde D é a difusividade do vapor de água no ar, ε é a porosidade da geada, ψ é a tortuosidade da geada e o calor total é dado por:

$$q_t'' = h_c(T_a - T_f) + i_{sv} m_c'' \quad (1.24)$$

Com a temperatura de superfície da geada é possível também calcular a umidade absoluta nesse ponto considerando uma condição saturada, e assim obter a transferência de massa total:

$$m'' = h_m(\omega_a - \omega_f) \quad (1.25)$$

O modelo proposto por Piucco foi comparado com resultados experimentais, obtendo uma

boa concordância. Porém, os experimentos se afastam das condições de evaporadores domésticos em especial no que se refere a temperatura do ar ($16^{\circ}\text{C} < T_a < 22^{\circ}\text{C}$) e a da parede ($-4^{\circ}\text{C} < T_w < -16^{\circ}\text{C}$). Ainda assim, a sua forte base física permite que ele seja utilizado em condições fora desse intervalo, desde que os coeficientes da densidade sejam regredidos apropriadamente. Do ponto de vista de aplicação, o modelo utiliza a integração temporal explícita ou laço iterativo para determinação da temperatura de superfície da geada, o que o torna caro computacionalmente quando comparado a outras soluções. Porém, por calcular as variações e não os valores integrais de espessura e massa, o modelo permite que sejam absorvidas mudanças de velocidade e condições de entrada de temperatura e umidade, que ocorrem ao longo do processo de formação de geada em um evaporador.

1.5.2 Modelo de Hermes (2012)

O modelo proposto por Hermes sucede o trabalho de Piucco, também para a configuração em placa plana, e utiliza uma modelagem física mais simplificada para a determinação do perfil de temperatura ao longo da camada de geada. Dessa maneira, é obtido um perfil linear de temperatura, característico de um fenômeno de condução pura. Isso, aliado a outras simplificações, permite a construção de um modelo algébrico e explícito para a obtenção da espessura da geada, mas ainda fortemente baseado em fundamentos físicos. Nessa abordagem a espessura da geada é dada por:

$$\delta_f = L \frac{\sqrt{d_1^2 + 4d_0\tau} - d_1}{2} \quad (1.26)$$

onde,

$$d_0 = \Delta\omega \frac{2 + \tilde{T}}{(1 + \tilde{T})(1 + 1/Ja)} \quad (1.27)$$

$$d_1 = \frac{\tilde{k}}{Nu_L} \frac{2 + \tilde{T}}{(1 + \tilde{T})(1 + 1/Ja)} \quad (1.28)$$

nas quais, $\tau = k_{ft}/\rho_f c_p L^2$ é o tempo adimensional, $Ja = \frac{c_p(T_a - T_w)}{i_{sv}(\omega_a - \omega_w)}$ é o número de Jacob modificado, e $\tilde{T} = b(T_a - T_w)$ é a diferença de temperatura adimensional com b sendo o termo presente na correlação $\rho_f = a \exp(bT_s + cT_w)$, utilizada nesse trabalho para calcular a densidade da geada.

O trabalho de Hermes foca na modelagem e faz a comparação com alguns pontos experimentais (7), mas obtém com eles uma ótima concordância, principalmente com relação à evolução temporal da espessura. Os pontos foram obtidos com o ar próximo à condição ambiente (20°C e 80% de umidade relativa) com velocidade de 0,7 a 1 m/s e T_w de -16°C a -4°C. Desse modo, com temperaturas acima das condições de evaporadores domésticos. Porém como a modelagem é fortemente baseada em fundamentos físicos e depende apenas da obtenção de coeficientes para a densidade da geada, o seu uso pode ser considerado para a simulação de evaporadores domésticos, com a vantagem de menor custo computacional, o que facilita, por exemplo, sua implementação em conjunto com ferramentas de CFD (*computational fluid dynamics*) para simulação completa de evaporadores.

1.5.3 Modelo de Loyola *et al.* (2014)

O trabalho de Loyola *et al.* modela a formação de geada em um canal de placas paralelas com uma abordagem iterativa e discretizada no tempo e espaço, com elementos distribuídos ao longo do fluxo de ar. Nesse trabalho, a consideração de saturação na superfície da geada é abandonada, e a distribuição de temperatura e umidade é determinada através da integração de equações diferenciais que modelam o processo de dessublimação. Para as condições de contorno da equação da massa é considerado que, para $y = 0$ a parede é impermeável ($d\omega/dy = 0$) e que nesse ponto a umidade corresponde a saturação na temperatura da parede (T_w). Para a equação da temperatura, é considerado a temperatura de parede ($T = T_w$) em $y = 0$, e em $y = \delta_f$ é aplicado a continuidade do fluxo de calor com a troca com o ar. Além disso, o trabalho utiliza a correlação de densidade proposta por Hermes *et al.* (2014), com a sua derivada utilizada para determinar as distribuições de temperatura e umidade:

$$\frac{d\rho_f}{dt} = \rho_i \frac{CJa^{-n}}{2\sqrt{t}} \quad (1.29)$$

$$T_f = T_w + \frac{q_t''\delta_f}{k_f} - \frac{i_{sv}}{k_f} \frac{d\rho_f}{dt} \frac{\delta_f^2}{2} \quad (1.30)$$

$$\omega_f = \omega_w - \frac{1}{\rho D} \frac{d\rho_f}{dt} \frac{\delta_f^2}{2} \quad (1.31)$$

onde C e n são os coeficientes para a correlação de densidade, obtidos de dados

experimentais. É interessante notar a semelhança da equação para a temperatura de Loyola *et al.* com a utilizada por Piucco (2008), com uma diferença apenas no último termo, que no trabalho de Loyola *et al.* pode ser escrito em função da variação da densidade, devido ao uso de uma correlação direta em dependência com o tempo.

Para solução do modelo é adotado o seguinte procedimento: inicia-se na célula de entrada do canal; são determinados os valores de T_f e ω_f e os fluxos mássico e de calor de forma iterativa; uma vez convergido a célula, o modelo calcula a deposição de massa e crescimento da geada e determina a condição de entrada para o próximo elemento, e avança na malha; ao atingir o último elemento o modelo avança um instante de tempo, repetindo o processo até o final estipulado.

O artigo tem como foco a modelagem e apresenta uma validação experimental limitada, com apenas 4 pontos avaliados. Apesar disso, os resultados indicam uma boa concordância entre experimento e simulação para condições que se aproximam àquelas de evaporadores domésticos: $-24^{\circ}\text{C} < T_w < -10^{\circ}\text{C}$; $6^{\circ}\text{C} < T_a < 12^{\circ}\text{C}$; e $u = 1 \text{ m/s}$. Cumpre salientar que esse também se trata de um modelo físico que pode ser utilizado fora desses limites, desde que a correlação da densidade da geada seja obtida de maneira apropriada e reflita a física do fenômeno.

1.5.4 Modelo de Hermes *et al.* (2018)

Baseado nas equações para crescimento e adensamento de geada e em observações experimentais Hermes *et al.* (2018) propuseram a seguinte correlação para a espessura de geada no tempo:

$$\delta_f = c_1 \Delta T_s^n \sqrt{t} + \frac{c_3 + c_2 \Delta T_s}{\sqrt{t}} \quad (1.32)$$

onde n, c_1, c_2, c_3 são coeficientes para serem regredidos com base nos dados experimentais. Nota-se que a correlação é fortemente baseada no super-resfriamento e que, para valores de tempo elevados, a espessura da geada é proporcional a $\sqrt{t}$. O segundo termo da correlação, com a divisão por $\sqrt{t}$, tem o intuito de modelar a chamada nucleação prévia e o atraso de nucleação. O trabalho atribui a nucleação prévia à dessublimação que pode ocorrer antes do início do teste experimental. O atraso de nucleação, por sua vez, é atribuído a efeitos da superfície, que podem retardar o processo de deposição de geada.

A correlação foi regredida utilizando uma expressiva base experimental de 66 testes conduzidos nas seguintes condições: $-20^{\circ}\text{C} < T_w < -10^{\circ}\text{C}$; $5^{\circ}\text{C} < T_a < 16^{\circ}\text{C}$; $1 \text{ m/s} <$

$u < 2$ m/s; e umidade relativa de 80%. Assim, com valores em geral próximos a condição de evaporadores domésticos, mas com umidades absolutas relativamente elevadas. O modelo proposto se destaca por sua rapidez e facilidade de uso, uma vez que é possível obter explicitamente a espessura da geada em qualquer instante de tempo apenas alimentado o valor do super-resfriamento e o tempo desejado. Ele também indica que a natureza da velocidade do crescimento da geada está intimamente relacionada com ΔT_s .

É interessante notar que o estudo não identificou uma correlação entre a espessura da geada e o ângulo de contato da superfície, que variou de 60° a 123°. Esse resultado pode ser atribuído ao fato de que, após o início do processo de formação, a deposição da geada ocorre sobre camadas de geada preexistentes, em vez de diretamente sobre a superfície da placa. Portanto, a superfície possui pouca influência na espessura final da geada.

1.5.5 Modelo de Hollon *et al.* (2023)

O trabalho de Hollon *et al.* é uma continuação direta do trabalho de Hermes (2012), com a diferença de que utiliza correlações de densidade para geada baseadas no tempo e não na temperatura de superfície. Isso permite a determinação explícita da espessura de geada sem a necessidade de iterações, conforme a seguinte equação:

$$\frac{x}{L} = \frac{-b_1 \left(2 - \frac{b_2}{b_0 + b_2} \right) + \sqrt{b_1^2 \left(2 - \frac{b_2}{b_0 + b_2} \right)^2 + 4b_1b_3(2b_0 + b_2)\tau}}{2b_1b_3} \quad (1.33)$$

onde,

$$\tau = \frac{k_f t}{\rho_f c_p L^2} \quad (1.34)$$

$$b_0 = \frac{Nu_L \Delta \omega}{\tilde{k}} \quad (1.35)$$

$$b_1 = 1 + \frac{2\alpha}{1 - \alpha} \quad (1.36)$$

$$b_2 = \frac{Nu_L \Delta \omega}{\tilde{k}} \left(\frac{2\alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (1.37)$$

$$b_3 = \frac{Nu_L}{\tilde{k}} \left(1 + \frac{1}{Ja} \right) \quad (1.38)$$

$$Ja = \frac{c_p(T_a - T_w)}{i_{sv}(\omega_a - \omega_{sat}(T_w))} \quad (1.39)$$

onde c_p é o calor específico do ar úmido; Nu_L é o número de Nusselt baseado no comprimento da placa L ; $\tilde{k} = k_f/k_a$ é a condutividade adimensional definida como a razão entre a condutividade térmica da geada e do ar; α é o expoente do tempo na correlação de densidade utilizada; e Ja é o número de Jakob modificado. No modelo de Hollon *et al.* (2023) o número de Nusselt é obtido pela correlação $Nu = 0,037Re^{0,8}Pr^{0,43}$ (Lienhard, 2005) e a condutividade da geada foi considerada constante igual a 0,132 W/mK (Hermes *et al.*, 2019). O trabalho compara resultados obtidos com diferentes correlações para a densidade com uma expressiva base de dados que reúne experimentos de diferentes publicações. Destaca-se, na análise, a correlação de Yang e Lee (2004) que, quando utilizada, gerou a melhor concordância com os experimentos.

1.6 IMPACTO DAS PROPRIEDADES DA GEADA EM SUA ESPESSURA

Para verificar o impacto das propriedades da geada e transferência de calor e de massa em sua espessura, optou-se por implementar um modelo presente na literatura. O modelo escolhido foi o de Hollon *et al.* (2023), devido ao fato de ser um dos trabalhos mais recentes e agregar os últimos avanços na área, e principalmente, por sua característica não iterativa, o que permite a sua fácil implementação para uma primeira análise de sensibilidade.

Utilizando o modelo foram comparadas as 3 correlações analisadas previamente. Primeiramente, as correlações foram analisadas para a sua região de validade, com velocidade do ar igual a 1 m/s; temperatura do ar igual a 15 °C; umidade absoluta do ar de 7 g/kg; e temperatura da parede igual a -15°C. A formação de geada foi avaliada para um tempo de 600 minutos e a Figura 16 mostra os resultados. Para o instante de tempo final a diferença entre os modelos que realizaram a previsão da geada mais fina e espessa foi de 73%, o que indica que mesmo dentro da região de validade podem ocorrer grandes diferença para a previsão de espessura. Ainda assim, são todos valores dentro da mesma ordem de grandeza.

Ainda que estejam fora da região de validade, optou-se por avaliar a capacidade de

previsão das correlações para condições usuais de evaporadores domésticos. Considerou-se a velocidade do ar igual a 0,5 m/s; temperatura do ar igual a -15 °C; umidade absoluta do ar de 1,44 g/kg; e temperatura da parede igual a -25°C. Os resultados estão ilustrados na Figura 17, que revela uma diferença enorme entre as previsões. A diferença entre as previsões da geada mais fina e espessa foi de 100 vezes. A correlação que mais parece obter valores razoáveis é a de Hermes *et al.* (2014). Embora tenha sido regredida para uma região muito longe da aplicação de evaporadores domésticos, ela carrega características físicas, o que melhora a qualidade de sua extrapolação. A análise dos resultados da Figura 17 permite dizer que as correlações disponíveis na literatura, em geral, não conseguem descrever a densidade e, por consequência, o crescimento da geada em condições típicas de evaporadores domésticos.

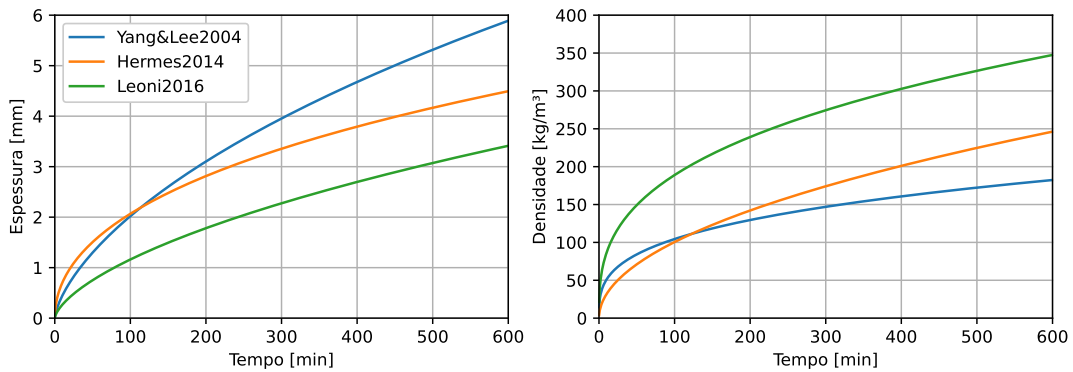


Figura 16 – Previsão de δ_f com correlações de ρ_f da literatura (região de validade).

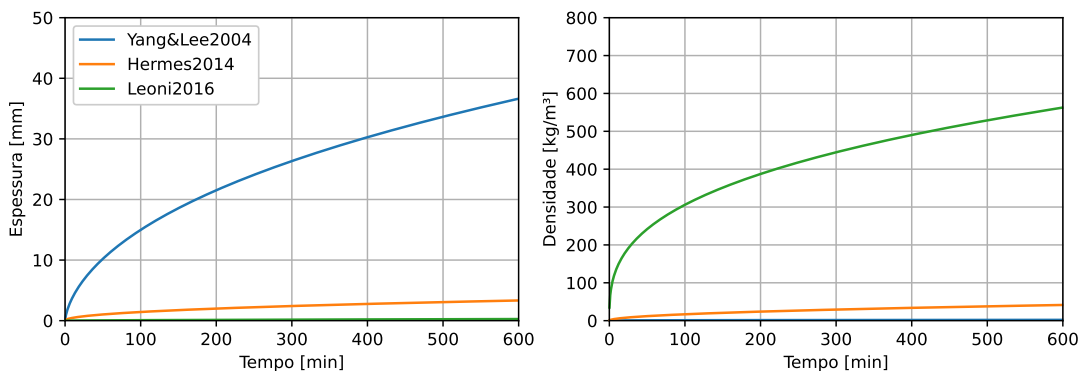


Figura 17 – Previsão de δ_f com correlações de ρ_f da literatura (condição de evaporadores).

Por fim, o modelo implementado foi utilizado para realizar uma análise de sensibilidade (Figura 18), utilizando com base a correlação de Hermes *et al.* (2014). Para a densidade da geada notou-se uma quase linearidade com espessura, sendo que dobrar a densidade acarretou uma queda de 48% na espessura. Para o número de Nusselt o efeito

foi um pouco menos expressivo, com um aumento de 69% quando seu valor foi dobrado. O efeito da condutividade térmica da geadas por sua vez foi expressivamente menor, com uma redução de 6% na espessura quando a condutividade foi reduzida pela metade. Desse modo, fica claro a importância da boa modelagem da densidade para determinação adequada da espessura da geadas.

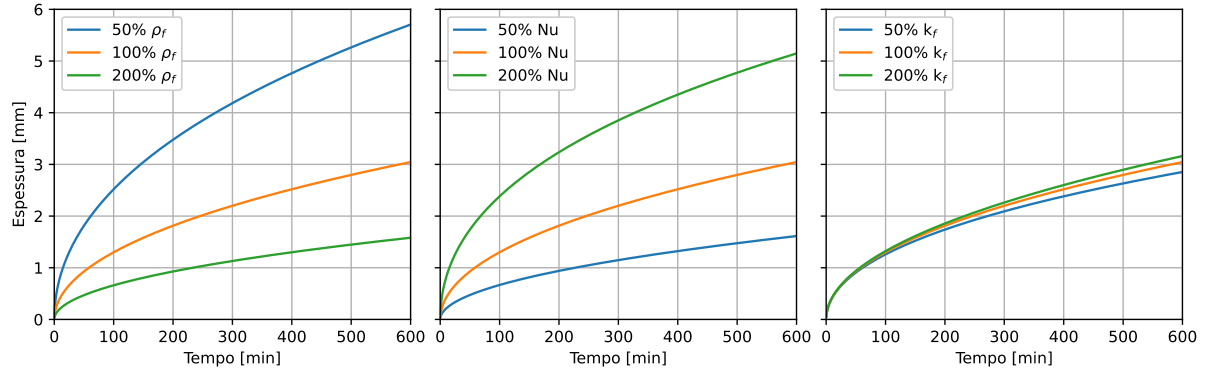


Figura 18 – Efeito das propriedades sobre a espessura da geadas.

1.7 OBJETIVOS E METODOLOGIA

A formação de geadas representa um grande desafio de engenharia, não só por estar presente em refrigeradores domésticos (Da Silva, 2012), mas também em trocadores de calor ar-ar de aeronaves (Hollon *et al.*, 2023) e bombas de calor (Chung *et al.*, 2019), entre outras aplicações. Devido a isso, o número de trabalhos na área é vasto. Porém, como mostrado, apesar de existirem numerosas correlações para a densidade de geadas, pouquíssimas possuem intervalos de validade relevantes para aplicações de refrigeradores domésticos. Além disso, mostrou-se a grande importância desse parâmetro na modelagem da espessura da geadas ao longo do tempo. O que deixou ainda mais claro que as correlações mais atuais existentes na literatura levam a modelos que chegam a possuir uma divergência de 2 ordens de grandeza entre seus resultados. Nesse contexto, o objetivo geral do presente trabalho consiste em: *desenvolver uma correlação com bases físicas para a previsão da densidade de geadas em condições de operação típicas de evaporadores domésticos*. As correlações serão então utilizadas nos modelos para espessura da geadas descritos a fim de verificar os resultados e determinar o modelo mais adequado disponível na literatura para a aplicação de refrigeradores domésticos. Desse modo, os seguintes objetivos específicos, que definem a metodologia do trabalho, serão perseguidos:

- Desenvolver e validar um aparato experimental, utilizando um canal de

placas planas paralelas que simula canais de aletas de evaporadores, com o propósito de medir e determinar experimentalmente a densidade da geada formada sob condições operacionais típicas de evaporadores de sistemas de refrigeração doméstica;

- Geração de uma base de dados experimentais confiável para a densidade de geada em diferentes condições morfológicas.
- Obtenção de uma correlação experimental, de base física, para a densidade da geada em função das variáveis operacionais, que seja capaz de prever, com um erro satisfatório, os dados experimentais.
- Avaliação e validação da correlação para o uso em modelos de formação de geada existentes.
- Avaliação, com base nos dados experimentais obtidos, dos modelos para determinação de espessura de geada disponíveis na literatura.

1.8 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos principais, estruturados da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução: Apresenta a contextualização do problema da formação de geada em refrigeradores domésticos, os fundamentos físicos da nucleação, crescimento e morfologia dos cristais de gelo. Realiza-se uma revisão bibliográfica das correlações existentes para a densidade da geada e dos modelos para previsão de espessura, identificando as lacunas que motivaram este trabalho. Por fim, definem-se os objetivos.
- Capítulo 2 – Trabalho Experimental: Descreve o aparato experimental desenvolvido (túnel de vento vertical), incluindo os subsistemas de controle de vazão, condicionamento psicrométrico e da superfície de teste. Apresenta-se a matriz de testes baseada em condições de refrigeradores e discute-se a validação e repetibilidade da bancada.
- Capítulo 3 – Resultados Experimentais: Discute os dados obtidos experimentalmente, analisando isoladamente a influência dos parâmetros operacionais ($\Delta\omega$, ΔT_s , OT , u , F_p) sobre a massa, espessura e densidade da geada. Aborda-se também a evolução temporal do fenômeno, com ênfase no

comportamento em "S" da espessura observado nos estágios iniciais de crescimento.

- Capítulo 4 – Modelos para Formação de Geada: Propõe uma nova correlação semiempírica para a densidade da geada, comparando-a com modelos da literatura. Avalia-se o desempenho de diferentes modelos físicos para a previsão da espessura e massa da geada, propondo também um modelo simplificado. Adicionalmente, valida-se a aplicação do modelo de Hermes (2012) para a previsão da variação de espessura ao longo de canais extensos.
- Capítulo 5 – Conclusões: Sintetiza as principais conclusões obtidas ao longo do estudo, retomando os objetivos propostos e destacando as contribuições do trabalho. Por fim, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que possam dar continuidade à linha de pesquisa.

2 TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Para que a influência de diferentes condições operacionais sobre a densidade da geada formada em canal de placas paralelas pudesse ser analisada, um aparato experimental inédito foi construído. Visando controlar as condições do ar: velocidade, temperatura e umidade, e representar a disposição típica de evaporadores optou-se por construir um túnel de vento fechado na posição vertical, de modo que o fluxo de ar incide sobre a superfície de formação de geada pela parte inferior. Para garantir o isolamento e reduzir as pontes térmicas, o túnel foi projetado todo em EPS, com uma parede de 100 mm e dimensão total de 1,2 x 2,5 m. Com o intuito de melhor explicar o funcionamento do túnel foi realizada uma subdivisão do mesmo em 10 subsistemas, onde os 8 primeiros podem ser vistos na Figura 19.

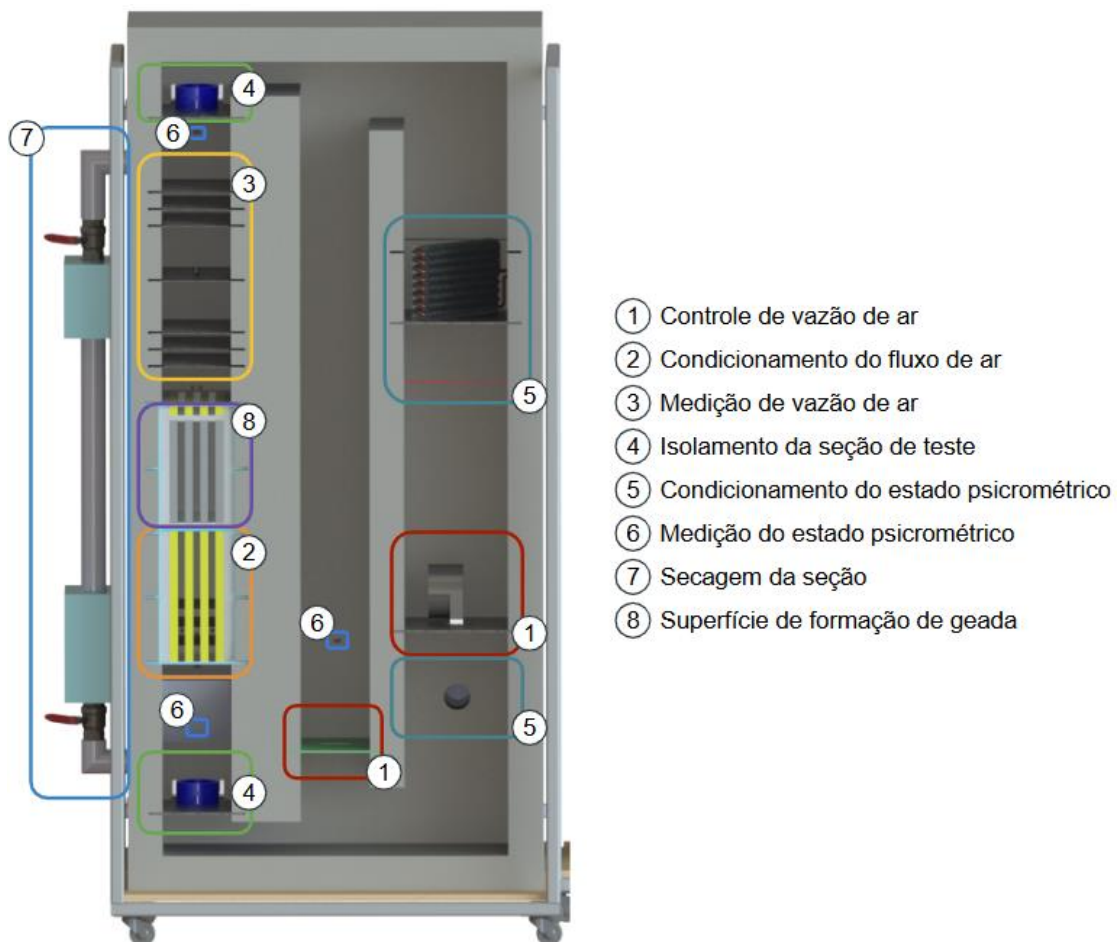


Figura 19 – Representação do túnel utilizado para o estudo de formação de geada

O túnel conta com 3 ramais. O ramal mais a direita da Figura 19, é responsável por condicionar e garantir a vazão de ar, e seu fluxo é descendente. O ramal central atua como *by-pass*, permitindo que a vazão total do túnel seja expressivamente maior que a da seção de testes, o que facilita o controle e condicionamento do ar. Por fim, o ramal mais a esquerda corresponde à seção de testes, onde estão as superfícies sobre as quais será formada a geada. A aquisição de sinais e controle do túnel é realizada por um sistema National Instruments CompactDAQ com 8 entradas para módulos. O aparato experimental tem o objetivo de controlar os seguintes parâmetros: velocidade, umidade absoluta e temperatura do ar na entrada da seção de testes; e temperatura da superfície de formação de geada. Os resultados obtidos ao fim do teste são a espessura e massa de geada. Os dois últimos, fornecimento de potência e controle e aquisição, estão expostos no Apêndice I. Uma análise mais detalhada do desse aparato apresentado é encontrada em Fonseca (2025).

2.1.1 Controle da vazão de ar

Para o controle da vazão de ar foi utilizado um ventilador de velocidade variável modelo EBM G1G126-AC13-50. O ventilador é alimentado com uma fonte contínua de 24V e controlado através de um sinal PWM gerado por um módulo Arduino, que por sua vez é controlado pelo sistema de aquisição. O ventilador consegue controlar a vazão total do túnel, mas para regular a vazão que passa pela seção de testes e pelo *by-pass* é utilizada uma placa com 3 *dampers* em paralelo dotados de um motor de passo controlado através de um driver modelo DRV8825, que tem como entrada um sinal PWM gerado por um módulo Arduino controlado pela aquisição.

2.1.2 Condicionamento do fluxo de ar

Com o intuito de garantir a uniformidade do fluxo de ar na entrada da seção utilizou-se a norma ASHRAE 41.2, própria para medição de vazão de ar. Para garantir a uniformidade do ar a norma recomenda o uso de 3 placas perfuradas em sequência, com uma área livre de 60% a 40%, com uma redução contínua da primeira para a última placa. Assim, adotou-se essa recomendação, com uma adição de dois feltros posicionados entre as placas, a fim de aumentar ainda mais a uniformidade do escoamento. Além disso, após as placas perfuradas há uma zona de desenvolvimento de mesma geometria de seção que a região de testes com 300 mm de comprimento.

2.1.3 Medição da vazão de ar

Para a medição de vazão optou-se por utilizar bocais, onde a diferença de pressão causada pelo fluxo de ar sobre o bocal é medida por transdutores diferenciais e convertida em vazão. Seguindo a norma ASHRAE 41.2, foram utilizadas placas perfuradas, assim como descrito acima, antes e depois do bocal. A norma também prevê uma distância de 38,1 mm para as tomadas de pressão antes e depois do bocal. Além disso, a velocidade mínima no bocal deve ser maior que 14 m/s. Para medição da diferença de pressão foi utilizado um transdutor de pressão Dwyer MSX-W11-IN-LCD com fundo de escala de 1200 Pa e incerteza de 12 Pa. Buscando atender a uma ampla faixa de vazão, são utilizados os bocais de 0,5, 0,75, 1 e 1,5 polegadas, cobrindo assim uma vazão de 8 até 100 m³/h.

2.1.4 Isolamento da seção de testes

Durante o condicionamento da superfície resfriada não deve haver circulação de ar sobre a placa para evitar um processo de nucleação prévia. Porém, durante o decorrer do teste e formação de geada o fluxo de ar deve estar livre para circular no túnel. Assim, para possibilitar a passagem (ou não) de ar na seção principal foram utilizadas 2 válvulas borboleta FF/Epdm 4" com atuador pneumático D/A 63. As válvulas com acionamento pneumático são alimentadas pelo sistema de ar comprimido do edifício onde o túnel está e são controladas por 2 válvulas solenoides 3/2 vias normalmente fechadas. O acionamento das válvulas solenoides é realizado com módulos relés de Arduino controlados pela aquisição.

2.1.5 Condicionamento psicrométrico

O condicionamento psicrométrico do ar é realizado com um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor. O sistema conta com 1 compressor modelo NT 2180GK de 1 hp, 2 evaporadores do tipo *no-frost* operando em paralelo, 1 condensador tubo-aleta resfriado por 1 ventilador axial, e 1 válvula de expansão termostática. A umidificação é realizada através de um umidificador dotado de um ventilador com controle de rotação modelo EBM G1G126-AC13-50 que insufla o ar úmido do compartimento de umidificação para dentro do túnel. Um controle PI atua sobre a velocidade do ventilador, com base na umidade medida no túnel e no ponto alvo desejado. Para evitar o bloqueamento dos evaporadores devido a formação de geada, foram colocadas resistências de silicone de 100

W emaranhadas entre os tubos, uma em cada trocador. As resistências são acionadas por um relê de estado sólido com controle de *duty-cycle* para regulação da potência. Assim, quando a umidificação é ligada, as resistências são ativadas no mesmo momento, o que retarda o processo de bloqueamento. Para o controle preciso da temperatura foram utilizadas duas resistências de 1200 W ligadas em série, com uma potência total de 600 W. As resistências para controle da temperatura são acionadas por um relê de ângulo de fase controlado pelo sistema de aquisição. Para garantir o controle adequado das variáveis o condicionamento é realizado na ordem ilustrada da Figura 19: resfriamento, aquecimento e umidificação. A Figura 23 ilustra o sistema de condicionamento de ar, mostrando o reservatório de água, condensador, compressor, e ventilador axial.

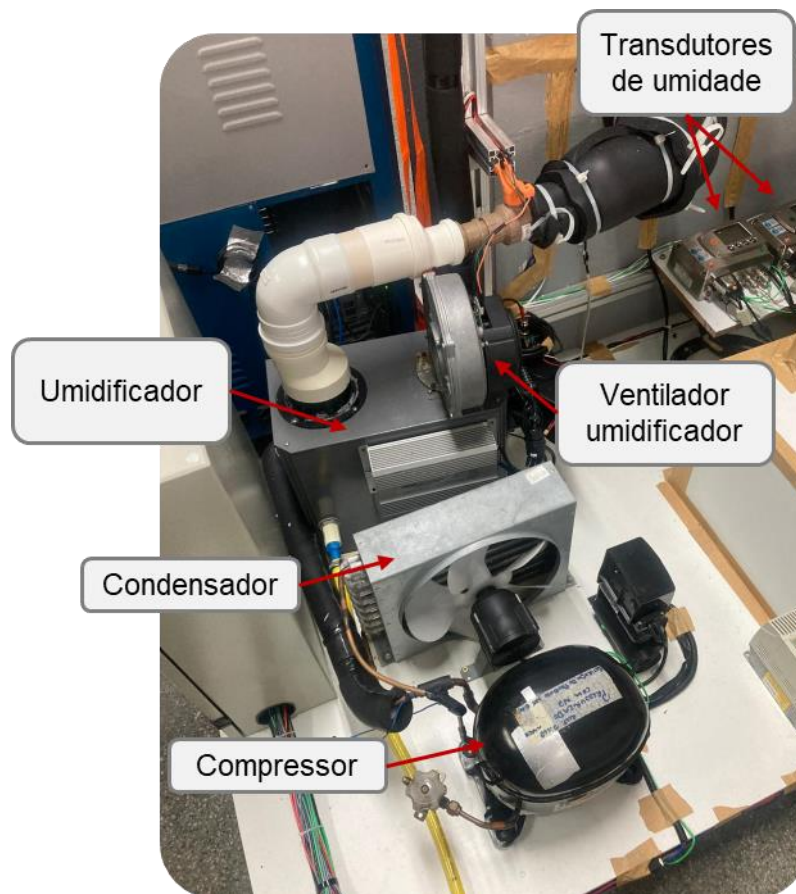


Figura 20 – Sistema de condicionamento psicrométrico do túnel

2.1.6 Medição do estado psicrométrico

Um dos pontos mais críticos do aparato experimental é a correta medição dos estados psicrométricos do ar. Para tanto são utilizados transdutores de umidade e temperatura Testo 6681. Esses sensores foram calibrados especificamente para o presente projeto e

possuem uma incerteza de $\pm 1,7\%$ para a medição do valor de umidade relativa e $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a medição de temperatura de bulbo seco. O túnel conta com 3 desses sensores, um na seção do *by-pass* para avaliar a condição termodinâmica do ar quando a seção principal está fechada, um na entrada da seção de testes e outro na saída, com os quais, juntamente com o valor de vazão, é possível realizar um balanço de massa no ar e obter a formação de massa de geada instantânea, em kg/s. As temperaturas de bulbo seco foram também medidas utilizando termopares, com uma incerteza de $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. O balanço para obtenção da deposição de massa de geada em função do tempo é dado por:

$$m_f = \rho_a V_a (\omega_a - \omega_{out}) \quad (2.1)$$

onde V_a é a vazão de ar, obtida através dos bocais utilizados; e ω_a é a umidade absoluta do ar na entrada e ω_{out} na saída da seção, obtidas com os transdutores de umidade.

2.1.7 Secagem da seção

Para secagem da seção utilizou-se um ramal secundário dotado de um ventilador de recirculação (modelo EBM G1G144-AE13-30) e duas válvulas esfera para isolamento. Durante o experimento, o ramal secundário permanece fechado, através das duas válvulas esfera. Após o fim do degelo, as válvulas são abertas e o ventilador de recirculação é ligado. Com a passagem de ar tanto pelo ramal principal como pelo ramal auxiliar, a umidade do ar migra para ambiente e permite a secagem das placas de formação de geada, que ocorre por mais de 12 horas, garantido um túnel completamente seco para o início do próximo teste.

2.1.8 Superfície de formação de geada

Para garantir uma superfície de formação de geada compatível com o comprimento de uma aleta de um evaporador e com uma temperatura uniforme, optou-se por utilizar uma placa de alumínio resfriada por uma mistura de água e etilenoglicol. Uma peculiaridade da placa escolhida é a ausência de tubos internos, de modo que os canais são feitos diretamente na estrutura da placa. Isso gera desafios de manufatura para garantir a estanqueidade da placa, porém elimina resistências de contato, o que garante uma distribuição mais uniforme de temperatura. A placa utilizada possui 300 x 300 mm e foi

produzida pela Kawaso Texcel. Para verificar a uniformidade da temperatura foi realizado um teste com um fluxo de etileno glicol na entrada da placa a $-23,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Através de 6 termopares de superfície foi então medida a distribuição de temperatura da placa, com os quais obteve-se o campo mostrado na Figura 21, que conta também com uma foto da placa. Observando a Figura 25, nota-se que a distribuição de temperatura é uniforme, com uma variação máxima entre as medidas de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em todos os testes relatados nesse documento, foram utilizadas 3 placas, formando 2 canais, em um total de 4 superfícies de formação, com uma área de superfície total (A_s) de $0,36\text{ m}^2$. O ângulo de contato da placa, medido com um goniômetro, é de 77° .

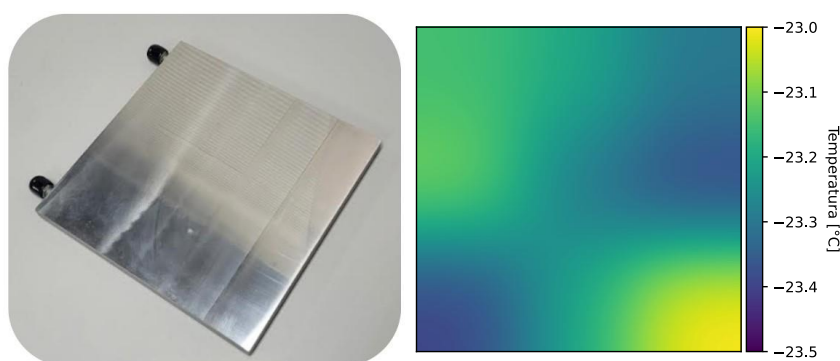


Figura 21 – Superfície de formação de geada (esq.) e sua distribuição de temperatura (dir.)

2.1.9 Condicionamento da superfície de formação de geada

O condicionamento do fluido secundário que irá refrigerar a placa é feito por um banho termostático modificado especificamente para atender as necessidades do projeto. O banho é do modelo Quimis Q214M2. As modificações realizadas foram: alteração do compressor 1/3 HP para um compressor modelo TYA2438ZES de 1 HP operando com R404a; alteração do condensador (tubo-aleta) para um modelo com maior área de superfície; alteração do ventilador para um modelo com maior raio e rotação; alteração da válvula termostática original para uma válvula micrométrica para possibilitar o ajuste manual do superaquecimento; e troca do sistema de controle de temperatura original do banho para um sistema de controle da própria aquisição do túnel (PI).

Devido à alta viscosidade do etilenoglicol a baixa temperatura e a necessidade de uma alta vazão para manter a temperatura da placa refrigerada uniforme, utilizou-se uma bomba dedicada para circulação. A bomba modelo PROCON 113E060F31BA é movimentada por um motor elétrico WEG W22 de $0,75\text{ kW}$, que por sua vez é ligado por um inversor WEG CFW-08 alimentado por rede trifásica e controlado pela aquisição do

túnel. O banho modificado pode ser visto na Figura 22, o conjunto da bomba e motor elétrico está atrás do banho, envolto em uma caixa de proteção branca.

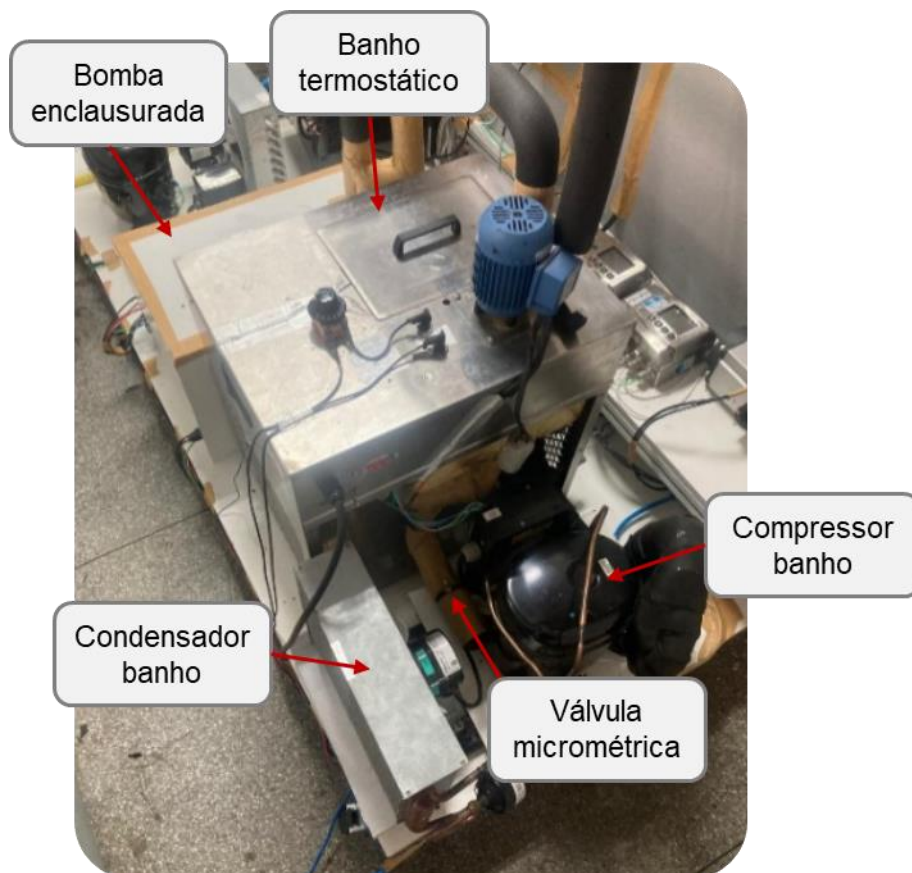


Figura 22 – Sistema de condicionamento da superfície de formação de geada do túnel

2.1.10 Medição da espessura de geada

A medição da espessura da geada foi conduzida por meio de um método indireto de aquisição, binarização e processamento digital de imagens. Para essa finalidade, foi empregada uma câmera Canon EOS 250D, capaz de registrar imagens em uma resolução de 6000x4000 pixels. O equipamento foi montado em um tripé nivelador e posicionado em um módulo projetado para otimizar a qualidade das imagens, apontado diretamente para a seção de testes. As fotografias foram capturadas em modo retrato, visando aproveitar a máxima resolução vertical para abranger toda a extensão das placas resfriadas. O módulo de aquisição também incorporava um conjunto de fitas de LED para iluminação, um painel de vidro com isolamento a vácuo e uma proteção antirreflexo para a lente, garantindo a nitidez e a integridade do registro. A Figura 23 (a) mostra a parte externa do subsistema, enquanto a Figura 23 (b) mostra um esquema em vista superior da parte interna do sistema de medição.

A iluminação foi provida por fitas de LED instaladas nas laterais da seção de testes, adjacentes ao painel de vidro. Este arranjo foi projetado para iluminar apenas a camada superficial da geada depositada sobre as placas resfriadas, minimizando a incidência direta de luz na lente e, conseqüentemente, reduzindo reflexos indesejados. Para reforçar esta precaução, foi instalada uma barreira física na frente da objetiva da câmera, que preveniu que a luz dos LEDs atingisse diretamente o sensor óptico.

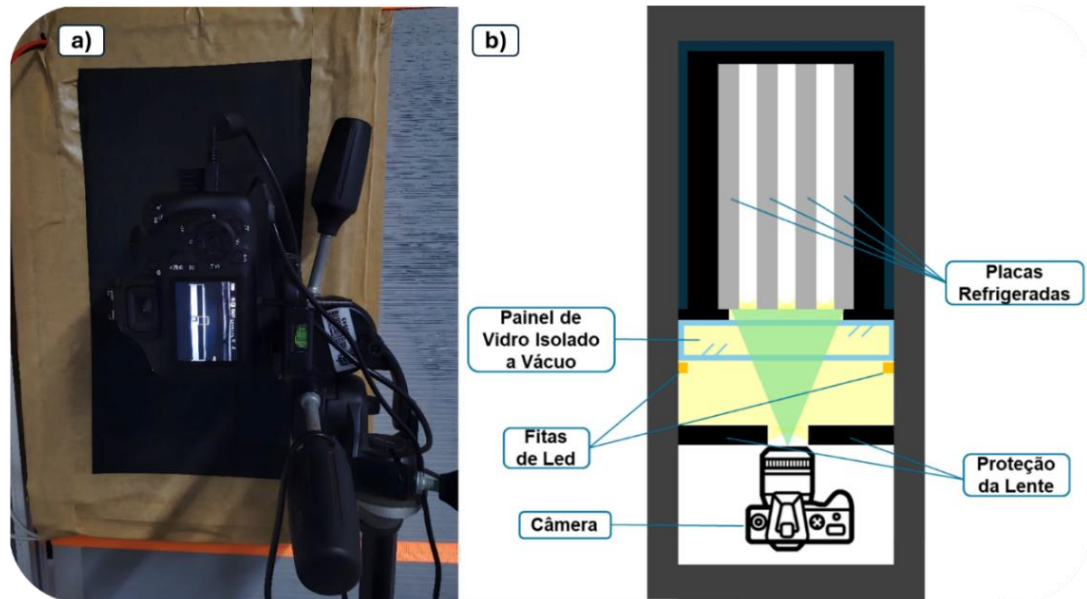


Figura 23 – Sistema de medição de espessura

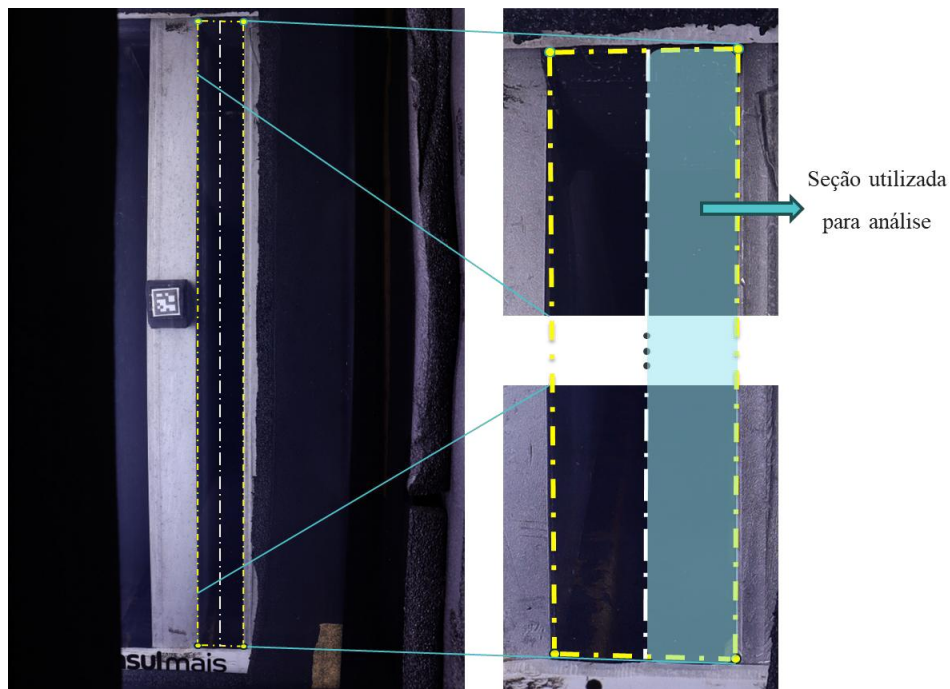


Figura 24 – Captura de imagem da câmera

O painel de vidro com isolamento a vácuo foi fixado ao módulo da seção de testes por meio de braçadeiras de nylon e uma interface de manta elastomérica de células fechadas, garantindo vedação por compressão. Inicialmente, foram avaliadas configurações com múltiplos painéis de vidro em série; contudo, verificou-se que o aumento no número de camadas, embora elevasse o isolamento térmico, intensificava as reflexões internas da iluminação, prejudicando a visualização das superfícies resfriadas. Como resultado, optou-se pela configuração com um único painel de vidro.

Uma imagem capturada pela câmera durante o teste é ilustrada na Figura 24 a esquerda, onde o fluxo de ar é ascendente. Nota-se que com essa configuração é possível visualizar os efeitos de redução de umidade, e possível redução de espessura de geada, ao longo do comprimento da placa. A direita da imagem é ilustrada a região de interesse, onde ocorre a formação de geada. Nota-se que, para garantir o perfeito alinhamento, apenas uma face da placa é medida (metade direita do canal), considerando a formação de geada igual na outra face (mesmas condições).

Com as imagens digitais da região de interesse, é possível proceder à binarização. Esta etapa é essencial, visto que cálculos diretos em imagens coloridas (no espaço de cor RGB) são computacionalmente mais onerosos e dificultam a parametrização. Primeiramente, a imagem é convertida para uma escala de cinza e, em seguida, é gerado um histograma que registra a frequência de ocorrência de cada tom. A separação dos pontos entre as classes "preto" e "branco" pode ser realizada por limiarização (ou *thresholding*) fixa ou por métodos adaptativos. No primeiro caso, um valor constante define a separação entre pixels claros e escuros. Já nas abordagens adaptativas, o histograma da própria imagem é analisado para determinar automaticamente o ponto ótimo de separação entre o fundo e a superfície de interesse.

Lee (2021) definiu que o melhor algoritmo para caracterização da formação de geada é o modelo de binarização de OTSU (1979). Um exemplo de resultado desse método é apresentado pelo histograma da Figura 25 (pico a esquerda fundo, e a direita geada), o qual está associado à binarização apresentada na Figura 26. Com a imagem binarizada completa, é possível realizar a contagem dos pixels para estimar a espessura de geada média que ocupa toda a área da placa. Para isso, é utilizada a seguinte relação:

$$\delta_f = \frac{B - B_{ini} F_p}{P_{ini} 2} \quad (2.2)$$

onde B é o número de pixels brancos da imagem lida; B_{ini} é o número de pixels brancos na imagem inicial; P_{ini} é o número de pixels pretos na imagem inicial; e F_p é o espaçamento

entre as placas. A incerteza do sistema de medição de espessura de geada utilizado foi estimada por Fonseca (2025), com um valor obtido de aproximadamente 0,02 mm.

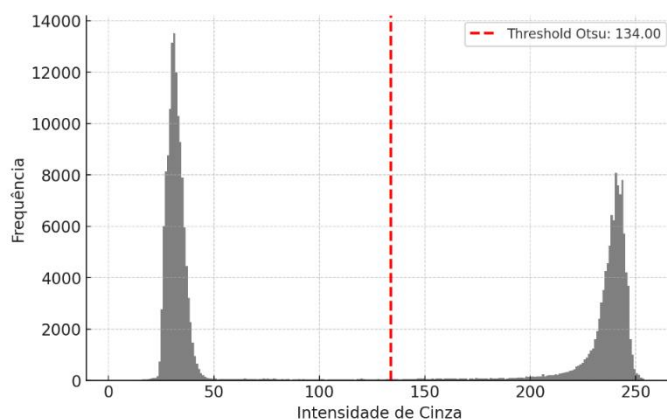


Figura 25 – Histograma de uma imagem binarizada dos testes

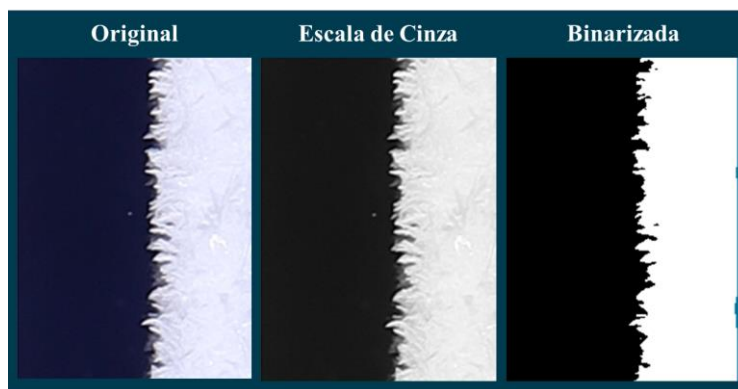


Figura 26 – Resultado de um trecho binarizado

2.2 MATRIZ DE TESTES

Como apresentado no capítulo 1.1, a condição psicrométrica de formação de geada pode ser determinada a partir da definição de três parâmetros: temperatura da superfície resfriada (T_w); diferença de umidade absoluta entre superfície resfriada e ar ($\Delta\omega$); e sobretemperatura do ar (OT). Além dos parâmetros psicrométricos, para a caracterização de um processo de formação de geada é necessário definir também a velocidade do ar (u), e o espaçamento entre placas (F_p), que representa a distância entre aletas em um evaporador. Desse modo, o presente trabalho buscou explorar o impacto da variação de cada um desses parâmetros na espessura, na massa, e por consequência na densidade da geada. É importante notar que um parâmetro possivelmente relevante que não foi variado é o ângulo de contato da superfície, que possui valor similar ao de um evaporador

doméstico³.

Com o intuito de representar de maneira apropriada as condições de um refrigerador doméstico, baseou-se na norma adotada pelos órgãos reguladores brasileiros para determinação de desempenho, a IEC 62552:2020 (Inmetro, 2021). Na norma, o consumo de energia do produto deve ser reportado a -18°C para um compartimento três estrelas (usualmente o freezer) e 4°C para um compartimento dito comida fresca (usualmente o refrigerador). Nessa condição padrão, e considerando que a temperatura do evaporador é, tipicamente, cerca de 7°C inferior à temperatura do freezer, a temperatura média da superfície de troca térmica é calculada em aproximadamente -25°C. Por utilizar um banho termostático (sem expansão direta) para condicionamento da superfície de formação de geada, não foi possível atingir temperaturas tão reduzidas, assim optou-se por realizar os experimentos em temperaturas mais elevadas: -22°C, -14°C e -6°C. Ainda que o ideal fosse alcançar a condição padrão, com os valores apresentados é possível varrer três faixas de morfologia do diagrama de Nakaya, e determinar tendência físicas que podem ser extrapoladas para temperatura menores, de até -30°C, limite normal de operação de um refrigerador doméstico.

Para a determinação de diferenças de umidade de aplicações usuais, tem-se que a umidade absoluta da superfície à -25°C, considerando a saturação, é igual a 0,4 g/kg. A umidade presente no ar, por sua vez, pode ser advinda de dois locais: o freezer e o refrigerador. Considerando as temperaturas padrão e uma umidade relativa de 60% (refrigerador) e 100% (freezer), é obtida uma umidade absoluta de 3 g/kg e 0,8 g/kg, respectivamente. Assim, as diferenças de umidade absoluta ($\Delta\omega$) calculadas são 2,6 g/kg e 0,4 g/kg. Considerando que o potencial de transferência de massa é a própria diferença de umidade absoluta, espera-se que ar advindo do refrigerador forneça cerca de 6 vezes mais massa de geada nessas condições (para mesma vazão), deixando o impacto do freezer pouco expressivo. Assim, adotou-se como patamares para a exploração do nível de umidade absoluta valores próximos a 2,6 g/kg: 1 g/kg, 2 g/kg, 4 g/kg.

O valor de sobretemperatura está inversamente correlacionado com a umidade relativa: quanto maior a umidade relativa, menor é a sobretemperatura. Assim, para uma temperatura do ar de 4°C e umidades relativas de 80%, 60%, 40% os valores de OT são, aproximadamente, 3,1 K, 6,7 K, 11,4 K. Dessa maneira, foram escolhidos como patamares para o teste os valores de 3 K, 5 K e 10 K.

³ O ângulo de contato para a superfície de evaporador típico foi de 70° e para a placa utilizada no túnel foi de 77°, medidos através de um goniômetro digital.

Devido ao fato dos ventiladores presentes dentro de refrigeradores, além de consumirem potência, rejeitarem uma carga térmica em seu interior, existe uma tendência para o uso de componentes com baixos níveis de potência e, conseqüentemente, vazão. Para compensar isso, são necessários trocadores com elevadas áreas de superfície e de face. A combinação desses dois efeitos resulta em uma velocidade de face baixa. Assim, para representar condições similares, foram adotadas as velocidades de 0,5 e 1 m/s para serem avaliadas nos testes do presente trabalho.

Para retardar o processo de bloqueamento do evaporador, é prática usual na indústria utilizar um distanciamento de aletas maior na região de entrada do trocador, uma vez que o ar mais úmido na entrada leva a uma maior formação de geada. Como um distanciamento de 5 mm levaria ao bloqueamento muito acelerado nos testes da bancada experimental, optou-se por observar o efeito da abertura de canal realizando os testes com um espaçamento entre de 10 e 20 mm.

O tempo de teste efetuado é compatível com a frequência de degelo máxima esperada para um refrigerador doméstico, 4 degelos por dia, resultando em 6 horas de formação.

Com base na literatura, observou-se que os parâmetros mais relevantes, e que podem interferir na morfologia da geada, são $\Delta\omega$ e T_w . Por esse motivo todos os níveis de ambos os parâmetros foram cruzados em uma matriz base de nove testes (3x3). Essa matriz foi repetida então para um distanciamento de parede de 20 mm e para uma velocidade do ar de 0,5 e 1 m/s. Para a velocidade de 0,5 m/s foram avaliados as sobretemperatura de 3 e 10 K, enquanto para 1 m/s os níveis utilizados foram 5 e 10 K. Totalizando assim, para um F_p de 20 mm: 3 níveis de T_s , 3 níveis de $\Delta\omega$, 2 níveis de u e 2 níveis de OT, em um conjunto de $3*3*2*2 = 36$ testes apresentados na Tabela 2.

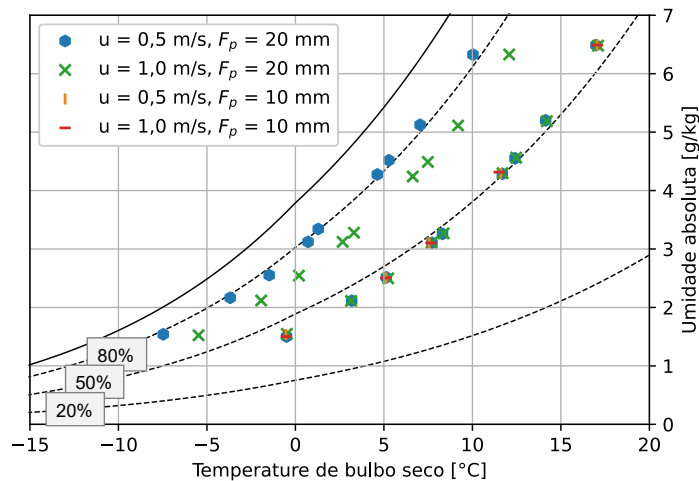


Figura 27 – Pontos experimentais obtidos, representados na carta psicrométrica

Tabela 2 – Matriz experimentais

Teste	F _p [mm]	u [m/s]	OT [K]	T _w [°C]	Δω [g/kg]
1	20	0,50	2,8	-6,0	1,1
2	20	0,50	3,0	-6,0	2,0
3	20	0,50	2,8	-6,1	4,1
4	20	0,50	2,9	-14,1	1,1
5	20	0,50	3,0	-14,1	2,0
6	20	0,50	2,9	-14,0	4,0
7	20	0,50	3,0	-22,2	1,0
8	20	0,50	3,2	-22,0	2,0
9	20	0,50	2,9	-21,7	4,0
10	20	0,50	10,1	-6,1	1,0
11	20	0,50	10,0	-6,0	2,0
12	20	0,50	9,4	-6,1	4,2
13	20	0,50	10,1	-14,2	1,0
14	20	0,50	10,1	-14,1	2,0
15	20	0,50	9,7	-14,0	4,1
16	20	0,50	10,3	-22,1	1,0
17	20	0,50	10,0	-22,4	2,0
18	20	0,50	9,9	-21,2	4,0
19	20	0,99	5,0	-6,1	1,0
20	20	0,99	5,1	-6,2	2,0
21	20	0,99	4,9	-6,2	4,1
22	20	1,00	4,9	-14,2	1,0
23	20	0,99	5,0	-14,2	2,0
24	20	1,00	5,0	-14,0	4,0
25	20	0,99	5,1	-22,3	1,0
26	20	1,00	4,9	-22,1	2,0
27	20	1,00	5,1	-21,8	4,0
28	20	1,00	10,2	-6,1	1,0
29	20	0,99	10,0	-6,1	2,0
30	20	1,00	9,5	-6,2	4,2
31	20	0,99	10,0	-14,1	1,0
32	20	1,00	10,1	-14,1	2,0
33	20	1,00	9,8	-14,1	4,1
34	20	1,00	9,9	-22,1	1,0
35	20	0,99	10,2	-22,0	2,0
36	20	1,00	9,9	-20,3	3,9
37	10	0,50	9,9	-6,3	2,1
38	10	0,50	9,5	-6,3	4,3
39	10	0,50	9,9	-14,0	2,0
40	10	0,50	10,0	-22,4	1,0
41	10	0,50	10,0	-22,5	2,0
42	10	0,95	9,7	-6,1	2,1
43	10	1,00	9,5	-6,3	4,3
44	10	1,00	10,0	-14,3	2,0
45	10	1,00	10,2	-22,5	1,0
46	10	1,00	10,0	-22,3	2,0

Para o distanciamento de 10 mm a matriz foi reduzida, pois já havia o entendimento do efeito da sobretemperatura e algumas combinações $\Delta\omega$ e T_s geravam ou uma geada muito fina, de difícil avaliação, ou uma geada muito espessa que levaria ao bloqueamento prematura do canal. Assim, a matriz de $\Delta\omega$ e T_s , contou com 5 níveis e foram exploradas 2 velocidades: 0,5 e 1 m/s em um total de 10 pontos experimentais para o espaçamento de 10 mm. As condições de cada teste são representadas na carta psicrométrica da Figura 27.

2.3 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA BANCADA

2.3.1 Controle dos parâmetros

Para execução do teste é seguido o seguinte procedimento: primeiro a condição alvo de temperatura do túnel é estabelecida. Após isso a seção principal é fechada e se inicia simultaneamente a umidificação do túnel e o resfriamento das placas de formação, através da circulação do etilenoglicol. Como não há circulação de ar na seção principal, e o túnel foi previamente desumidificado devido ao sistema de refrigeração, há pouquíssima formação de geada prévia na placa. Quando a condição do ar e das placas está dentro do objetivo do teste, as válvulas da seção principal são abertas. A geada é então formada durante 6 horas, e os sistemas garantem o controle das variáveis do teste. Para ilustrar a capacidade de controle do túnel é apresentado o teste 9 (Tabela 2), na Figura 28, com condições extremas da matriz de teste: menor temperatura de superfície ($T_w = -22^\circ\text{C}$) e maior $\Delta\omega$ (4 g/kg).

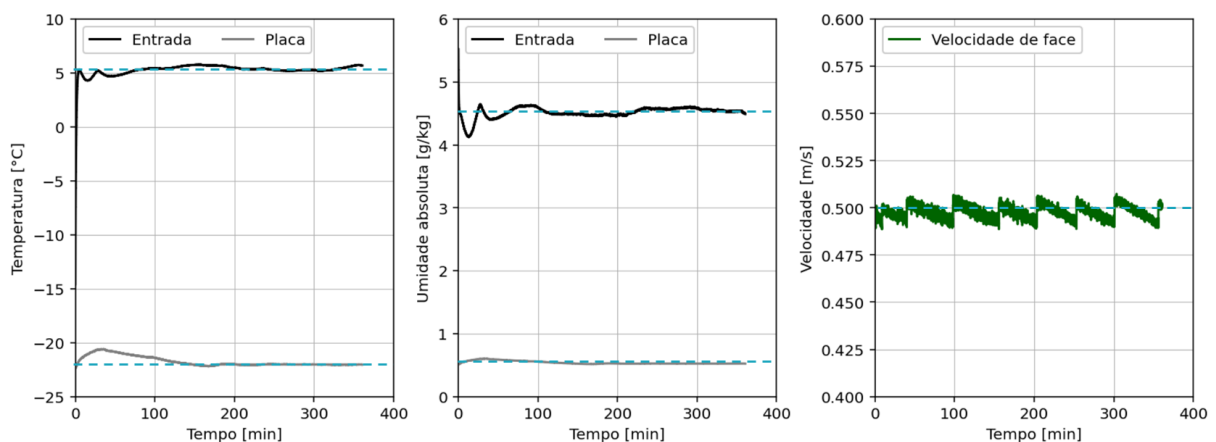


Figura 28 – Exemplo de controle de um teste experimental

Nos gráficos é possível observar que, devido à inércia térmica do sistema, existe um

tempo de acomodação das variáveis após a abertura das válvulas. Porém nos primeiros minutos o controle já estabelece valores próximos ao alvo. O gráfico de velocidade indica um ótimo funcionamento do sistema de controle de vazão de ar, apresentando valores que ficam na faixa de $\pm 1,5\%$ do valor alvo. Os degraus percebidos no gráfico são causados pela mudança de um passo nos motores dos *dampers* da seção auxiliar. Como é de se esperar, a velocidade de face tende a cair conforme a geada é formada, necessitando que o sistema de controle atue para compensar essa variação.

2.3.2 Repetibilidade

Com base nos erros dos instrumentos utilizados na bancada e descritos no documento, é possível realizar uma propagação a fim de determinar o erro final nas variáveis de interesse: massa e espessura. Porém, esse erro (do tipo B) não leva em conta variações aleatórias que podem ocorrer no fenômeno, como por exemplo: diferenças no posicionamento do instrumento de medição, tempos de estabilização diferentes, diferenças de rugosidade e ângulo de contato na superfície de formação, e variações do operador da bancada. Para capturar essas variáveis aleatórias e garantir que a bancada é capaz de repetir as medições, foram realizadas 2 réplicas para cada um dos testes 11, 12, 14, 15, 17, 18. Nelas a parametrização foi repetida e foram avaliadas as duas variáveis de interesse: massa e espessura. Na Figura 29 é possível perceber que houve uma boa repetibilidade para a massa, com os 3 grupos tendo resultados semelhantes, além disso não houve nenhum efeito sistemático aparente. O gráfico mostra também que a bancada é capaz de diferenciar claramente o efeito de $\Delta\omega$, de efeitos aleatórios. Para cada condição repetida foi avaliado o desvio padrão da amostra dos 3 testes realizados, para 3 e 6 horas de formação. Observa-se que o desvio padrão, representado no gráfico a esquerda da Figura 31, tem um comportamento estável, com valores relativos abaixo de 4%.

A mesma análise foi realizada para espessura, com os valores representados no gráfico da Figura 30. Nota-se novamente que a bancada foi capaz de repetir os resultados, sem erros sistemáticos, e diferenciando claramente o efeito de T_w (redução de δ_f) e $\Delta\omega$ (aumento de δ_f) de erros aleatórios. O valor do desvio padrão para cada agrupamento de três testes é apresentado à direita da Figura 31, onde observa-se uma redução do erro relativo com o aumento da espessura, indicando que o erro absoluto é aproximadamente constante. O gráfico mostra também que a bancada oferece resultados razoáveis para espessuras maiores de 2 mm, com um desvio padrão inferior a 10%, e erro bem reduzidos para espessuras maiores que 5 mm (<3%). Os resultados para o desvio padrão da massa e

espessura (erro tipo A) foram combinados com as incertezas dos instrumentos utilizados (erro do tipo B), para determinar a incerteza final das medidas. Esse processo é descrito resumidamente no Apêndice II, e é explicado detalhadamente por Fonseca (2025).

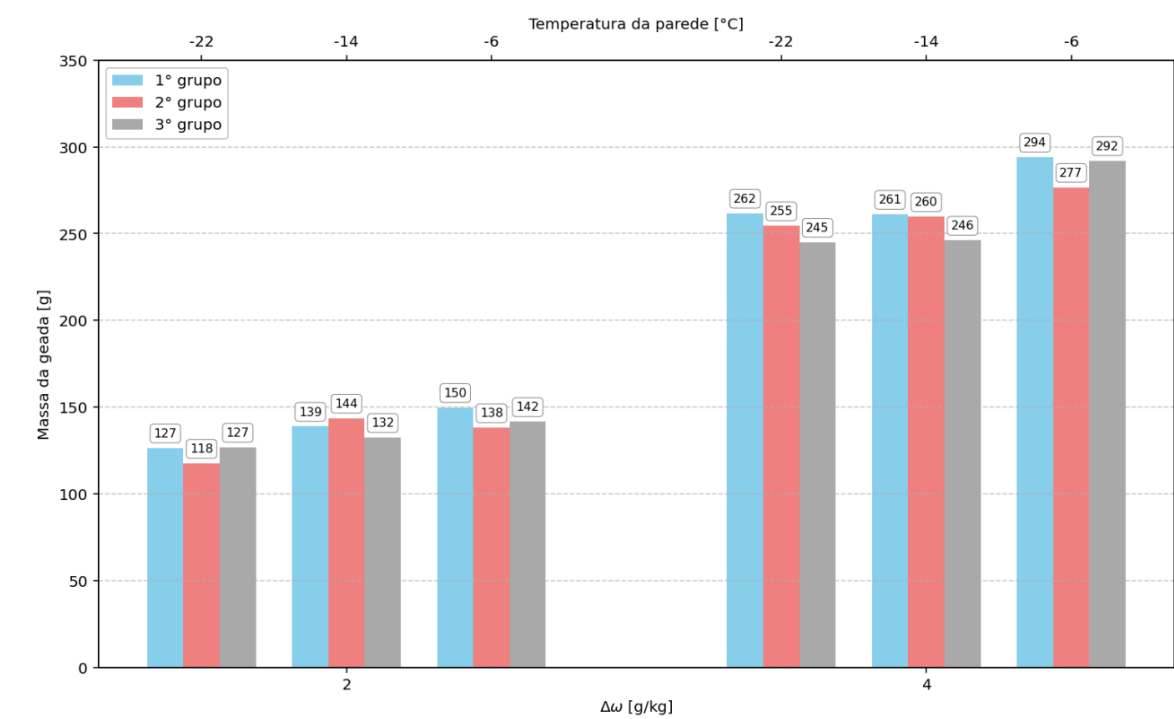


Figura 29 – Repetibilidade da massa (resultados para 6 horas)

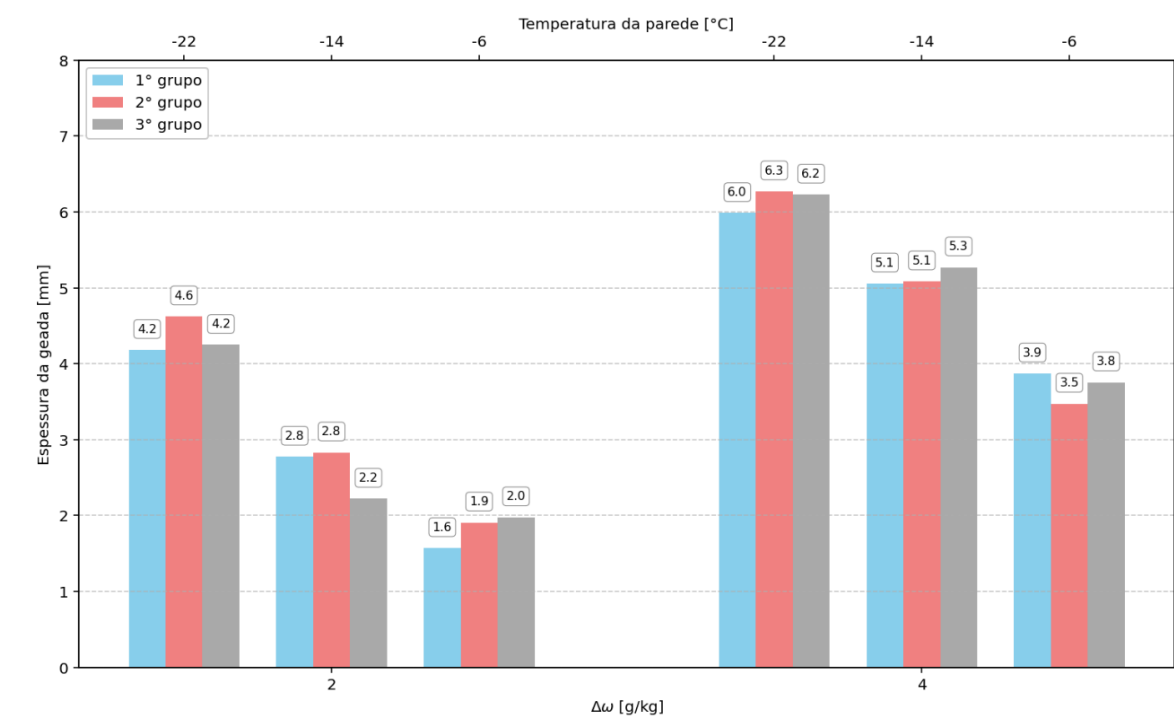


Figura 30 – Repetibilidade da espessura (resultados para 6 horas)

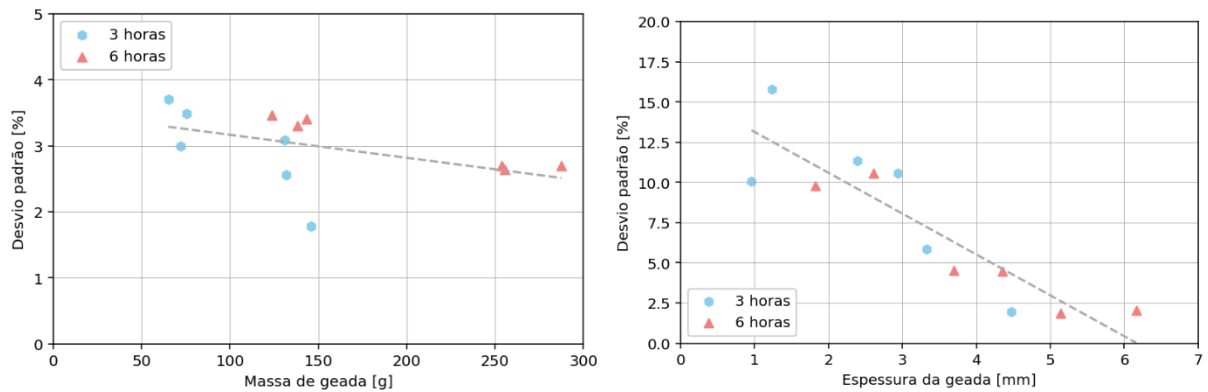


Figura 31 – Desvio padrão para massa (esq.) e espessura (dir.)

2.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu o desenvolvimento e a validação de uma bancada experimental projetada especificamente para reproduzir as condições de operação de evaporadores de refrigeradores domésticos. Foram apresentados os subsistemas do túnel vertical, detalhando o seu funcionamento. O aparato demonstrou capacidade de controlar independente as variáveis do processo: temperatura da superfície resfriada (T_w), temperatura e umidade do ar (T_a, ω_a) e velocidade do escoamento (u). Destaca-se a implementação de um sistema de medição de espessura não intrusivo baseado em visão computacional e binarização de imagens, bem como a determinação da massa de geada em tempo real através de balanços de massa no fluxo de ar. A matriz de testes foi definida para cobrir uma faixa de operação compatível com a observada em evaporadores domésticos. Os testes de verificação confirmaram a robustez do aparato experimental. A análise de repetibilidade indicou erros aleatórios razoáveis, com desvios padrão inferiores a 4% para a massa e, para espessuras acima de 2 mm, inferiores a 11%, validando a confiabilidade dos dados gerados para as análises subsequentes.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 EFEITO DOS PARÂMETROS SOBRE A GEADA

O objetivo dessa análise é determinar o efeito de cada fator no crescimento da geada para possibilitar a construção de uma correlação com base física. A natureza não linear da densidade com relação a alguns parâmetros, além de imprecisões experimentais, dificultou a análise direta de tendências dos valores obtidos. Nesse contexto, algumas observações indicaram que seria mais adequado analisar as variáveis medidas diretamente: massa e espessura, e determinar seu comportamento em função dos parâmetros de teste, para depois entender o comportamento da densidade. Os resultados foram analisados para um tempo de formação de geada de 6 horas, compatível com a frequência máxima de degelo de um refrigerador doméstico. As imagens ilustradas, para fins comparativos, são da porção central do comprimento da placa e cada retângulo representado possui uma largura real de 10 mm.

3.1.1 Efeito de $\Delta\omega$ e ΔT_s

Dentro da matriz completa tem-se como conjunto padrão uma matriz menor de 9 testes que resultam do cruzamento dos 3 patamares de $\Delta\omega$ e T_s . Na Figura 32 é ilustrado o resultado dessa matriz menor, para a condição com espaçamento de 20 mm, velocidade de 1 m/s e sobretemperatura de 10 K. Observa-se no gráfico a esquerda que a massa de geada é proporcional a $\Delta\omega$, uma vez que ele é o próprio potencial de transferência de massa. Além disso, no gráfico a direita é possível perceber que a espessura de geada é proporcional, de forma linear, ao super-resfriamento do teste, o que está em linha com as observações de Shibkov (2002), porém aqui para um processo de dessublimação e não congelamento. O comportamento linear de ambas as variáveis resposta se manteve para todas os conjuntos de matrizes 3x3, assim a análise dos próximos fatores utiliza isso como base, e compara as tendências obtidas pela regressão linear realizada.

Na Figura 33 observa-se as fotos para as diferentes condições analisadas e uma formação de geada com 6 horas. Percebe-se claramente o efeito dos parâmetros no aumento de espessura, tanto o aumento $\Delta\omega$, como também a redução de T_w . É interessante notar também que cada coluna (mesmo $\Delta\omega$) possui valores similares para a massa de geada, porém espessuras diferentes, resultado da variação de morfologia ocasionado pela

diferença na temperatura de superfície. As fotos também aparentam revelar uma geada mais compacta e densa para maiores $\Delta\omega$.

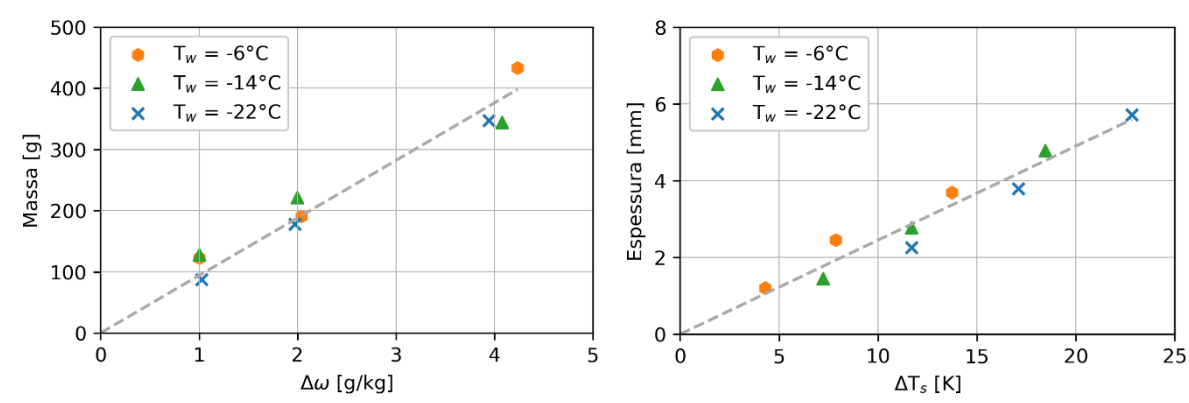


Figura 32 – Gráficos do efeito de $\Delta\omega$ e ΔT_s sobre a massa e espessura da geada

Pela análise dos resultados fica clara a influência da temperatura de superfície (T_w), que com seu aumento reduz a espessura e mantém a deposição de massa, levando a geadas mais densas. A influência de $\Delta\omega$ é mais complexa, uma vez que seu aumento leva ao simultâneo aumento de massa e espessura, e será avaliada mais detalhadamente no desenvolvimento da correlação proposta.

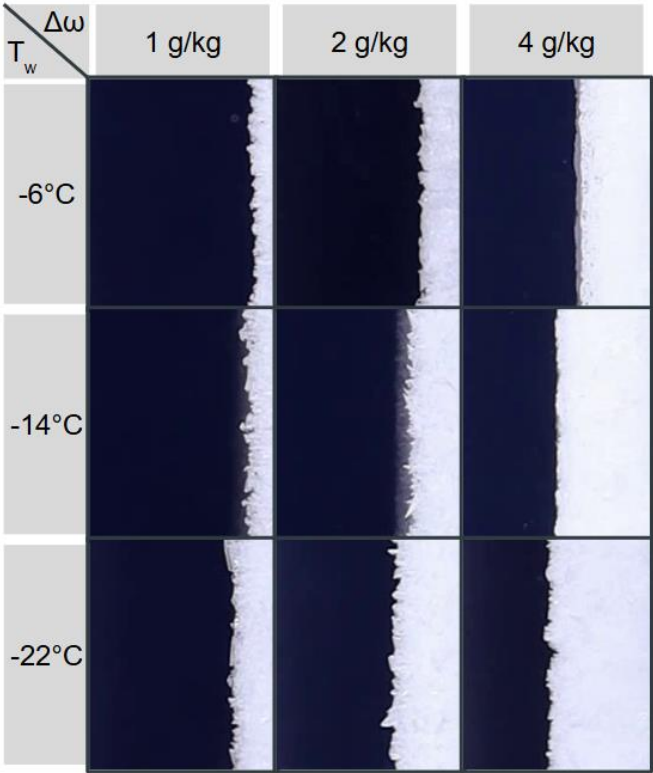


Figura 33 – Fotos do efeito de $\Delta\omega$ e ΔT_s sobre a geada

3.1.2 Efeito da sobretemperatura

Os resultados para o efeito da sobretemperatura (com velocidade 0,5 m/s) são mostrados nos gráficos da Figura 34, onde nota-se que tanto para a massa quanto para a espessura há uma redução no valor obtido com o aumento de sobretemperatura. Isso pode ser explicado pelo fato da temperatura do ar ter influência sobre o $\Delta\omega$ e ΔT_s percebidos pelo fenômeno. Para possibilitar a parametrização baseada em variáveis constantes ao longo do teste, optou-se por definir $\Delta\omega$ e ΔT_s com base na condição da superfície resfriada (T_w). Porém, o potencial do fenômeno depende do estado da superfície da geada, que é onde de fato ocorre a deposição de massa. Nesse contexto, o valor da temperatura superfície da geada (T_f) pode ser calculado, de maneira simplificada, pela seguinte equação, que pondera as temperaturas do ar e superfície resfriada baseada nas resistências térmicas:

$$T_f = \frac{T_a h_c + T_w \frac{k_f}{\delta_f}}{h_c + \frac{k_f}{\delta_f}} \quad (3.1)$$

desse modo, o aumento OT leva a um aumento de T_a ($T_{\text{dew}} + \text{OT}$), que leva a um aumento de T_f . Com o aumento de T_f , há também um aumento de ω_f , que é baseada na saturação da superfície. Visto que os parâmetros $\Delta\omega$ e ΔT_s são definidos com base nas propriedades de entrada do ar, o aumento da temperatura de superfície da geada proporcionado pela sobretemperatura leva, na prática, a uma redução de $\Delta\omega$ e ΔT_s . Por consequência, isso reduz a massa depositada e a espessura.

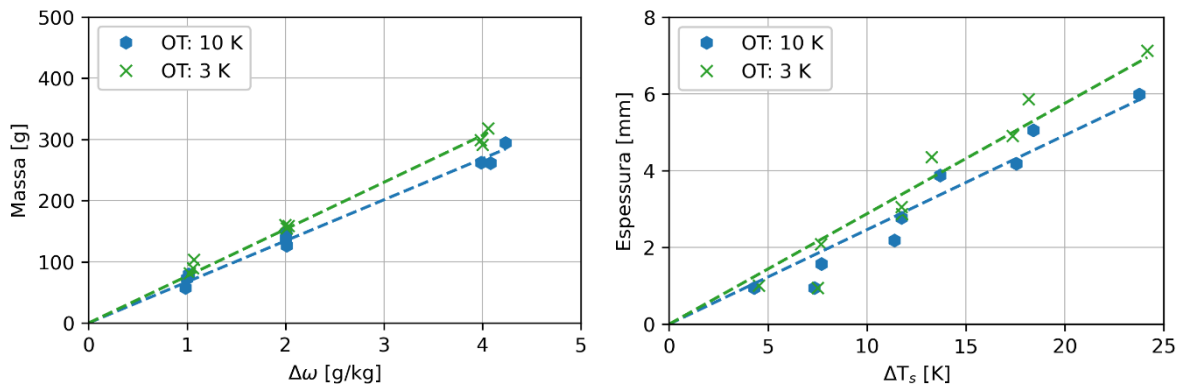


Figura 34 – Gráficos do efeito da sobretemperatura sobre a geada ($u = 0,5$ m/s, $F_p = 20$ mm).

As imagens da Figura 35 ilustram a redução sistemática da espessura, principalmente para os valores de $\Delta\omega$ de 2 e 4 g/kg. Para o grupo com $\Delta\omega$ igual a 1 g/kg existe um comportamento anômalo, com a espessura praticamente igual entre as

temperaturas e superfície de -6°C e -14°C . A repetição do mesmo efeito para diferentes sobretemperaturas indica que isso é de fato um fenômeno físico. Possíveis explicações para isso podem estar relacionadas ao processo de nucleação e a morfologia da geada.

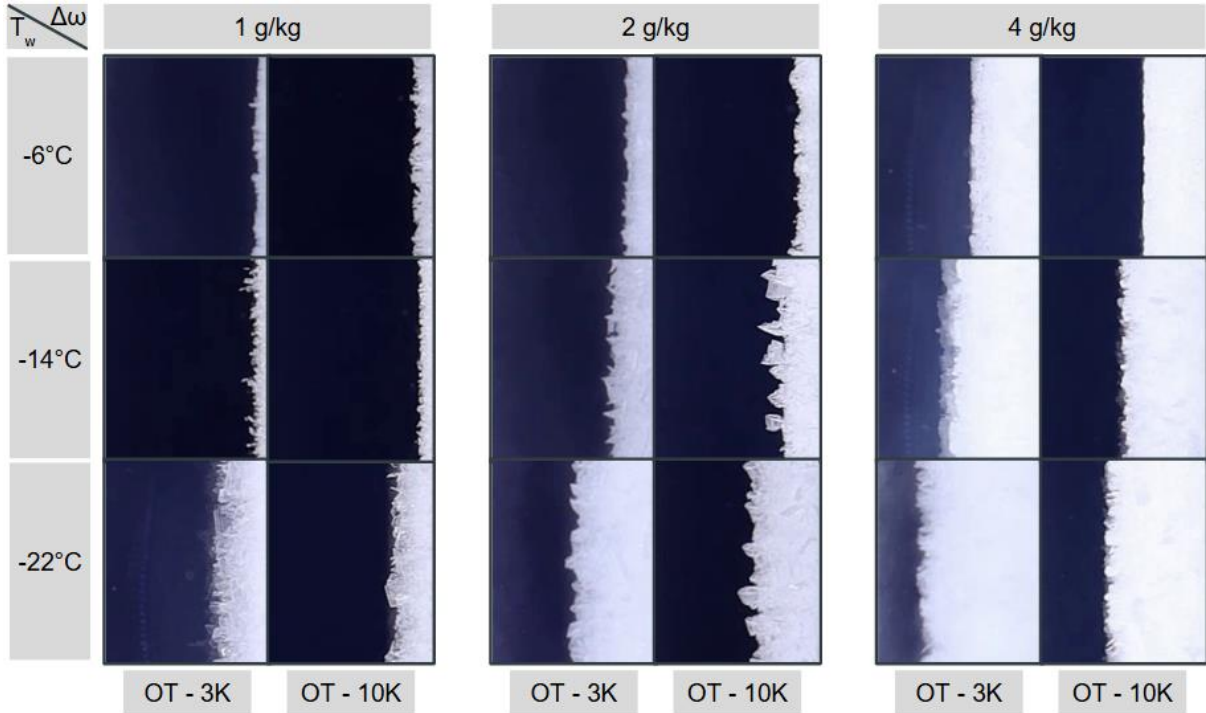


Figura 35 – Fotos do efeito da sobretemperatura sobre a geada ($u = 0,5 \text{ m/s}$, $F_p = 20 \text{ mm}$).

A mesma análise do efeito da sobretemperatura foi feita também para uma velocidade de $1,0 \text{ m/s}$. Observa-se nos gráficos da Figura 36 que novamente o aumento do valor da sobretemperatura levou a uma redução tanto na massa, quanto na espessura da geada. Comparando as variações das tendências para as diferentes velocidades, tem-se que para o primeiro caso ($0,5 \text{ m/s}$) uma redução do coeficiente angular da reta da massa de 13%, enquanto para o segundo grupo ($1,0 \text{ m/s}$) a redução é de 9%. Para a espessura, a redução devido a variação de OT do primeiro grupo foi de 14%, enquanto para o segundo grupo a redução foi de 13%. Tanto para a massa quanto para a espessura a redução foi menos acentuada no segundo grupo, o que pode ser explicado pelo fato da variação de sobretemperatura ser menor. Porém, observa-se uma grande concordância entre os resultados, indicando que a parametrização realizada é apropriada e leva a análises consistentes. Mais uma vez, é possível ver a redução sistemática da espessura da geada na Figura 37, que conta com fotos do experimento. O comportamento anômalo para $\Delta\omega$ de 1 g/kg e T_s entre -6°C e -14°C se mantém, indicando novamente que essa observação é resultado do fenômeno. Uma vez que as variações de massa e espessura com respeito a sobretemperatura se mantiveram em níveis bem similares, é possível concluir que, para

as condições analisadas, esse parâmetro tem pouco efeito sobre a densidade da geada.

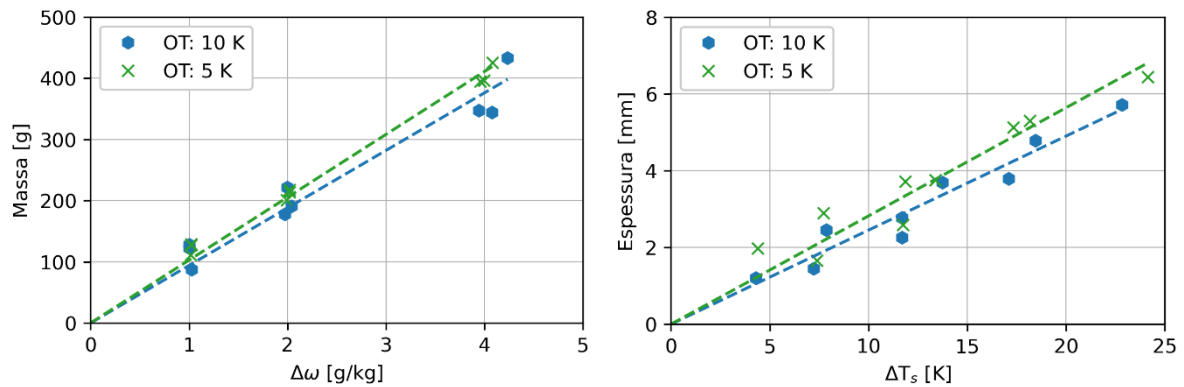


Figura 36 – Gráficos do efeito da sobretemperatura sobre a geada ($u = 1,0$ m/s, $F_p = 20$ mm).

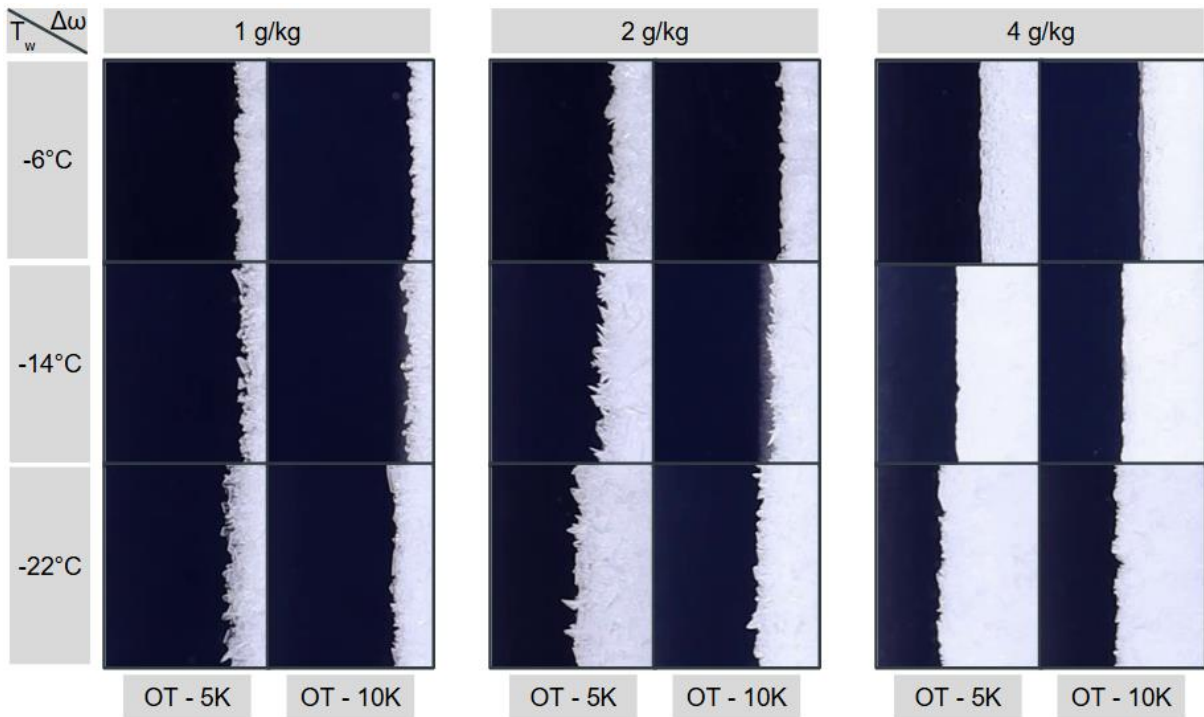


Figura 37 – Fotos do efeito da sobretemperatura sobre a geada ($u = 1,0$ m/s, $F_p = 20$ mm).

3.1.3 Efeito da velocidade

Os mesmos testes utilizados na comparação da sobretemperatura foram rearranjados para que fosse possível determinar o efeito da velocidade. Observa-se nos gráficos da Figura 38 que o aumento de velocidade leva a um aumento da deposição de massa, mas não tem efeito, de maneira geral, sobre a espessura da geada. O aumento de transferência de massa pode ser explicado a luz da analogia de Lewis:

$$h_m = \frac{h_c}{c_p Le^{2/3}} \quad (3.2)$$

onde $Le = \alpha/D$ é o número de Lewis, e α a difusividade térmica. Ao utilizar a analogia de Lewis nota-se que o coeficiente de transferência de massa é proporcional ao coeficiente de transferência de calor (dado por Nusselt), que é função do Reynolds e do número de Prandtl (Lienhard, 2005). O número de Reynolds, por sua vez, é função da velocidade do ar. Desse modo, a velocidade afeta o coeficiente de transferência de massa e por consequência a massa depositada ao longo do teste. A depender do regime de escoamento o número de Nusselt pode mudar sua relação com o número de Reynolds, sendo proporcional a $Re^{0,5}$ para regimes laminares e proporcional a $Re^{0,8}$ para regimes turbulentos. Assim, analisando a relação entre a transferência de massa e a velocidade do ar, é possível inferir qual o regime de escoamento vigente.

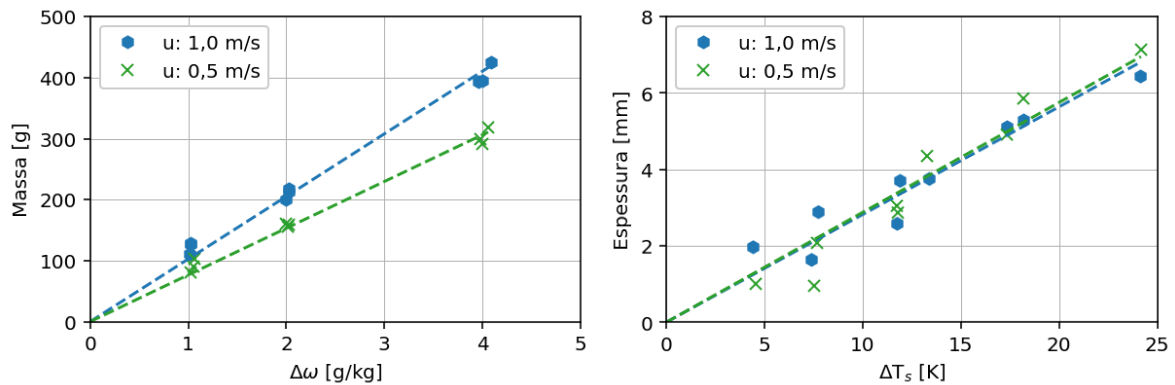


Figura 38 – Gráficos do efeito da velocidade sobre a geada ($OT \sim 4$ K, $F_p = 20$ mm).

As fotos do grupo com sobretemperatura próxima a 4 K na Figura 39 ilustram a semelhança entre a espessura da geada para diferentes velocidades do ar, com diferença notáveis sendo observadas apenas para $\Delta\omega$ de 1 g/kg e temperaturas de superfície de -14°C e -6°C , os mesmos pontos que apresentam comportamento anômalo para a análise do efeito da sobretemperatura.

Analisando os resultados do efeito da velocidade para sobretemperaturas de 10 K (gráficos na Figura 40 e imagens na Figura 41), observa-se novamente um aumento da massa depositada e a manutenção da espessura da geada. Comparando os valores dos coeficientes angulares das retas obtidas nos gráficos tem-se um aumento de 34% no coeficiente da massa para o grupo com sobretemperatura próxima a 4 K e um aumento de 40% para o grupo com OT de 10 K. Considerando que a velocidade do ar dobra entre os grupos, seria esperado para um escoamento laminar um aumento de 41% na transferência

de massa ($2^{0,5}$), valor próximo ao aumento médio observado de 37%, o que indica um comportamento laminar para o escoamento analisado.

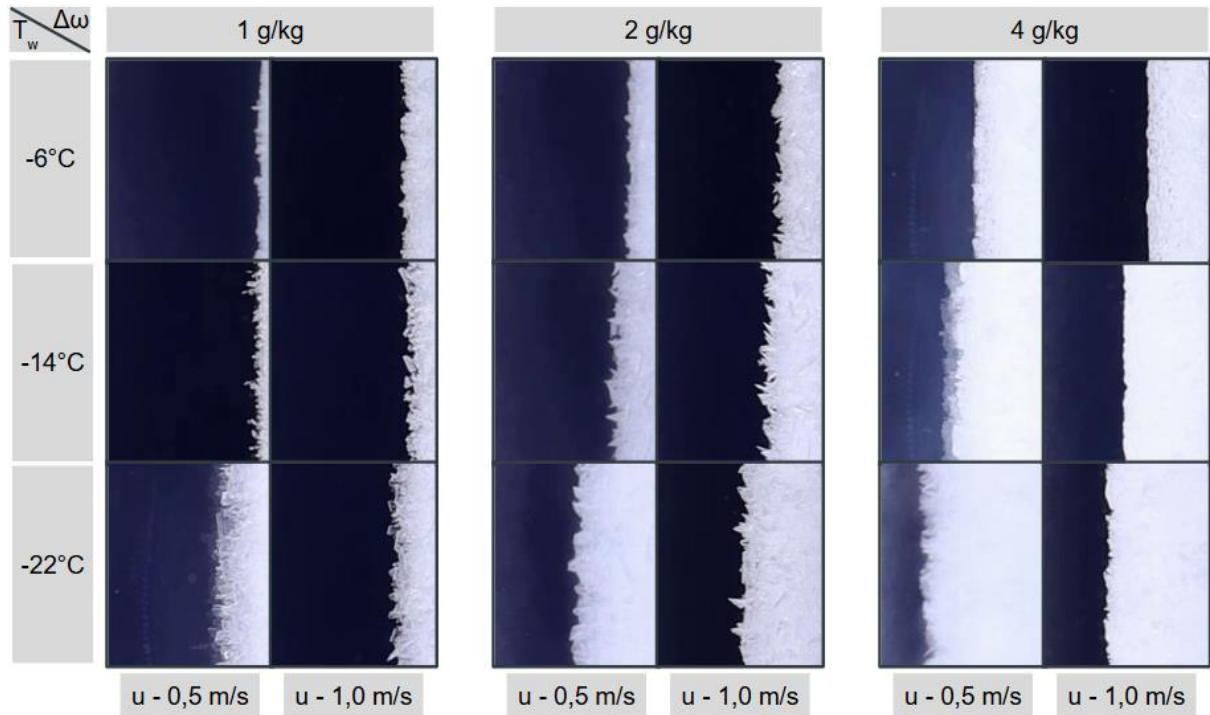


Figura 39 – Fotos do efeito da velocidade sobre a geada ($OT \sim 4$ K, $F_p = 20$ mm).

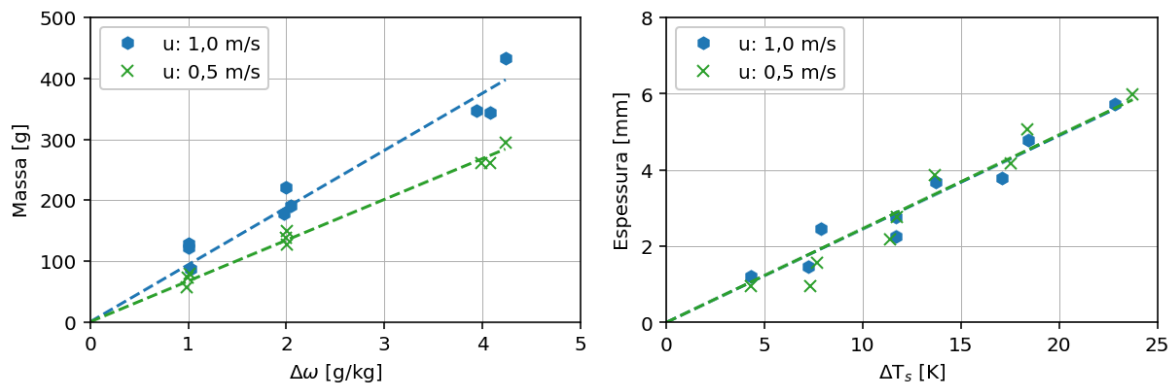


Figura 40 – Gráficos do efeito da velocidade sobre a geada ($OT = 10$ K, $F_p = 20$ mm).

Para a espessura houve uma variação muito pequena entre as tendências para os dois grupos de sobretemperatura, com uma redução de 2% para uma OT próximo a 4 K e uma redução próxima a 0% para uma OT de 10 K, indicando que não há uma variação expressiva da espessura da geada em função da velocidade para as condições de evaporadores domésticos, como também observado por Schneider (1978). Mais uma vez, a grande consistência no impacto da velocidade sobre as variáveis é um indicativo de que as

observações refletem a física do fenômeno. Em uma última análise, se o aumento da velocidade de escoamento incrementa a deposição de massa e mantém a espessura, o resultado é um aumento na densidade da geada.

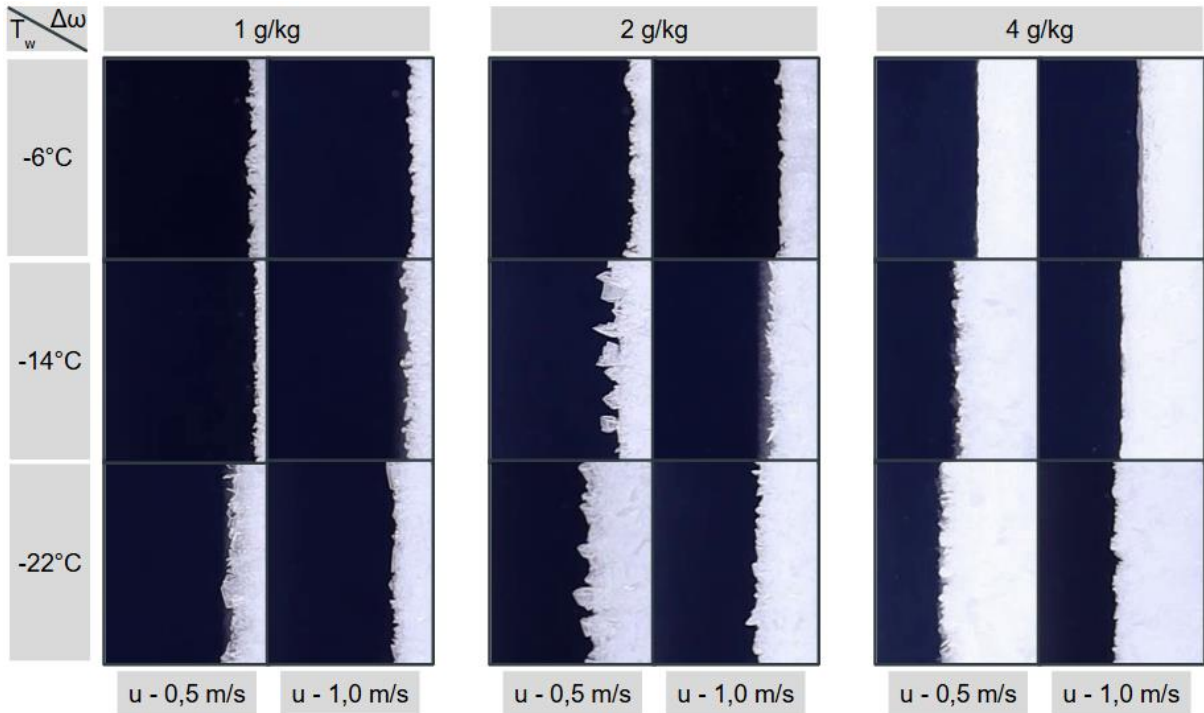


Figura 41 – Fotos do efeito da velocidade sobre a geada ($OT = 10\text{ K}$, $F_p = 20\text{ mm}$).

3.1.4 Efeito da distância entre placas

Para determinar o efeito da variação do distanciamento entre placas foram realizados, além dos 36 testes já explorados no espaçamento de 20 mm, mais 10 testes adicionais para o espaçamento de 10 mm. Como os efeitos de $\Delta\omega$, temperatura de superfície, sobretemperatura e velocidade já estavam bem caracterizados, optou-se por realizar a análise da variação e F_p com uma matriz reduzida. Para tanto, os testes foram realizados apenas com uma OT igual a 10 K. Além disso, os testes com geadas muito finas (com incertezas muito grandes) ou muito espessas (que poderiam levar ao bloqueamento antes do fim do teste) foram descartados.

Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 42, onde se observa que a redução do espaçamento entre as placas levou a uma redução da massa de geada. Em um primeiro momento isso pode parecer contraintuitivo, pois seria esperado uma intensificação do processo de convecção com a diminuição do diâmetro hidráulico do canal. Porém, o que ocorre é que a redução do tamanho do canal leva a uma menor vazão mássica

de ar e, portanto, a uma redução de capacitância do fluxo. Assim, o ar ao longo do canal mais reduzido reduz a sua umidade mais rapidamente, diminuindo o seu potencial de transferência de massa.

Para quantificar esse efeito foi utilizada a relação $\epsilon = 1 - \exp\left(-\frac{h_m A_s}{m_a}\right)$ (Loyola, 2014), usualmente utiliza em trocadores de calor com mudança de fase e aqui adaptada, considerando a analogia de Lewis. O valor obtido para o coeficiente de transferência de massa médio para o grupo com F_p de 20 mm e u de 0,5 m/s foi de 0,0115 kg/m²s e para o grupo com F_p de 10 mm foi de 0,0129 kg/m²s, portanto com aumento, e não diminuição, do fenômeno convectivo. As fotos para os testes comparando os diferentes F_p são mostradas na Figura 43.

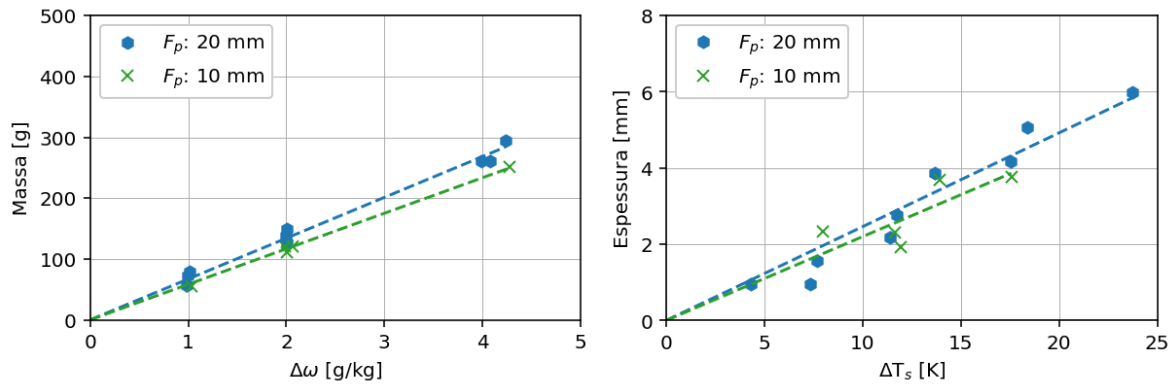


Figura 42 – Gráficos do efeito do espaçamento sobre a geada (OT = 10 K, $u = 0,5$ m/s).

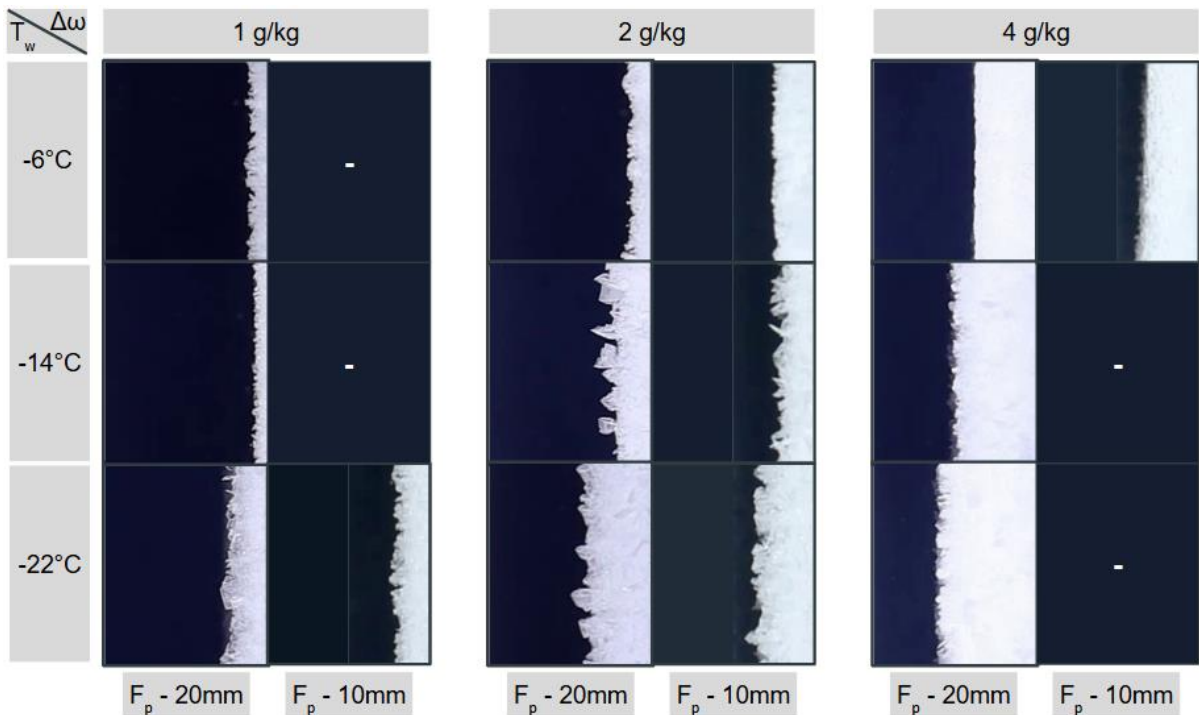


Figura 43 – Fotos do efeito da velocidade sobre a geada (OT = 10 K, $u = 0,5$ m/s).

Os resultados para uma velocidade de 1,0 m/s são mostrados nos gráficos da Figura 44. Mais uma vez a massa para o espaçamento menor é reduzida. O valor médio calculado do coeficiente de transferência de massa para o maior espaçamento foi de 0,0156 kg/m²s, enquanto o valor obtido para o menor foi de 0,0143 kg/m²s, tendo uma leve redução. Como as variações entres os grupos para a velocidade de 0,5 m/s e 1 m/s são pequenas e conflitantes, entende-se que isso pode ser resultado de variações e imprecisões experimentais. Desse modo, considerou-se que não houve variação apreciável de h_m . Isso indica que as camadas limites entre as placas não se encontram, de modo que uma superfície não afeta a troca de calor da outra.

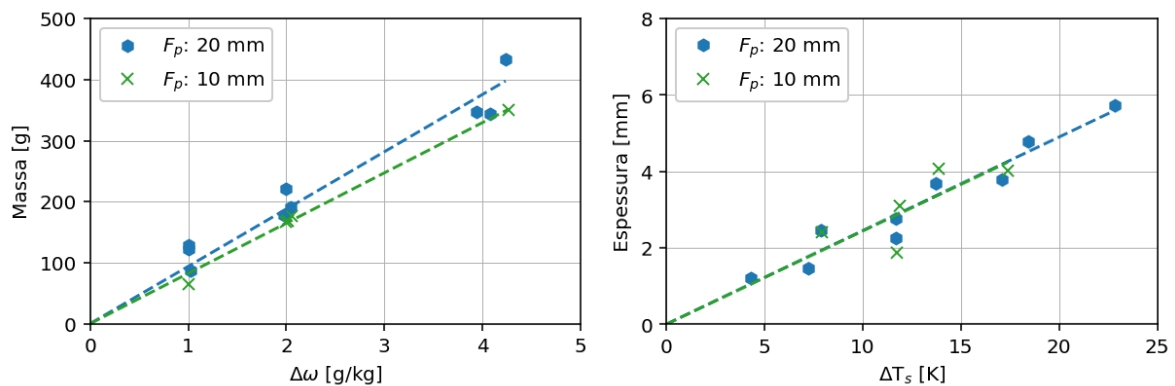


Figura 44 – Gráficos do efeito do espaçamento sobre a geada ($OT = 10$ K, $u = 1,0$ m/s).

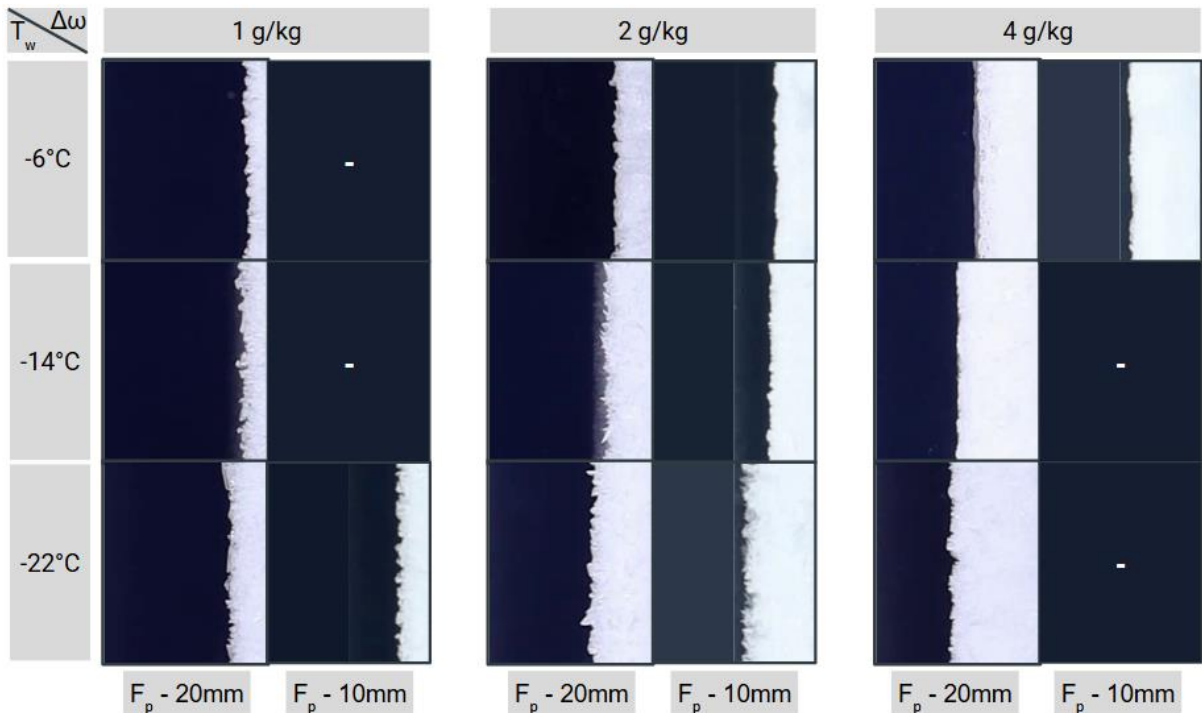


Figura 45 – Fotos do efeito da velocidade sobre a geada ($OT = 10$ K, $u = 1,0$ m/s).

Observando a Figura 45, a variação de espessura entre os dois grupos com velocidade de 1 m/s foi pequena, assim como nos grupos de 0,5 m/s. Desse modo, pode-se concluir que, para essas condições, a distância entre as placas não afeta a espessura da geada. Uma vez que a distância entre placas tem pouco efeito tanto sobre a massa quanto sobre a espessura da geada, conclui-se que a distância entre as aletas, para as condições analisadas, tem pouco efeito direto sobre a densidade, alterando apenas a taxa de capacitância do fluxo de ar.

3.1.5 Efeito do tempo

Para uma modelagem adequada da densidade de geada é necessário entender a sua dependência com o tempo. Desse modo, na Figura 46 são apresentadas as curvas da massa em função do tempo para todas as condições testadas. O título de cada gráfico mostra os valores de OT, u , e F_p para cada grupo, enquanto a cor da curva representa o valor de $\Delta\omega$. Sobre cada curva há uma reta pontilhada em cinza obtida da regressão linear $f(x) = ax$ dos dados. A proximidade das curvas com as retas regredidas confirma que o aumento de massa é linear com o tempo. Ou seja, o fluxo mássico da geada é constante ao longo de todo o processo de formação, comportamento também observado por Nascimento *et al.* (2015).

Para a evolução temporal da espessura, observou-se que geadas com grandes espessuras (>3 mm) possuem uma dependência clara com $\sqrt{t}$, assim como pontuado por Hermes *et al.* (2014). Porém, para geadas menos espessas o comportamento varia, com alguns testes apresentado um crescimento inicial em ‘S’, como ilustrado pelo teste 18 apresentado na Figura 47. Nesse experimento observa-se o aumento na velocidade de crescimento até um ponto de máximo, a partir do qual há uma progressiva redução, se aproximando da tendência esperada, seguindo a $\sqrt{t}$. O comportamento em ‘S’ para curvas de solidificação é abordado por Bejan *et al.* (2013). O autor atribui o fenômeno à mudança do processo de deposição de massa, que inicialmente ocorre pelo crescimento de semiesferas e, em um segundo momento, passa a acontecer com o desenvolvimento de agulhas, que devido ao seu formato aceleram o aumento da espessura. A fase final segue o comportamento já abordado, com um adensamento que reduz gradativamente o crescimento. Um fenômeno semelhante é também observado por Hermes *et al.* (2018), sendo interpretado como um atraso de nucleação.

Com o objetivo de entender o comportamento da curva, na Figura 48 são apresentadas as imagens para cada uma das fases de formação da geada: nucleação,

crescimento e adensamento, que possuem seus pontos correspondentes indicados na curva experimental da Figura 47. Observando-se as imagens verifica-se o comportamento descrito por Bejan *et al.*, com uma camada inicial fina e densa de geada formada por sítios de nucleação esféricos, seguida por um crescimento dendrítico na forma de agulhas, que avançam em direção ao escoamento com maior velocidade. Nas imagens 3 e 4 fica claro também o progressivo adensamento típico da fase final da formação da geada.

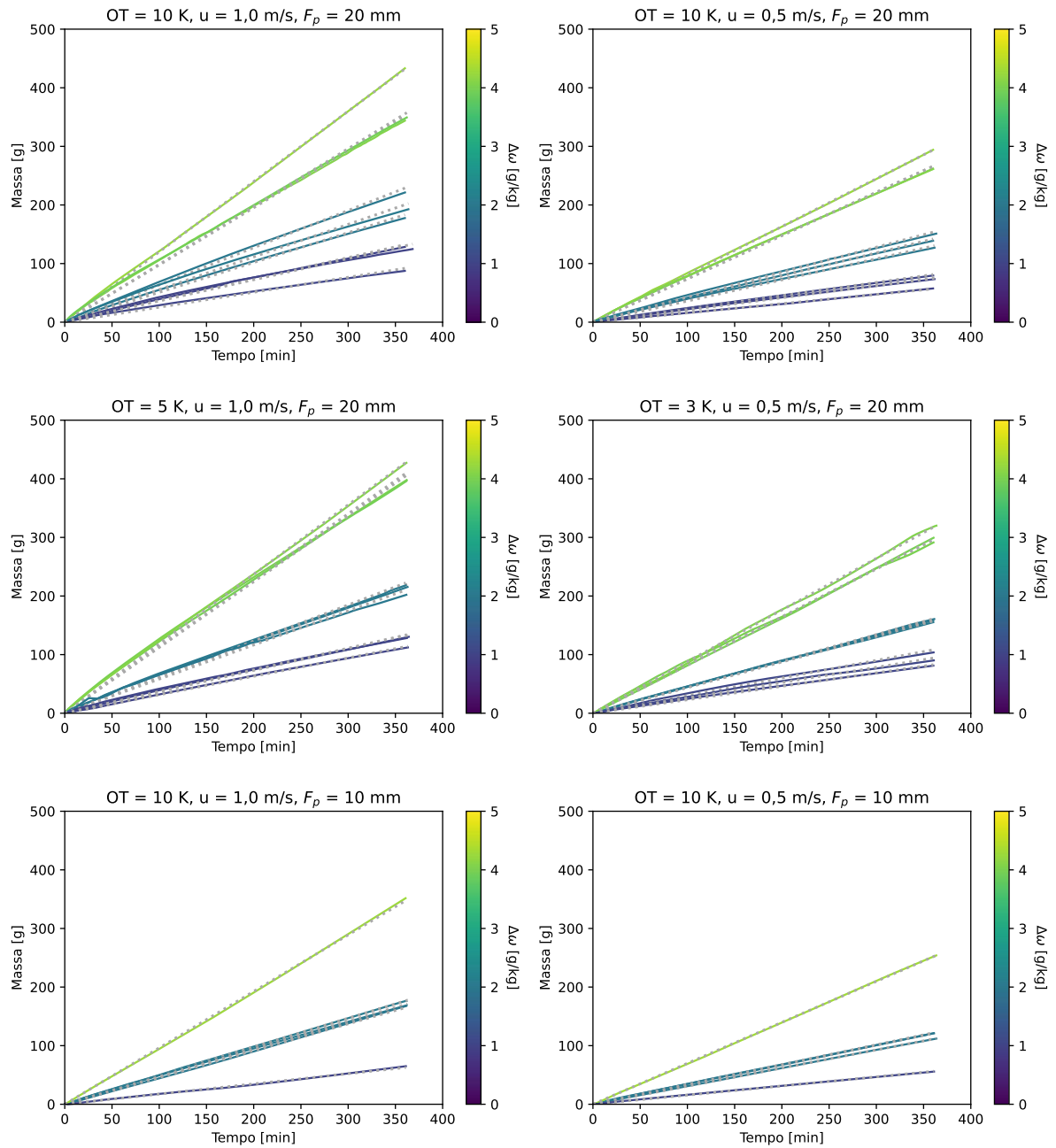


Figura 46 - Gráficos da evolução temporal da massa da geada.

Para compreender as diferentes etapas desse processo é necessário recorrer a teoria

de nucleação, explicada em detalhe por Piucco (2008). Na formação de geada, quanto menor a afinidade do substrato com a água e, portanto, menor o ângulo de contato da superfície, maior é a energia necessária para deflagrar o processo de nucleação. Assim, dado um ângulo de contato, existe um super-resfriamento mínimo para que a formação de geada ocorra por dessublimação. Caso o super-resfriamento esteja abaixo desse patamar, o processo ocorre por condensação seguida de congelamento, e caso o super-resfriamento seja ainda mais baixo, o processo não ocorre. Nesse contexto, nota-se que no início do processo a nucleação ocorre sobre a placa resfriada, que possui um ângulo de contato de 77° . Após esse momento inicial, a nucleação passa a ocorrer não sobre a superfície, mas sobre uma camada de geada pré-existente, que possui um ângulo de contato de apenas cerca de 12° ⁴ (Knight, 1966). Assim, a hipótese levantada neste trabalho é que o super-resfriamento do experimento não é suficiente para deflagrar a dessublimação sobre a superfície da placa. Deste modo, o processo se inicia por condensação seguida de congelamento, resultando em uma geada fina e densa, como visto na Figura 48. Uma vez que a camada inicial de geada esteja presente, o ângulo de contato cai de maneira acentuada, permitindo que o crescimento ocorra agora por dessublimação, alterando a morfologia da geada formada para dendritas com uma densidade muito mais reduzida e com uma maior velocidade de crescimento. O processo continua ocorrendo por dessublimação, mas avança para a etapa de adensamento com parte da deposição sendo destinada ao crescimento de geada, mas também parte ao aumento de massa do substrato já existente.

Com o modelo de Piucco é possível verificar teoricamente, com base no ângulo de contato, se a nucleação deve ocorrer por dessublimação ou condensação. Porém, para a grande parte dos testes que possuem o comportamento em ‘S’ (inclusive o teste 18), os cálculos indicam que desde o primeiro momento a fenômeno deveria ocorrer por dessublimação e não condensação, como observado experimentalmente. Porém é importante notar que esse é um fenômeno de difícil modelagem e que pode ser afetado por outros fatores não considerados, como por exemplo a rugosidade da superfície e a orientação da placa, que no presente experimento é posicionada na vertical. De qualquer modo, a hipótese levantada para a explicação do comportamento em ‘S’ segue válida, uma vez que a presença de uma camada inicial de geada diminui expressivamente o ângulo de contato da superfície e favorece a dessublimação.

⁴ É interessante notar que a afinidade da água sobre o gelo é tão grande que existem até mesmo dificuldades experimentais em se obter o seu ângulo de contato (Pereira, 2017).

Observa-se que o comportamento em 'S' da geada tende a ocorrer em estágios de menor espessura, independentemente do tempo de formação. Assim, para permitir a comparação de testes com geadas em um mesmo nível de maturidade, realizou-se a normalização das curvas experimentais obtidas. Nesse processo, o tempo é comprimido de modo que o ponto final da curva resultante se alinhe com a curva teórica ($\sqrt{t}$) que representa o comportamento esperado. Nota-se que esse processo tem como objetivo colapsar os dados, para garantir uma comparação adequada entre os dados. Ainda que o último ponto do gráfico normalizado recaia necessariamente sobre a curva teórica, essa análise é interessante para observar o caminho do crescimento até chegar a esse ponto final.

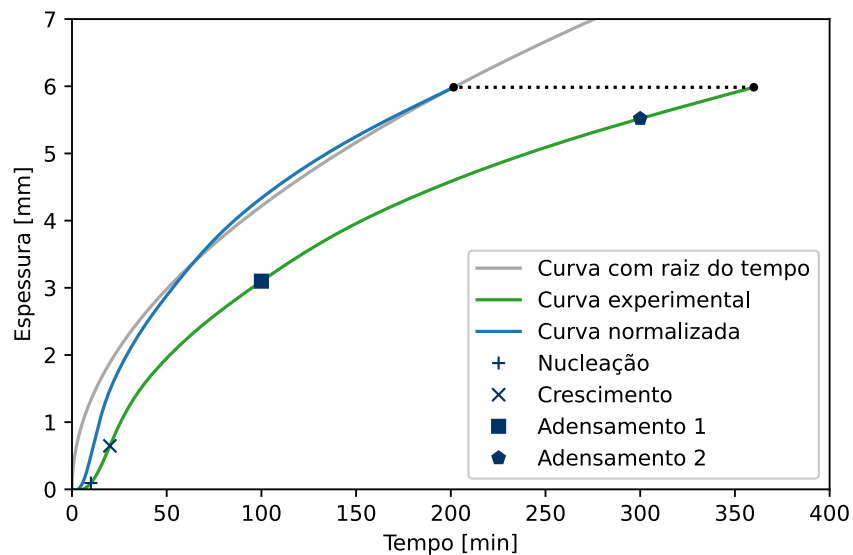


Figura 47 – Processo de normalização do tempo no gráfico para espessura (teste 18).

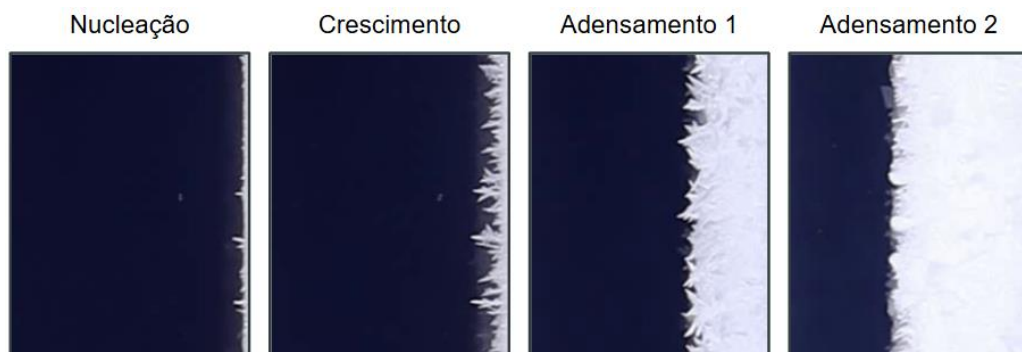


Figura 48 – Fases do processo de formação de geada (teste 18).

Essa transformação é ilustrada na Figura 47, que mostra a normalização do teste 18. As curvas normalizadas para todos os pontos experimentais estão representadas na

Figura 49, onde os títulos indicam as condições de teste de cada grupo e a cor dos gráficos representa o super-resfriamento. Adicionalmente, uma média de todas as curvas é exibida por uma linha cinza pontilhada. Nota-se que os gráficos de espessura apresentam uma variação maior de comportamento em comparação aos gráficos de massa. Isso se deve, em parte, ao comportamento físico da espessura ser inerentemente mais diverso e, também, às maiores dificuldades experimentais na sua determinação, conforme analisado na repetibilidade dos experimentos.

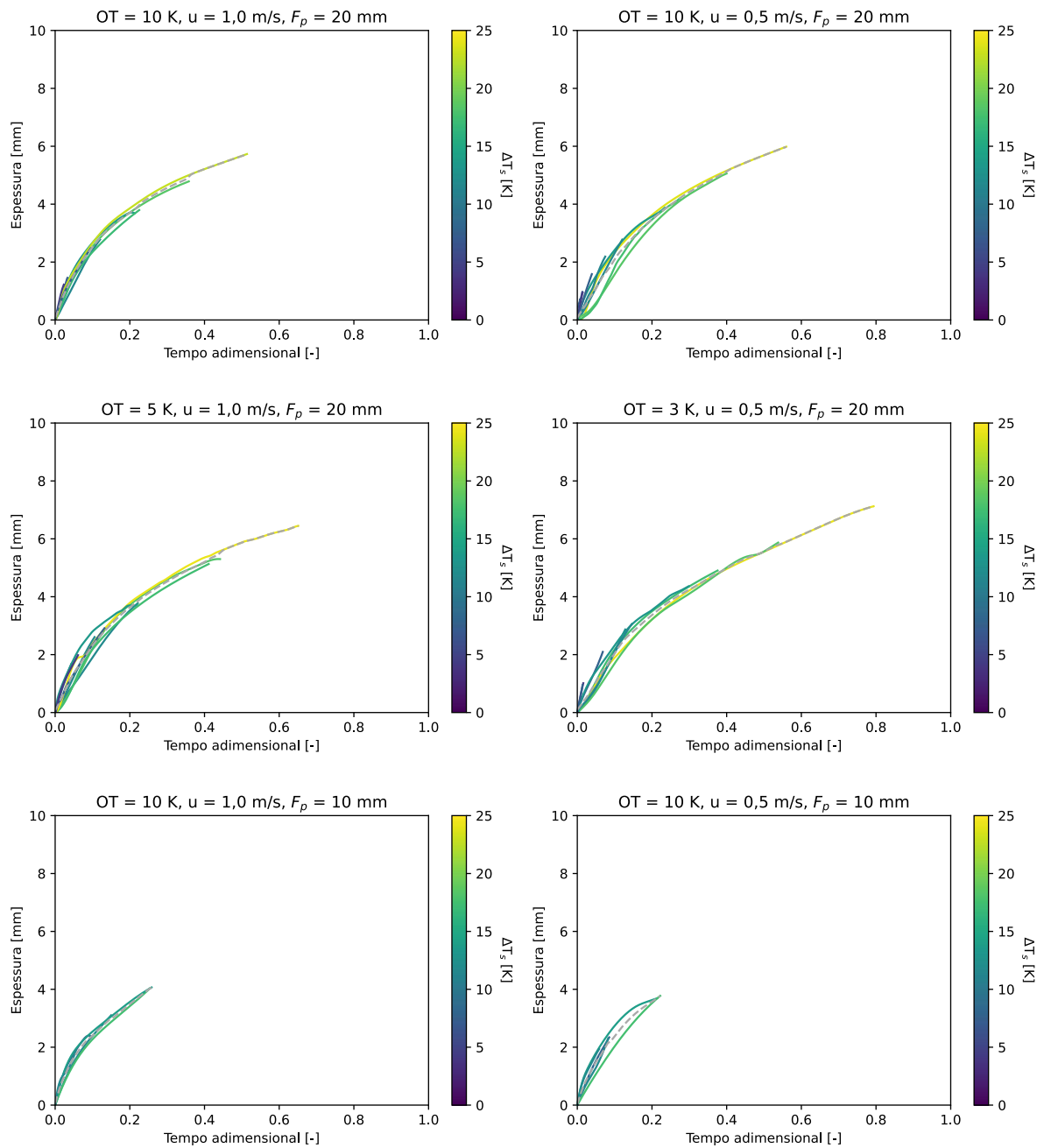


Figura 49 – Gráficos da evolução temporal da espessura da geada (normalizados).

Analisando os grupos, percebe-se que o comportamento em “S” é mais expressivo para os testes com velocidade baixa (0,5 m/s), indicando um possível efeito desse parâmetro. Além disso, todos os experimentos seguem, dada uma geada suficientemente madura, a mesma tendência. Essa observação é confirmada pelo gráfico a esquerda da Figura 50, que representa a média de cada grupo. A direita da Figura 50, por sua vez, é apresentado a média geral de todos os grupos. Realizando a comparação com a tendência teórica ($\sqrt{t}$) é possível notar que para espessuras abaixo de 2 mm os resultados experimentais indicam uma geada mais fina que a esperada, o que está em linha com o comportamento em “S”. Para espessuras superiores a 2 mm, a curva experimental segue a tendência com a $\sqrt{t}$, assim como indicado por Hermes *et al.* (2014). Por fim, nota-se que como a massa segue uma tendência linear e a espessura segue a $\sqrt{t}$, é esperado que a densidade siga a $\sqrt{t}$, observação que dá respaldo as correlações analisadas no capítulo 1.4.2.

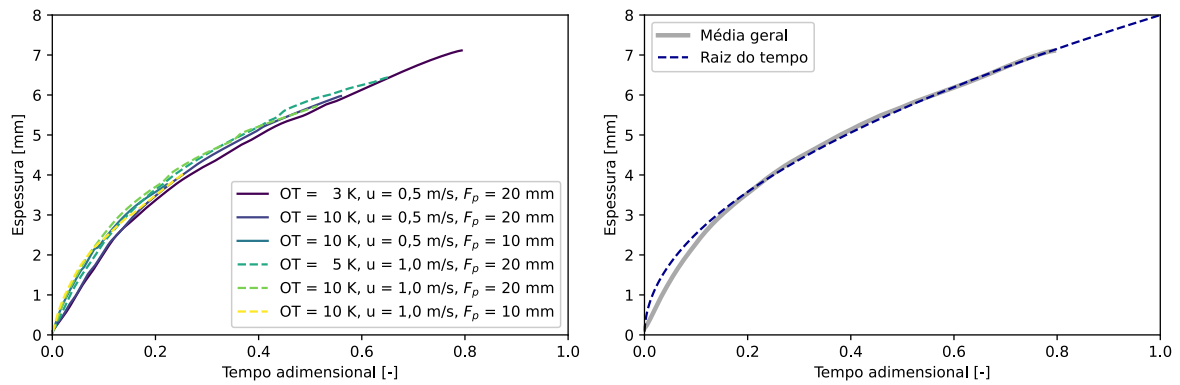


Figura 50 – Gráficos das evoluções médias da espessura da geada (normalizados).

3.2 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, investigou-se o impacto das variáveis operacionais sobre o crescimento da geada. As principais conclusões extraídas da análise dos dados experimentais foram:

- **Massa e espessura:** a massa de geada apresentou uma relação linear com a diferença de umidade absoluta ($\Delta\omega$) e com o tempo. Já a espessura demonstrou dependência linear com o super-resfriamento (ΔT_s) e, para a geada madura, seguiu a tendência com a raiz quadrada do tempo ($\sqrt{t}$).
- **Parâmetros secundários:** A sobretemperatura (OT) e o espaçamento entre placas

(F_p) mostraram pouca influência direta sobre a densidade e espessura da geada nas condições avaliadas, sendo seus efeitos atribuídos majoritariamente a alterações na temperatura superficial da geada e na capacitância térmica do fluxo de ar, respectivamente.

- Comportamento transiente: identificou-se um comportamento em "S" na evolução temporal da espessura durante os estágios iniciais de formação ($\delta_f < 2\text{mm}$). Esse fenômeno foi atribuído à mudança no mecanismo de nucleação e na morfologia dos cristais, variando de uma camada inicial densa (condensação/congelamento) para um crescimento dendrítico acelerado (dessublimação).

4 MODELOS PARA FORMAÇÃO DE GEADA

4.1 CORRELAÇÕES PARA DENSIDADE

Com base na análise de tendências realizada no capítulo anterior é proposta uma nova correlação, explícita e baseada no tempo, para facilitar a utilização e implementação em modelos de formação de geada. A correlação proposta é comparada então com os seus pares mais recentes, apresentados na introdução desse trabalho.

Uma das maiores diferenças desse trabalho, quando comparado a outros da literatura, é a utilização de superfícies resfriadas de grande comprimento (300 mm). Isso leva a uma melhor representação de uma aleta real de um trocador. Porém, devido a essa dimensão mais elevada, ao longo do comprimento há a redução de temperatura e umidade do ar, com uma alteração apreciável nas condições de formação de geada. Para levar em conta esse efeito de maneira adequada a superfície de formação foi dividida em 5 volumes de controle ao longo do escoamento. Dadas as condições de entrada de cada elemento, a densidade da geada é determinada pela correlação avaliada, enquanto a espessura é a própria observada experimentalmente. Com a espessura e densidade é possível calcular a massa depositada no elemento e, por consequência, as condições de entrada para o próximo volume de controle. O processo se repete até o último elemento. A massa total é então utilizada para calcular a densidade média que é comparada com o resultado experimental.

Como visto, para espessuras reduzidas, o experimento apresenta um comportamento em “S”, de difícil modelagem e observação experimental precisa. Desse modo, optou-se por realizar a análise das correlações da literatura utilizando apenas dados para espessuras maiores que 2 mm. Assim, foram selecionados pontos para 3h e 6h, em um total de 56 medições experimentais da densidade. Observa-se que os resultados experimentais, para valores de espessura menores que 2 mm, tendem a possuir uma menor espessura que a curva teórica esperada (devido a formação de uma geada fina e densa inicial). Desse modo, a desconsideração de pontos inferiores a 2 mm é conservadora, pois a geada prevista pela correlação é menos densa (e mais prejudicial ao evaporador) do que de fato a geada formada. Além disso, considerando uma distância de aleta de 5 mm, o ponto de bloqueamento do trocador ocorre para uma espessura de 2,5 mm.

4.1.1 Correlação proposta

Parte-se da definição de que a densidade é a razão entre a massa (M_f) e o volume (V_f). Para a massa, foi verificado uma dependência linear com $\Delta\omega$, e que o efeito da velocidade está embutido no cálculo de h_m . Além disso, a dependência linear com o tempo foi confirmada. Desse modo é possível escrever que: $M_f = h_m A_s \Delta\omega t$. O volume, por sua vez, depende da espessura, que conforme observado nesse trabalho é proporcional ao super-resfriamento. Quanto a relação com o tempo, foi confirmado que a espessura segue a $\sqrt{t}$. Assim, tem-se que $V_f = a \Delta T_s A_s \sqrt{t}$, onde "a" é a constante de proporcionalidade entre a espessura e o super-resfriamento ($a = \delta_f / \Delta T_s$). Desse modo, a densidade da geada pode ser escrita como:

$$\rho_f = \frac{M_f}{V_f} = \frac{h_m A_s \Delta\omega t}{a \Delta T_s A_s \sqrt{t}} = \frac{h_m \Delta\omega}{a \Delta T_s} \sqrt{t} \quad (4.1)$$

Utilizando a analogia de Lewis é possível escrever o coeficiente de transferência de massa em função do de calor (eq. 3.2), que é obtido por uma correlação para Nusselt ($h_c = Nu_x k_a / x$), de modo que:

$$\rho_f = \frac{Nu_x k_a}{x} \frac{1}{c_p Le^{2/3}} \frac{\Delta\omega}{a \Delta T_s} \sqrt{t} \quad (4.2)$$

Como observado experimentalmente, as placas não possuem interferência uma na outra, caracterizando assim um escoamento externo em placa plana. Além disso, para o caso específico do experimento há uma região de desenvolvimento fluidodinâmico sem aquecimento. Para esse caso a correlação apropriada para Nusselt é dada por (Kays, 2005):

$$Nu_x = Nu_x|_{\xi=0} x_{cor} \quad (4.3)$$

onde $Nu_x|_{\xi=0}$ corresponde ao valor de Nusselt calculado para x sem considerar a região prévia de desenvolvimento, e x_{cor} corresponde ao parâmetro que captura os efeitos da região de entrada, dado por:

$$x_{cor} = \left(1 - \left(\frac{\xi}{x}\right)^{3/4}\right)^{-1/3} \quad (4.4)$$

onde ξ é o comprimento da região de desenvolvimento sem troca de calor (300 mm para esse trabalho). Substituindo a equação 4.3 na 4.2 e utilizando que, para escoamentos laminares externos, $Nu_x|_{\xi=0} = 0,332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$ (Lienhard, 2005), obtém-se:

$$\rho_f = 0,332 \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \frac{k_a}{x} \frac{1}{c_p \text{Le}^{2/3}} \frac{\Delta\omega}{a \Delta T_s} x_{\text{cor}} \sqrt{t} \quad (4.5)$$

abrindo o número de Reynolds e reorganizando a equação chega-se a:

$$\rho_f = \frac{0,332 \rho_a^{1/2} \text{Pr}^{1/3} k_a}{c_p \text{Le}^{2/3}} \frac{1}{a \Delta T_s} \sqrt{\frac{ut}{x}} x_{\text{cor}} \quad (4.6)$$

Avaliando o termo $\frac{0,332 \rho_a^{1/2} \text{Pr}^{1/3} k_a}{c_p \text{Le}^{2/3}}$ para uma temperatura do ar de -30°C a 0°C observa-se uma variação menor que 1%. Desse modo essa parcela da correlação é incorporada ao coeficiente "a", de modo que:

$$\rho_f = a \frac{\Delta\omega}{\Delta T_s} \sqrt{\frac{ut}{x}} x_{\text{cor}} \quad (4.7)$$

Reconhece-se a presença do número de Jacob modificado $\left(\text{Ja} = \frac{c_p \Delta T_s}{i_{sv} \Delta\omega} \right)$, parâmetro introduzido por Hermes *et al.* (2014) e recorrente na literatura de fenômenos de formação de geada. Assim, é realizada a substituição do número e agrega-se o valor de c_p e i_{sv} ao coeficiente "a":

$$\rho_f = \frac{a}{\text{Ja}} \sqrt{\frac{ut}{x}} x_{\text{cor}} \quad (4.8)$$

Para capturar variações de densidade causadas por diferentes morfologias, é proposto um expoente "b" ao número de Jacob modificado:

$$\rho_f = \frac{a}{\text{Ja}^b} \sqrt{\frac{ut}{x}} x_{\text{cor}} \quad (4.9)$$

nota-se que para evaporadores domésticos não há região de desenvolvimento prévia, de modo que $x_{\text{cor}} = 1$ e a correlação para a densidade é dada por:

$$\rho_f = \frac{a}{\text{Ja}^b} \sqrt{\frac{ut}{x}} \quad (4.10)$$

Analizando a forma da correlação proposta percebe-se a grande similaridade com a de Hermes *et al.* (2014), com a adição apenas dos efeitos de velocidade do ar e do comprimento da placa, o que reforça as bases físicas já presentes no trabalho de 2014.

4.1.2 Avaliação das correlações

Visando determinar a correlação de densidade de geada mais apropriada para condições de evaporadores domésticos, foi realizada uma avaliação de 4 correlações da literatura, além da proposta. Essas correlações foram escolhidas entre as mais recentes e são todas dependentes do tempo, uma vez que a dependência com a temperatura de superfície exigiria a utilização de um modelo auxiliar. Para que a análise fosse a mais justa possível, todos os modelos foram regredidos novamente com base nos dados experimentais do trabalho. Assim, é comparado a forma das correlações e a estratégia de modelagem.

Como figura de mérito para comparação é utilizado o valor do coeficiente de determinação (R^2) obtido comparando o valor experimental de densidade e o obtido pela correlação. Algumas correlações possuem um número maior de coeficientes, o que aumenta o grau de liberdade, facilita o ajuste, e incrementa o R^2 . Porém isso também pode acarretar o fenômeno de sobreajuste (*overfitting*), onde o modelo descreve bem os pontos para o qual foi regredido, mas falha em fazer previsões futuras. Assim, para verificar a capacidade das correlações de prever pontos fora do espaço de regressão foi utilizada a técnica de validação cruzada (Hastie, 2009). Para isso os dados experimentais foram divididos aleatoriamente em 5 grupos. Cada correlação é então regredida utilizando 4 dos 5 grupos (grupos de treinamento), e é avaliado o valor de R^2 no grupo restante (grupo de teste). Esse processo é repetido utilizando cada um dos 5 grupos como grupo de teste, e o valor final de R_c^2 é a média dos 5 valores de R^2 dos grupos de teste. Um exemplo do processo de validação cruzada é apresentado na Figura 51, onde a correlação proposta é regredida para os pontos de treino e avaliada para os pontos de teste, obtendo um valor de R^2 de 0,81.

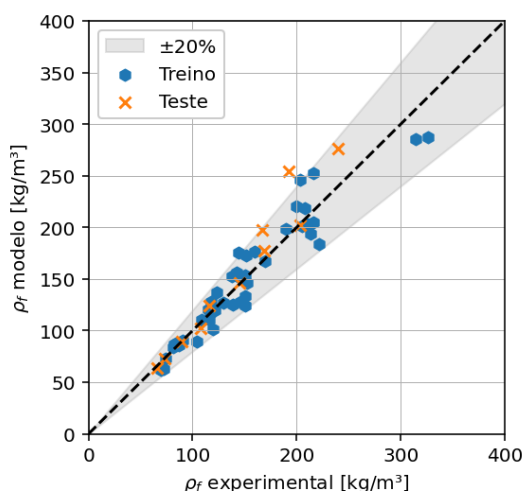


Figura 51 – Exemplo de regressão realizada na validação cruzada.

Os resultados para a regressão de cada uma das correlações avaliada é apresentado na Figura 52, com gráficos indicando a comparação entre os valores experimentais e previstos pelo modelo na regressão completa.

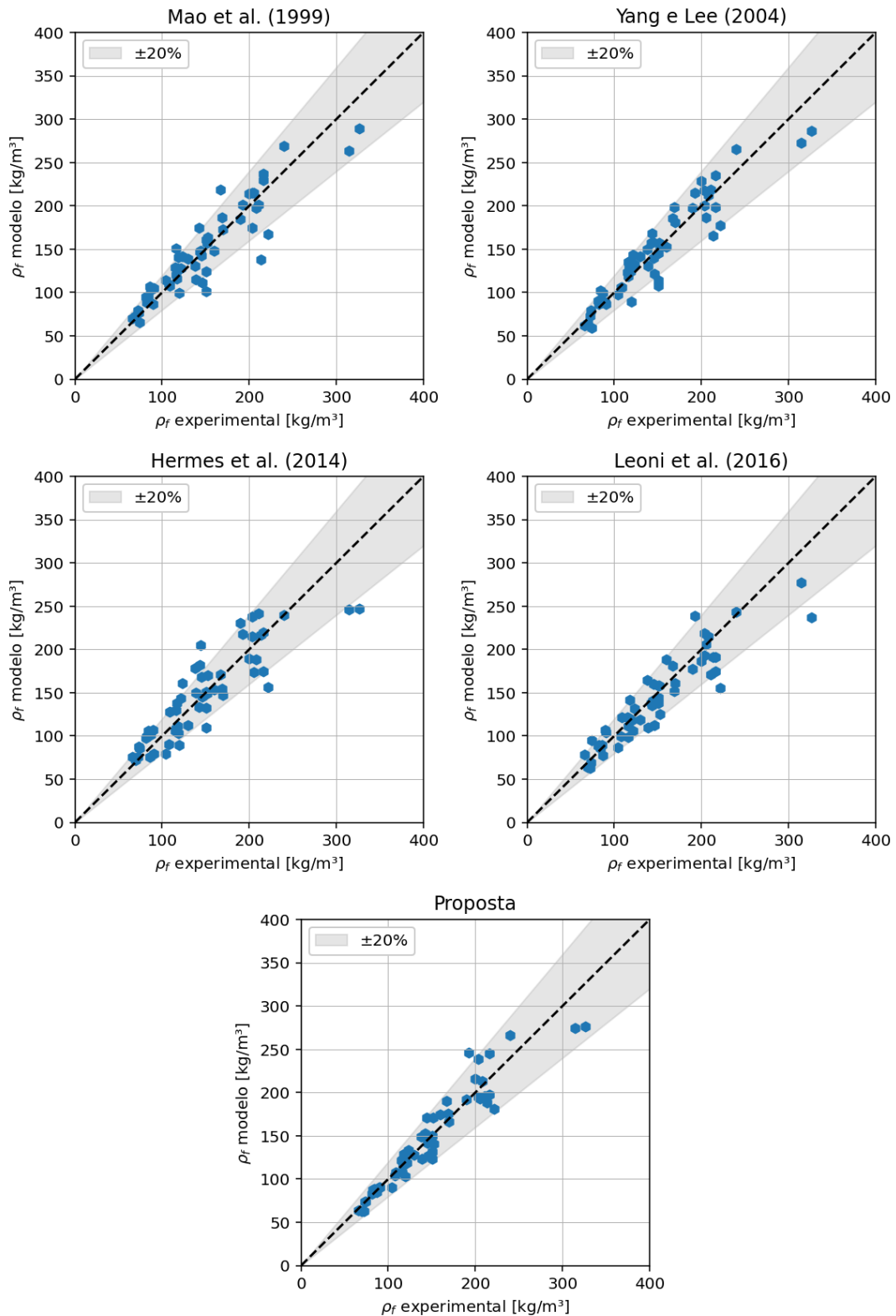


Figura 52 – Avaliação das correlações para densidade

Uma análise quantitativa é observada na Tabela 3 com: a quantidade de coeficientes de cada modelo; o valor de R^2 , obtido com a regressão utilizando todos os pontos disponíveis; e o valor de R_c^2 , obtido da análise de validação cruzada. Observa-se que as correlações com grande número de coeficientes: Mao, Yang e Lee, e Leoni, obtiveram um bom desempenho para R^2 , com um valor próximo de 0,86. Além disso, a grande maioria dos pontos analisados nos gráficos ficou dentro de uma banda de 20% de erro. Destaca-se entre essas correlações a de Yang e Lee, que obteve o maior valor de R^2 (0,89), e a menor quantidade de pontos fora da banda de 20%. Apesar de possuírem um bom valor R^2 , as correlações apresentam uma queda significativa quando analisado o R_c^2 . Isso indica que essas correlações possuem coeficientes em excesso e estão sofrendo de sobreajuste, tendo dificuldades em prever pontos fora da região de regressão. Em oposição a esses modelos, o modelo de Hermes *et al.* (2014), apresenta um número muito menor de coeficientes (2), e sua modelagem é fortemente baseada na física do fenômeno. Como consequência o fenômeno de sobreajuste é muito menor e a redução de R^2 para R_c^2 é de apenas 0,02. Porém, por não possuir sensibilidade a velocidade, o modelo de Hermes *et al.* apresenta um valor de R^2 relativamente baixo de 0,77, e seus pontos têm maior espalhamento no gráfico, com uma grande quantidade fora da região de 20%.

A correlação proposta, por sua vez, utiliza também poucos coeficientes (2) e uma modelagem física do fenômeno, tendo uma redução de R^2 para R_c^2 de apenas 0,05. Além disso, por possuir uma modelagem dos efeitos da velocidade do ar, a correlação consegue se adequar melhor aos pontos experimentais, tendo o maior R^2 (0,90) entre todos os modelos analisados e com 98% dos pontos dentro de uma banda de erro de 20%, como visto na Figura 52.

Tabela 3 – Avaliação das correlações para densidade de geada

Correlação	Coeficientes	R^2	R_c^2 (x)
Mao <i>et al.</i> (1999)	6	0,84	0,73
Yang e Lee (2004)	5	0,89	0,80
Hermes <i>et al.</i> (2014)	2	0,77	0,75
Leoni <i>et al.</i> (2016)	5	0,85	0,76
Proposta	2	0,90	0,85

Como explorado no capítulo 3.1, a temperatura de superfície de evaporadores domésticos chega próximo a valores de -30°C , porém devido a dificuldades experimentais, foram realizados testes apenas até -22°C . Assim, para verificar se a correlação é capaz de prever pontos para temperaturas de parede tão baixas quanto as observadas em

refrigeradores é proposta uma análise da capacidade de extrapolação. Para tanto, a correlação foi regredida utilizando pontos com temperatura de parede de -14°C ou mais, como indicado na Figura 53. Observa-se que mesmo os pontos com T_w de -22°C não estejam no conjunto de regressão, eles são satisfatoriamente atendidos pelo modelo. Além disso, comparando as Figuras 51 (correlação proposta) e 52, nota-se a semelhança dos resultados, mostrando mais uma vez que a física dominante para -22°C é muito similar aos pontos com temperatura de parede superior a -14°C. Desse modo, considera-se razoável extrapolar a correlação proposta para valores de temperatura 8°C além da região de regressão, chegando aos -30°C usualmente observados em evaporadores domésticos.

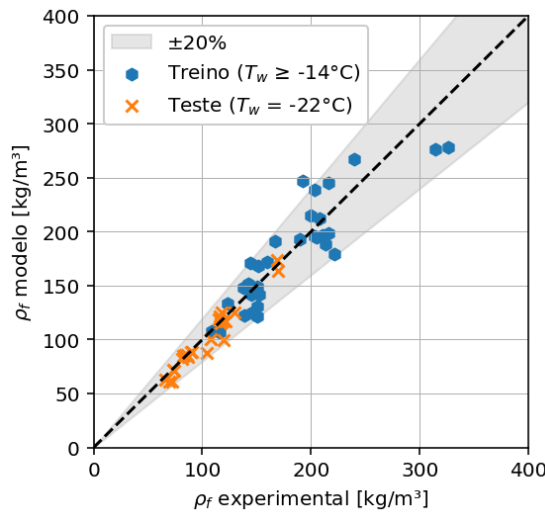


Figura 53 – Capacidade de extrapolação de T_w do modelo proposto

4.1.3 Avaliação das tendências da correlação proposta

A correlação proposta, para aplicação em evaporadores domésticos, sendo regredida para a totalidade dos pontos experimentais válidos, é dada por:

$$\rho_f = \frac{0,83}{Ja^{0,78}} \sqrt{\frac{ut}{x}} \quad (4.11)$$

Analisando a correlação é possível verificar os efeitos da condição de formação da geada em sua densidade, assim como analisado para outros trabalhos na Tabela 1. Analisando a correlação observa-se que a temperatura do ar não tem efeito sobre a densidade, uma vez que a formulação não considera esse parâmetro. Isso vai na contramão de outros trabalhos, que indicam um aumento de densidade com a temperatura do ar. Uma possível explicação para isso é que muitos trabalhos consideram o aumento da temperatura do ar com

manutenção da umidade relativa. Como consequência, há um aumento da umidade absoluta e, como será mostrado a seguir, isso leva a um aumento da densidade. Para a velocidade do ar, observa-se na correlação que há um aumento da densidade com o aumento desse parâmetro, assim como em outros trabalhos. A umidade absoluta do ar e a temperatura de superfície são parâmetros com os quais não é possível fazer uma análise direta analisando a correlação, pois ambos afetam o numerador (ΔT_s) e denominador ($\Delta \omega$) do número de Jacob modificado. Para possibilitar a análise é construído um gráfico na Figura 54 apresentando o valor de densidade em função da temperatura de parede e da umidade absoluta do ar. Os pontos são analisados para um valor de x de 150 mm, uma velocidade de 0,5 m/s, um tempo de 6 horas e uma temperatura do ar de 4 °C. No gráfico, observa-se que umidade do ar leva a um aumento na densidade da geada, esclarecendo assim a influência desse parâmetro, que não é um consenso em outros trabalhos da literatura. A temperatura da parede leva também a um aumento da densidade, comportamento já esperado em outros trabalhos. Na Figura 54, é realizada também uma comparação com a correlação de Hermes *et al.* (2014), que possui uma construção muito similar à proposta. Para a análise são utilizados os próprios coeficientes regredidos por Hermes *et al.* e a comparação mostra a similaridade de resultados e tendências. No gráfico da correlação proposta é também ilustrado a região de regressão, limitada pelos experimentos realizados. Essa região, combinada com a região de extrapolação razoável, justificada no capítulo 4.2.2, indica que a correlação é capaz de atender a maior parte das condições para evaporadores domésticos.

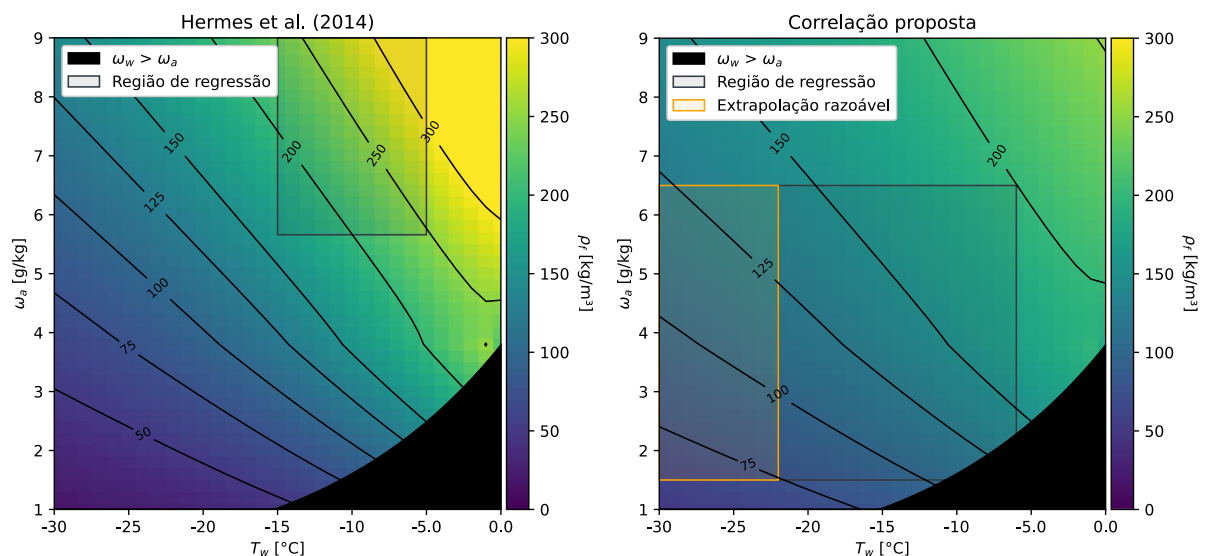


Figura 54 – Valores de densidade da geada para a correlação de Hermes *et al.* (2014) e proposta

4.2 MODELOS PARA A ESPESSURA DA GEADA

Para avaliar os modelos completos, com previsão para massa e espessura de geada, foi realizado um processo similar ao executado para análise das correlações para densidade. A superfície de formação é dividida em 5 elementos ao longo do comprimento, e as propriedades em cada elemento são consideradas constantes. O modelo avaliado calcula a deposição de massa no elemento e define a condição de entrada para o seguinte, até o fim da placa. O valor médio de espessura e a massa total é comparado com o resultado experimental.

4.2.1 Modelo proposto

Para a determinação do processo de formação de geada é necessário calcular dois dos três parâmetros da tríade: espessura, massa e densidade. Sendo o parâmetro não calculado consequência dos outros dois. Considerando que já existe um desenvolvimento adequado para a correlação da densidade, é necessário determinar apenas mais um parâmetro para solução do modelo: espessura ou massa. Opta-se, então, pela massa, devido à sua boa modelagem através da analogia de Lewis. Além disso, foi observado capítulo 3.1.5, que esse parâmetro possui um comportamento estritamente linear com o tempo. Desse modo, para calcular a deposição de massa é utilizada a condição saturada da superfície resfriada (T_w), invariável no tempo para os experimentos realizados. Assim, com base no mesmo procedimento e correlações adotados no capítulo 4.1.1, a taxa de deposição da massa é dada por:

$$m_f = h_m A_s (\omega_a - \omega_w) \quad (4.12)$$

onde h_m é calculado através na analogia de Lewis dado um valor de h_c (equação (3.2)). Para o cálculo de h_c utiliza-se a correlação para Nusselt para escoamento laminares externos em placa plana (Lienhard, 2005):

$$Nu_x = c Re_x^{1/2} Pr^{1/3} x_{cor} \quad (4.13)$$

com "c" sendo uma constante para ajuste aos dados experimentais, e x_{cor} dado pela equação (4.4) para escoamento com região de desenvolvimento sem aquecimento, e igual 1 para escoamentos sem região de entrada (maior parte dos evaporadores).

4.2.2 Avaliação dos modelos

Todos os modelos apresentados no capítulo 1.5 foram avaliados, além do modelo proposto. A avaliação foi realizada comparando os resultados obtidos para massa (Figura 55) e espessura (Figura 56) com os resultados experimentais. Os valores de R^2 , obtidos avaliando a regressão completa do modelo; e R_c^2 , obtidos com o processo de validação cruzada em 5 grupos, são apresentados na Tabela 4.

A exceção de Hermes *et al.* (2018), todos os trabalhos analisados necessitam de uma correlação para Nusselt para determinar a massa de geada depositada. Assim, para que a comparação entre os modelos fosse justa, a correlação adotada foi a mais adequada para os experimentos realizados, e é a mesma utilizada pelo modelo proposto. É importante notar que para todos os modelos os melhores resultados para o cálculo do número de Nusselt foram obtidos utilizando a velocidade de face (u), e por isso ela foi utilizada como padrão.

Tabela 4 – Avaliação dos modelos para formação de geada

Modelo	Coefficientes	$R^2 (M_f)$	$R_c^2 (M_f)$	$R^2 (\delta_f)$	$R_c^2 (\delta_f)$
Piucco (2008)	4	0,98	0,97	0,90	0,82
Hermes (2012)	4	0,98	0,97	0,93	0,86
Loyola <i>et al.</i> (2014)	3	0,92	0,92	0,86	0,81
Hermes <i>et al.</i> (2018)	6	0,95	0,95	0,84	0,79
Hollon <i>et al.</i> (2023)	3	0,95	0,95	0,84	0,82
Proposto	3	0,96	0,96	0,89	0,86

Para garantir a estabilidade da solução os modelos de Piucco (2008) e Hermes (2012), tiveram a sua correlação para densidade levemente modificada, baseando-se em uma correlação mais recente (Da Silva, 2012) e com uma modificação proposta nesse trabalho:

$$\rho_f = a \exp(bT_f - cT_{\text{dew}}) + \rho_{\text{air}} \quad (4.14)$$

A adição de ρ_{air} garante que a densidade da geada nunca assuma valores menores que a do ar. Isso evita erros numéricos e é consistente com a física, uma vez que a geada é formada por ar e gelo e possui um valor de densidade intermediário a esses dois. Analisando os resultados nos gráficos e na tabela, percebe-se que os dois modelos têm um bom desempenho com valores bem elevados para $R^2 (M_f)$ e $R^2 (\delta_f)$, e baixa redução para os valores de R_c^2 , indicando não haver sobre ajuste. Porém, destaca-se o modelo de Hermes (2012), que apresenta o maior valor de $R^2 (\delta_f)$ analisado, mesmo com um número baixo de

coeficientes de regressão. Além disso, observando os gráficos da Figura 56, nota-se que, ao contrário dos outros modelos, o erro para a espessura possui um valor absoluto relativamente constante, com valores relativos menores para maiores espessuras, comportamento característico de erros experimentais e não de modelagem. Em uma análise quantitativa, 95% dos pontos simulados obtiveram um erro inferior a 20%, quando comparados aos valores experimentais, tanto para massa quanto para espessura. Assim, a estratégia proposta por Hermes (2012) apresenta indícios de ser a mais adequada dentre todas as analisadas para a simulação do processo de formação de geada, capturando de maneira adequada a física do fenômeno.

Nesse contexto, a modelagem proposta aparece como alternativa. Com uma solução simples e baixo número de coeficiente (3), ela possui o maior valor de $R^2(\delta_f)$ e $R^2(M_f)$ entre as modelagens explícitas diretas, além de apresentar uma baixa redução na análise cruzada, indicando a consistência do modelo. Analisando o gráfico da Figura 56, nota-se também que 91% dos pontos ficam dentro da banda de erro de 20% para a espessura, e que possuem uma distribuição tipicamente aleatória, não apresentando indícios de física não modelada. Para a massa 95% dos pontos ficou dentro da banda de erro de 20%, mesmo valor obtido pelo modelo de Hermes (2012).

No modelo de Loyola *et al.* (2014), a deposição de massa é calculada baseada em uma condição supersaturada da superfície da geada e a densidade é determinada com a correlação para densidade de Hermes *et al.* (2014). Assim, na regressão foram determinados os coeficientes para as correlações de Nusselt e da densidade. Avaliando os resultados, observa-se que o modelo de Loyola *et al.* apresenta os piores resultados dentre os modelos iterativos, com um $R^2(\delta_f)$ de 0,86. Desse modo, entende-se que, para as condições analisadas, a modelagem de supersaturação não é adequada.

O modelo de Hermes *et al.* (2018), difere dos demais por determinar explicitamente o valor da espessura através de uma correlação. Para solução completa do modelo, essa correlação foi combinada com a correlação de densidade proposta. Os resultados indicam que apesar da facilidade para o uso, o modelo não é recomendado, pois apresenta baixos valores para $R^2(\delta_f)$ e indícios de física não modelada nos gráficos para validação da espessura.

O modelo de Hollon *et al.* (2023) é muito similar ao de Hermes (2012), com a principal diferença sendo a correlação para a densidade utilizada, com Hollon *et al.* utilizando modelos baseados no tempo e Hermes (2012) utilizando a correlação de Hayashi modificada, baseada na temperatura de superfície da geada. Essa modificação permite que

o modelo de Hollon *et al.* seja de mais fácil implementação, porém leva a resultados bem inferiores, com um baixo valor de R^2 (δ_f), e uma distribuição dos resultados de espessura na Figura 56, com um cruzamento com a reta de equivalência, indicando presença de física não modelada.

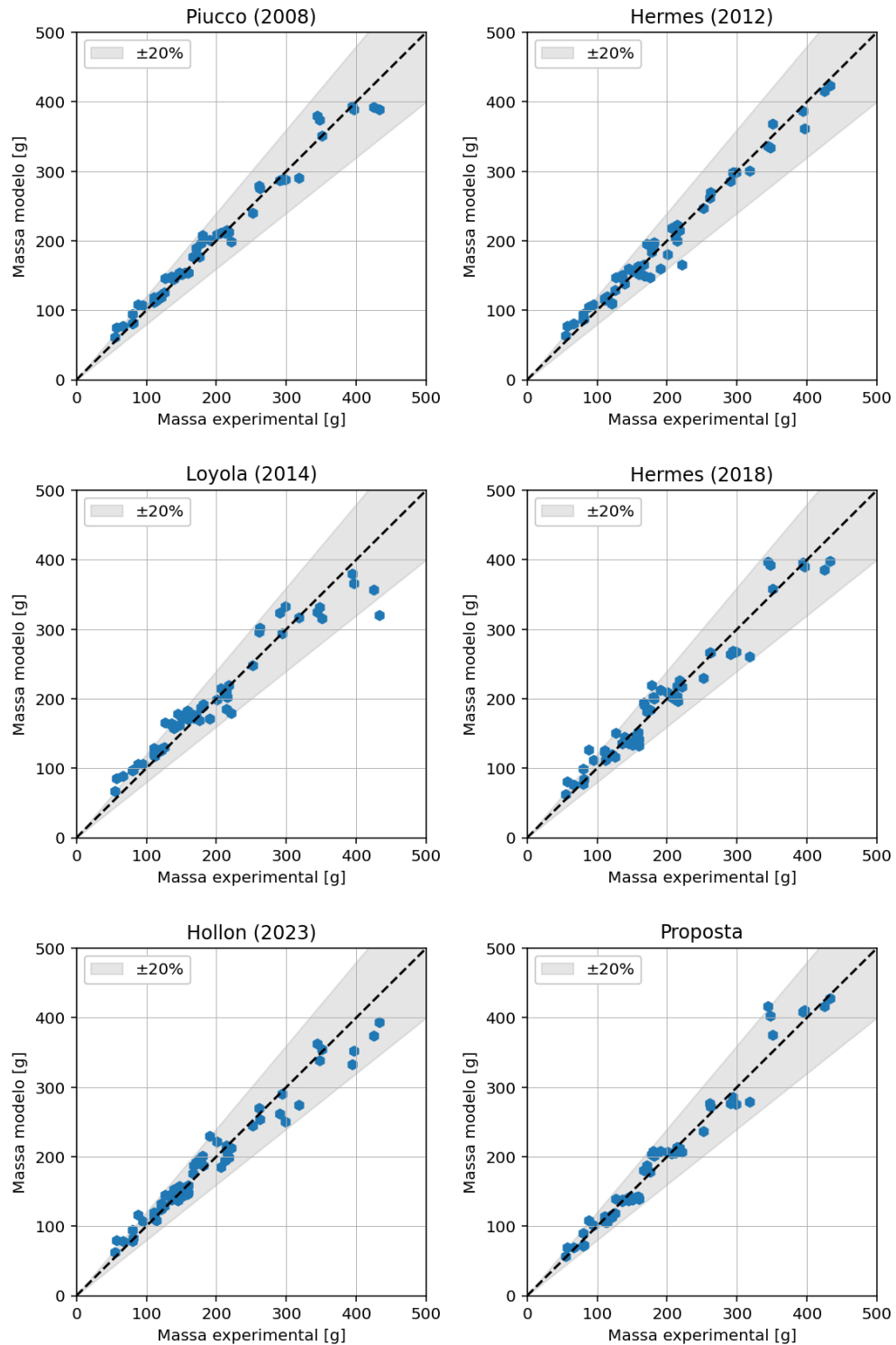


Figura 55 – Avaliação dos modelos para previsão de massa de geadas.

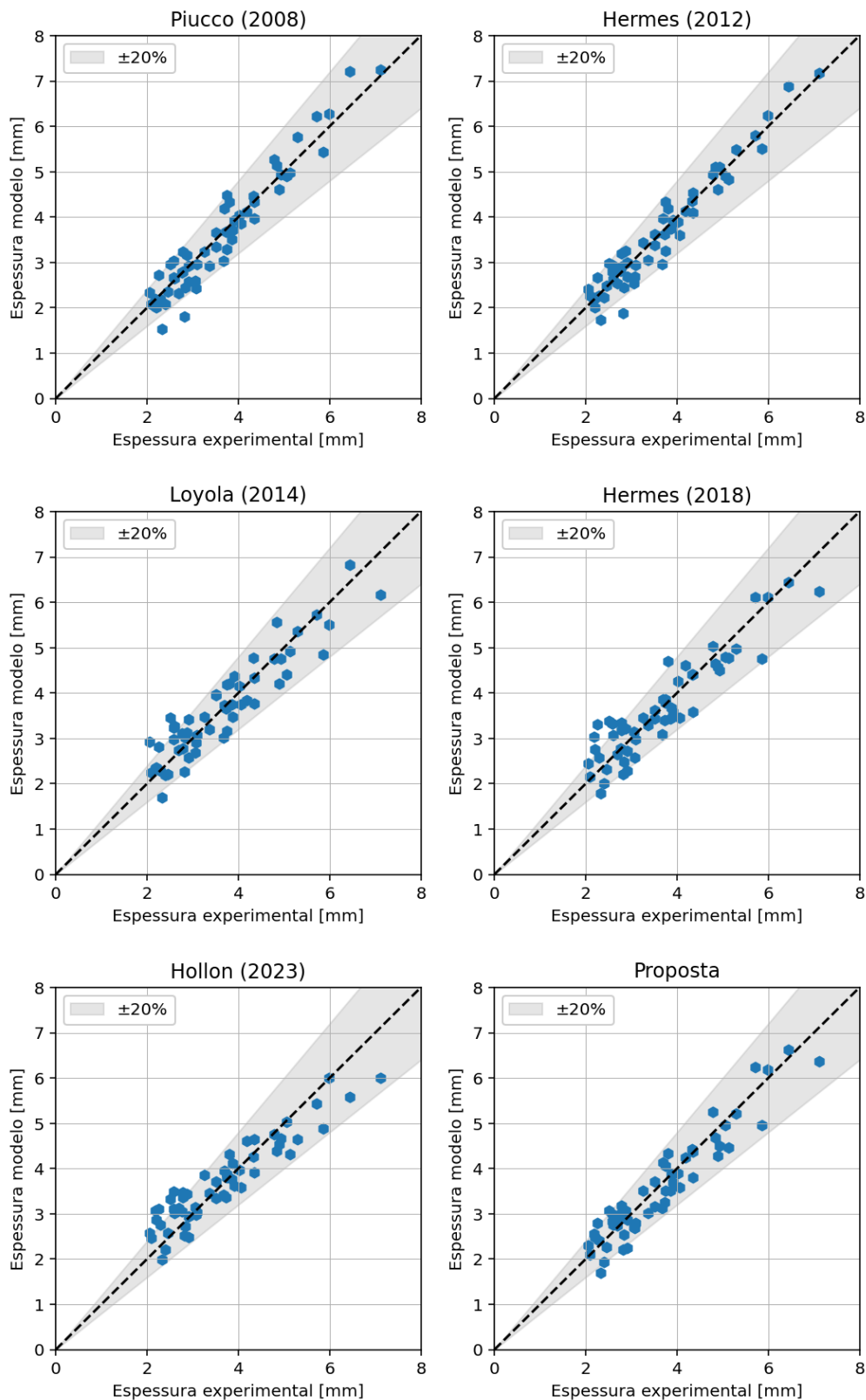


Figura 56 – Avaliação dos modelos para previsão de espessura de geada.

Uma vez que o modelo de Hermes (2012) apresentou os melhores resultados, são aqui apresentados os coeficientes obtidos da sua regressão para a densidade:

$$\rho_f = 332 \exp(0,147T_f - 0,118T_{\text{dew}}) + \rho_{\text{air}} \quad (4.15)$$

com as temperaturas dadas em °C. É também apresentado o coeficiente obtido da correlação para Nusselt:

$$\text{Nu}_x = 1,43\text{Re}_x^{1/2}\text{Pr}^{1/3}x_{\text{cor}} \quad (4.16)$$

O modelo proposto, por sua vez, utiliza a correlação para densidade já apresentada na equação (4.11), e uma correlação para Nusselt com uma variação no coeficiente de ajuste:

$$\text{Nu}_x = 0,9\text{Re}_x^{1/2}\text{Pr}^{1/3}x_{\text{cor}} \quad (4.17)$$

que possui um valor menor que de Hermes (2012) pois considera a temperatura da superfície resfriada (T_w), mais baixa e com maior diferença de temperatura e umidade com o ar do que a superfície da geada, utilizada pelo modelo de Hermes (2012).

4.2.3 Modelagem da variação de espessura da geada

Como já observado, o presente trabalho se diferencia da literatura em geral por analisar a formação de geada em uma superfície com um comprimento elevado (300 mm), similar ao observado em evaporadores domésticos. Assim, utilizou-se o modelo que obteve a melhor concordância experimental (Hermes, 2012), juntamente com a estratégia e divisão em volumes de controle para determinar a distribuição da geada ao longo do comprimento. Os resultados foram comparados com os valores obtidos experimentalmente. Na Figura 57 são apresentadas as distribuições para: $t = 6$ h; $F_p = 20$ mm; $u = 0,5$ m/s; $OT = 3$ K; $\Delta\omega = 2$ g/kg; e diferentes T_w .

Nos gráficos, é possível observar que existe uma queda de espessura ao longo do comprimento, o que pode ser explicado pela redução de umidade absoluta, que ocorre devido a transferência de massa do ar para a superfície em forma de geada. Com a redução da umidade absoluta do ar, há uma diminuição no super-resfriamento e um menor crescimento da geada, resultando em uma geada com menor espessura. Analisando o efeito de T_w , menores temperaturas de superfície, levam a um maior super-resfriamento, e a redução causada pelo secamento do ar é relativamente menos expressiva, por isso a espessura tem uma variação relativa menor. Nota-se que o modelo de Hermes (2012) foi capaz de capturar tais efeitos, tendo uma boa concordância. As fotos, com as quais foram determinadas as distribuições são apresentadas na Figura 58, mostrando mais uma vez a

redução de espessura ao longo do comprimento. É importante notar que, para facilitar a representação, o eixo x e y dos gráficos não estão na mesma escala, sendo uma distorção dos dados da foto, mas ainda adequados para a validação numérica.

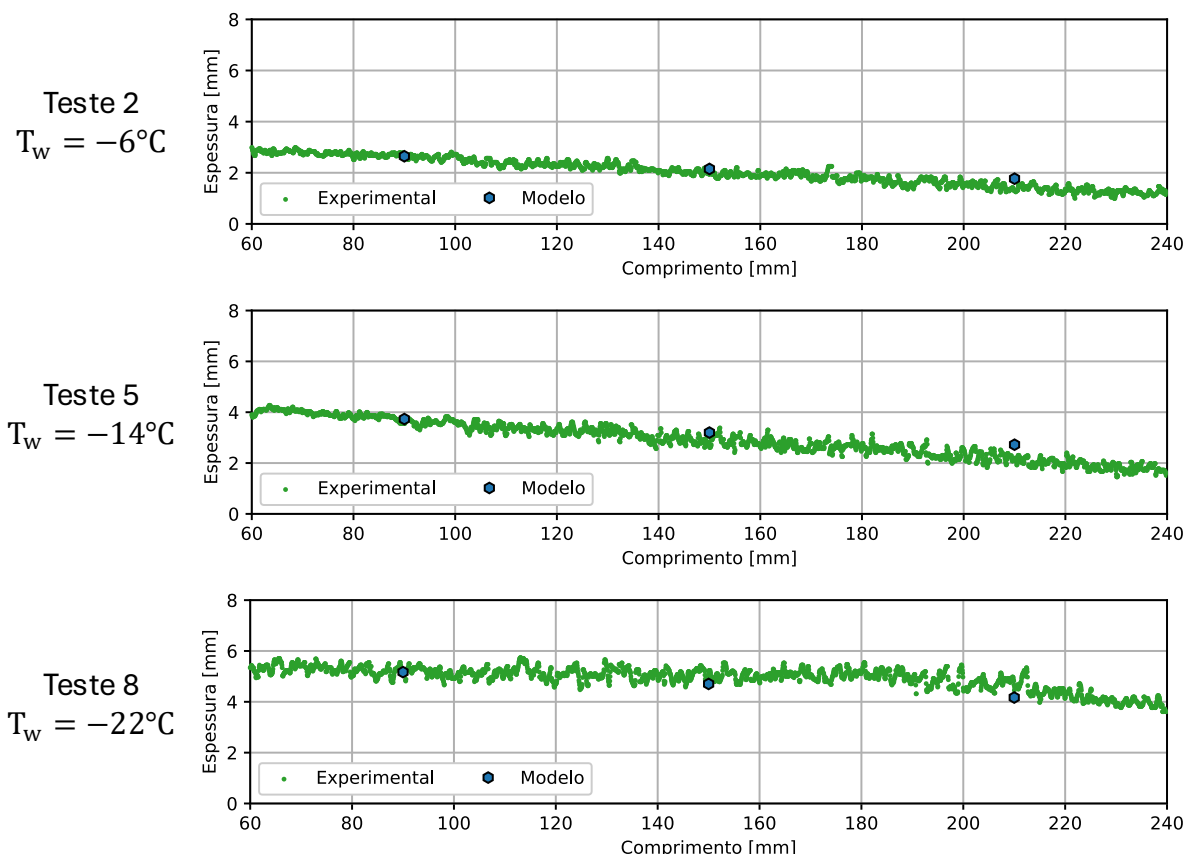


Figura 57 – Gráficos da distribuição de geada para diferentes T_w ($u = 0,5 \text{ m/s}$).

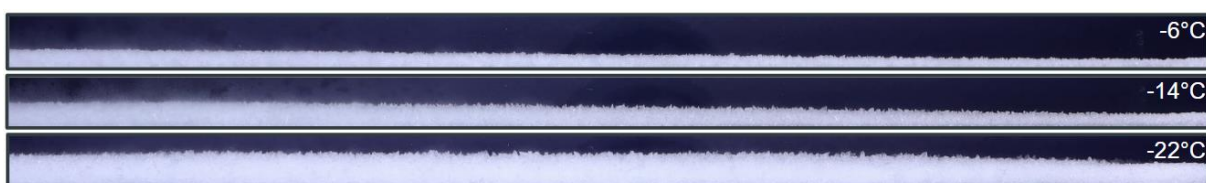


Figura 58 – Fotos da distribuição de geada para diferentes T_w ($u = 0,5 \text{ m/s}$).

O modelo foi validado também com os dados experimentais do grupo com: $t = 6 \text{ h}$; $F_p = 20 \text{ mm}$; $u = 1,0 \text{ m/s}$; $OT = 5 \text{ K}$; $\Delta\omega = 2 \text{ g/kg}$; e diferentes T_w ; com resultados apresentados na Figura 59. A maior diferença para o outro grupo é a velocidade mais elevada, que aumenta a capacitância do fluxo de ar e reduz a queda de umidade absoluta. Por isso, há uma menor redução de espessura ao longo do comprimento, o que pode ser confirmado analisando as fotos da Figura 60. Mais uma vez, o modelo de Hermes (2012) capturou os efeitos de aumento de capacitância, e teve também uma menor redução de

espessura ao longo do comprimento. Desse modo, essa modelagem se mostra adequada para a simulação de superfície com comprimento elevado, assim como as observadas em evaporadores domésticos. Por fim, é interessante notar que mesmo não possuindo diretamente o efeito da velocidade na correlação de densidade, e a dependência com a raiz do tempo, o modelo de Hermes (2012) consegue capturar esses efeitos. O primeiro ponto pode ser explicado pelo fato da maior velocidade leva a um aumento da temperatura de superfície, e por consequência a uma maior densidade.

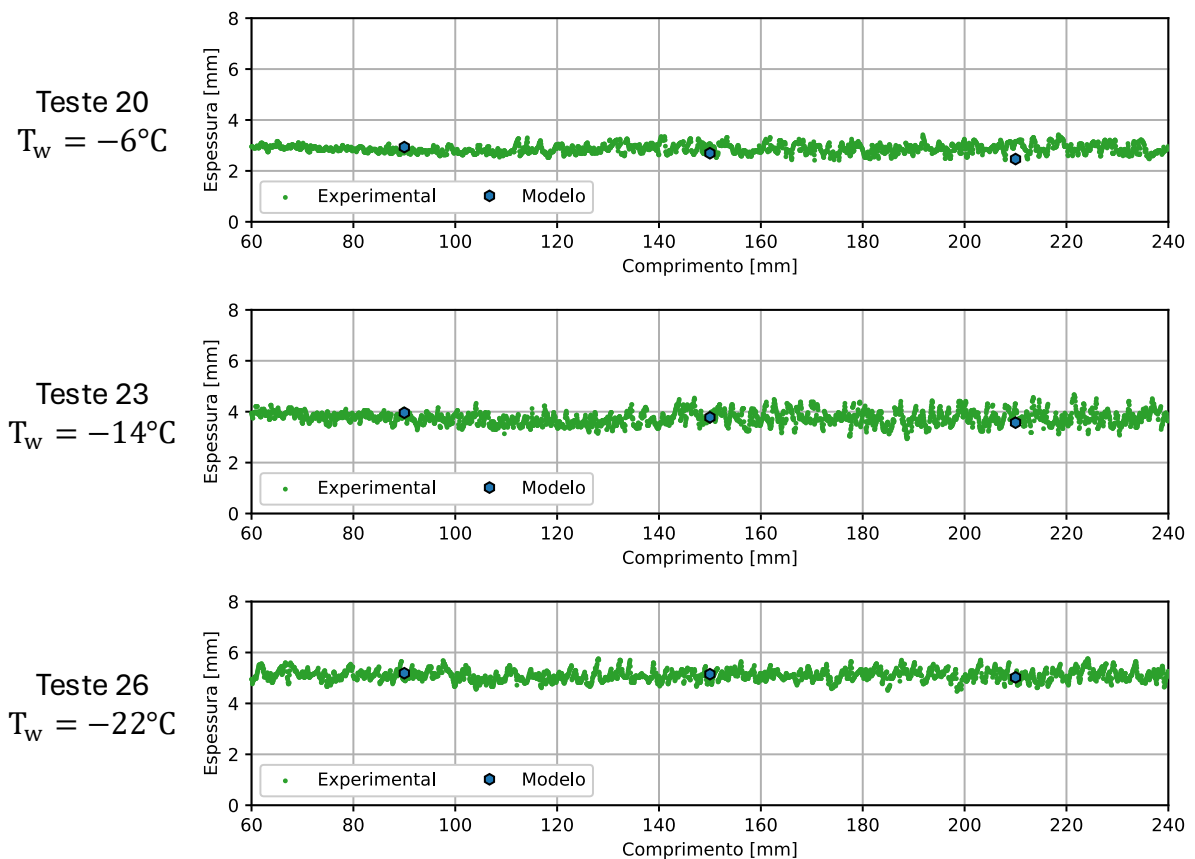


Figura 59 – Gráficos da distribuição de geada para diferentes T_w ($u = 1,0$ m/s).

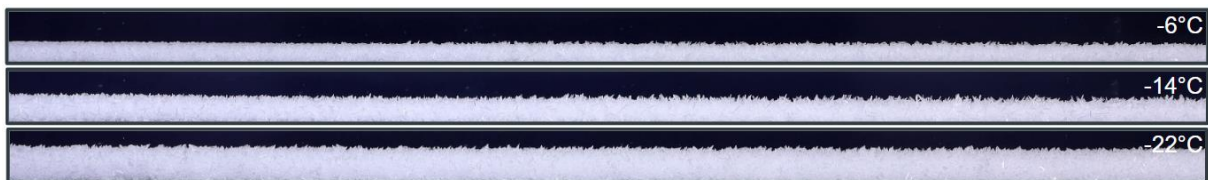


Figura 60 – Fotos da distribuição de geada para diferentes T_w ($u = 1,0$ m/s).

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O quarto capítulo dedicou-se à modelagem matemática do processo de formação de

geada. Com base na base de dados experimental, foi desenvolvida uma nova correlação semiempírica para a densidade da geada, dependente do número de Jacob modificado (Ja), do tempo e da velocidade do ar. A correlação proposta apresentou o melhor desempenho entre os modelos avaliados, com um R^2 de 0,90 e capacidade de prever 98% dos dados dentro de uma margem de erro de 20%. Na avaliação de modelos completos para a previsão da espessura da geada, concluiu-se que:

- O modelo algébrico de Hermes (2012), que utiliza a temperatura da superfície da geada para determinação da densidade, demonstrou a melhor concordância geral, prevendo 95% dos pontos experimentais de massa e espessura dentro da faixa de erro de 20%.
- Um novo modelo simplificado proposto neste trabalho, utilizando a correlação de densidade desenvolvida e assumindo a deposição de massa pela umidade da parede, mostrou-se uma alternativa robusta e de baixo custo computacional.
- A modelagem discretizada ao longo do comprimento da placa, utilizando as equações de Hermes (2012), provou-se eficaz em capturar a redução da espessura da geada causada pela desumidificação do ar ao longo do canal, validando sua aplicabilidade para a simulação de aletas de evaporadores domésticos.

5 CONCLUSÕES

A formação de geada em evaporadores de refrigeradores domésticos é um fenômeno crítico que leva ao bloqueio do trocador de calor e à perda abrupta de capacidade, tornando essenciais modelos preditivos robustos para o projeto e otimização desses componentes. Embora modelos da literatura apontem para uma grande dependência da espessura da geada em relação à sua densidade, evidenciou-se uma grande lacuna: a escassez de correlações de densidade para as condições específicas de refrigeradores domésticos, com as poucas disponíveis apresentando grandes divergências (até 100 vezes na previsão de espessura) e ausência de consenso sobre o efeito de parâmetros-chave, como a umidade do ar.

Buscando preencher essa lacuna de conhecimento, foi projetado e construído um túnel de vento capaz de controlar a temperatura, umidade e velocidade do ar, além da temperatura de superfície. O túnel utilizou um conjunto de placas resfriadas de 300 mm para emular as aletas do trocador, permitindo a observação da formação de geada em condições controladas e realistas.

Observou-se a evolução temporal da espessura com um fenômeno característico em forma de “S” nas fases iniciais ($\delta_f < 2$ mm). Este comportamento foi atribuído à transição do mecanismo de nucleação: de condensação e congelamento (geada inicial mais densa) para dessublimação (geada madura mais porosa), que altera a velocidade de crescimento. Para a geada madura, o crescimento tendeu a seguir a relação da raiz do tempo, conforme estabelecido na literatura. A massa de geada demonstrou uma dependência linear com $\Delta\omega$ e a espessura, com o super-resfriamento. Notou-se, ainda, que o aumento da temperatura de superfície, $\Delta\omega$ e velocidade levam a um aumento na densidade, enquanto a sobretemperatura tem pouco efeito. Para a distância entre placas, foram observados efeitos apenas devido a diferença de capacitância do fluxo de ar. O crescimento da massa com o tempo mostrou-se predominantemente linear.

Foi derivada uma correlação semiempírica inédita para a densidade de geada, dependente do número de Jacob modificado. Com o ajuste de apenas dois coeficientes, esta correlação obteve a melhor regressão dentre 5 dos trabalhos mais recentes da literatura, prevendo 98% dos pontos experimentais dentro de uma banda de erro de 20%.

Adotando a hipótese da deposição de massa ser governada pela umidade da superfície resfriada (o que respeita a linearidade da massa com o tempo), um modelo simplificado para previsão de massa e espessura foi desenvolvido. Este modelo se destacou

como a melhor alternativa para cálculos de baixo custo computacional e fácil implementação, com 95% e 91% dos pontos dentro de uma banda de erro de 20% para massa e espessura, respectivamente, superando os demais modelos explícitos analisados.

Em uma análise abrangente dos modelos, o modelo completo proposto por Hermes (2012) obteve o melhor desempenho dentre os trabalhos da literatura, prevendo 95% dos pontos dentro da banda de erro de 20% para ambas as grandezas, e demonstrando também satisfatória capacidade de prever a redução de espessura ao longo da placa devido à depleção de umidade.

5.1 Trabalhos futuros

- Estudar em detalhe o comportamento em “S” da geada no início do seu crescimento. Elaborar uma matriz de testes voltada a observar esse fenômeno para determinar precisamente critérios de acontecimento desse fenômeno e desenvolver uma modelagem apropriada.
- Realizar testes variando as condições de formação ao longo do tempo, como ocorre em evaporadores domésticos e verificar se o modelo consegue absorver esses efeitos.
- Avaliar diferentes estratégias de degelo: natural, convectivo e por superfície aquecida (simulando gás quente). Correlacionar a eficiência de degelo de cada um dos métodos com características da geada (e.g. massa total e densidade).
- Aplicar o modelo de Hermes (2012) para evaporadores domésticos, de forma discretizada, para capturar os efeitos de: variação de densidade de aleta; distribuição não uniforme de escoamento e umidade. Acoplar o modelo ao sistema de circulação de ar e ao sistema do fluido refrigerante para garantir uma simulação mais realista. Validar a modelagem com medições experimentais *in-situ*. Utilizar o modelo para avaliação de robustez, projeto e otimização de evaporadores domésticos.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Standard 41.2: Laboratory methods of testing fans for aerodynamic performance rating**. Atlanta, 2022.

BAILEY, Matthew P.; HALLETT, John. A comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: confirmation from the laboratory, AIRS II, and other field studies. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 66, n. 9, p. 2888-2899, 2009.

BEJAN, Adrian et al. Why solidification has an S-shaped history. **Scientific Reports**, v. 3, n. 1, p. 1711, 2013.

BENDER, James A. Ukichiro Nakaya. **Arctic**, v. 15, n. 3, p. 242-243, 1962.

BIGURIA, Gabriel; WENZEL, Leonard A. Measurement and correlation of water frost thermal conductivity and density. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 9, n. 1, p. 129-138, 1970.

BRIAN, P. L. Thibaut; REID, Robert C.; SHAH, Yatish T. Frost deposition on cold surfaces. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 9, n. 3, p. 375-380, 1970.

CHUNG, Yoong et al. Prediction of the frost growth and performance change of air source heat pump system under various frosting conditions. **Applied Thermal Engineering**, v. 147, p. 410-420, 2019.

DA SILVA, Diogo Lôndero da. **Análise da formação de gelo e geada e seu efeito no desempenho termo-hidráulico de evaporadores do tipo tubo aletado**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2012.

FONSECA, Lucas. **Aparato experimental para determinação da densidade de geada em canais de placas paralelas em condições usuais de refrigeradores domésticos**. 2025. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina.

FURUKAWA, Yoshinori; WETTLAUFER, John S. Snow and ice crystals. **Physics Today**, v. 60, n. 12, p. 70-71, 2007.

GONÇALVES, Joaquim Manoel. **Desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para a análise térmica de refrigeradores domésticos em regime permanente**. 2004. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2004.

HASTIE, Trevor et al. **The elements of statistical learning**. 2009.

HAYASHI, Y. et al. Study of frost properties correlating with frost formation types. 1977.

HERMES, Christian 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, 2009.

HERMES, Christian 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, 2012.

HERMES, Christian J. L.; LOYOLA, Felipe R.; NASCIMENTO JR, Valter S. A semi-empirical correlation for the frost density. **International Journal of Refrigeration**, v. 46, p. 100-104, 2014.

HERMES, Christian J. L.; SOMMERS, Andrew D.; BARBOSA JR, Jader R. Time scaling of frost accretion and the square-root-of-time rule. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 108, p. 104281, 2019.

HERMES, Christian J. L. et al. A study of frost build-up on hydrophilic and hydrophobic surfaces under forced convection conditions. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 100, p. 76-88, 2018.

HOLLON, Danielle et al. A non-iterative solution for frost growth on flat surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 217, p. 124578, 2023.

INCROPERA, F. P. Convection heat transfer in electronic equipment cooling. 1988.

INMETRO. **Portaria n. 332, de 2 de agosto de 2021**. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Refrigeradores e Assemblhados Consolidado. **Diário Oficial da União**, ed. 146, seção 1, p. 137, Brasília, 4 ago. 2021.

IRAGORRY, Jose; TAO, Yong-Xin; JIA, Shaobo. A critical review of properties and models for frost formation analysis. **HVAC&R Research**, v. 10, n. 4, p. 393-420, 2004.

ISOGUM. **Avaliação de Dados de Medição: Guia para a Expressão de Incerteza de Medição**. 1. ed. brasileira. ABNT; INMETRO, 2008.

KANDULA, Max. Correlation of water frost porosity in laminar flow over flat surfaces. **Special Topics & Reviews in Porous Media**, v. 3, n. 1, 2012.

KAYS, William Morrow; CRAWFORD, Michael E.; WEIGAND, Bernhard. **Convective heat and mass transfer**. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2005.

KNIGHT, Charles. Experiments on the contact angle of water on ice. **Philosophical Magazine**, v. 181, n. 23, p. 153-165, 1970.

KOBAYASHI, T. On the habit of snow crystals artificially produced at low pressures. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II**, v. 36, n. 5, p. 193-208, 1958.

KOBAYASHI, T. The growth of snow crystals at low supersaturations. **Philosophical Magazine**, v. 6, n. 71, p. 1363-1370, 1961.

LEE, Kwan-Soo; KIM, Woo-Seung; LEE, Tae-Hee. 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, 1997.

LEE, W.; KWON, O. K. Image processing for frost thickness measurement in fin-and-tube heat exchangers. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 24, p. 100937, 2021.

LEE, Y. B.; RO, S. T. Frost formation on a vertical plate in simultaneously developing flow. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 26, n. 8, p. 939-945, 2002.

LÉONI, Aurélia et al. State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces. **International Journal of Refrigeration**, v. 68, p. 198-217, 2016.

LIBBRECHT, Kenneth G. Morphogenesis on ice: the physics of snow crystals. **Engineering and Science**, v. 64, n. 1, p. 10-19, 2001.

LIBBRECHT, Kenneth G. A quantitative physical model of the snow crystal morphology diagram. **arXiv**, arXiv:1910.09067, 2019.

LIENHARD, John H. **A heat transfer textbook**. Phlogiston, 2005.

LOWE, Paul R.; FICKE, Jules M. The computation of saturation vapor pressure. **Environmental Prediction Research Facility, Naval Postgraduate School**, 1974.

LOYOLA, Felipe R.; NASCIMENTO JR, Valter S.; HERMES, Christian J. L. Modeling of frost build-up on parallel-plate channels under supersaturated air-frost interface conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 79, p. 790-795, 2014.

LU, Guoping et al. Lattice Boltzmann simulation of snow crystal growth in clouds. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D7, 2009.

MAO, Yanhui. **The measurement and analysis of frost accumulation on a flat plate with forced convection**. 1991. Tese (Doutorado) – University of Saskatchewan.

NA, B.; WEBB, R. Mass transfer on and within a frost layer. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 47, p. 899-911, 2004a.

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

NAKAYA, Ukichiro. **Snow crystals: natural and artificial**. Harvard University Press, 1954.

NASCIMENTO JR, Valter S.; LOYOLA, Felipe R.; HERMES, Christian J. L. A study of frost build-up on parallel plate channels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 60, p. 328-336, 2015.

NEGRELLI, Silvia. **Estudo teórico-experimental sobre a condutividade térmica da geada formada em canais de placas paralelas**. 2016. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência

dos Materiais, Curitiba, 2016.

NEGRELLI, Silvia; NASCIMENTO JR, Valter S.; HERMES, Christian J. L. A study of the effective thermal conductivity of frost formed on parallel plate channels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 78, p. 301-308, 2016b.

O'NEAL, Dennis Lee. **The effect of frost formation on the performance of a parallel plate heat exchanger**. Purdue University, 1982.

O'NEAL, D. L.; TREE, D. R. Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry. **ASHRAE Transactions**, v. 90, n. 2, p. 278-290, 1984.

OTSU, Nobuyuki. A threshold selection method from gray-level histograms. **Automatica**, v. 11, n. 285-296, p. 23-27, 1975.

PEREIRA, Paula do Vale. **Análise teórico-experimental do processo de deposição de vapor d'água em janelas de aeronaves**. 2017. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

PIUCCO, Robson Olímpio. **Análise teórico-experimental da formação de geada em refrigeradores domésticos**. 2008. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2008,

PRUPPACHER, Hans R.; KLETT, James D.; WANG, Pao K. **Microphysics of clouds and precipitation**. 1998.

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, 1978.

SHANGWEN, Lei et al. Experimental investigation of frost characteristics on vertical cold plate under forced convection influenced by surface temperature. **Applied Thermal Engineering**, v. 234, p. 121318, 2023.

SHIBKOV, A. A. et al. Morphology diagram of nonequilibrium patterns of ice crystals growing in supercooled water. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 319, p. 65-79, 2003.

SOMMERS, Andrew D. et al. A semi-empirical correlation for predicting the frost density on hydrophilic and hydrophobic substrates. **International Journal of Refrigeration**, v. 74, p. 313-323, 2017.

SONG, Mengjie; DANG, Chaobin. Review on the measurement and calculation of frost characteristics. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 124, p. 586-614, 2018.

STOREY, B. D.; JACOBI, A. M. The effect of streamwise vortices on the frost growth rate in developing laminar channel flows. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 42, n. 20, p. 3787-3802, 1999.

TOKURA, I.; SAITO, H.; KISHINAMI, K. Study on properties and growth rate of frost layers on cold surfaces. 1983.

TOKURA, I.; SAITO, H.; KISHINAMI, K. Prediction of growth rate and density of frost layer developing under forced convection. **Waerme-Stoffuebertrag**, v. 22, n. 5, 1988.

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, 2012.

YANG, Dong-Keun; LEE, Kwan-Soo. Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate. **International Journal of Refrigeration**, v. 27, n. 1, p. 89-96, 2004.

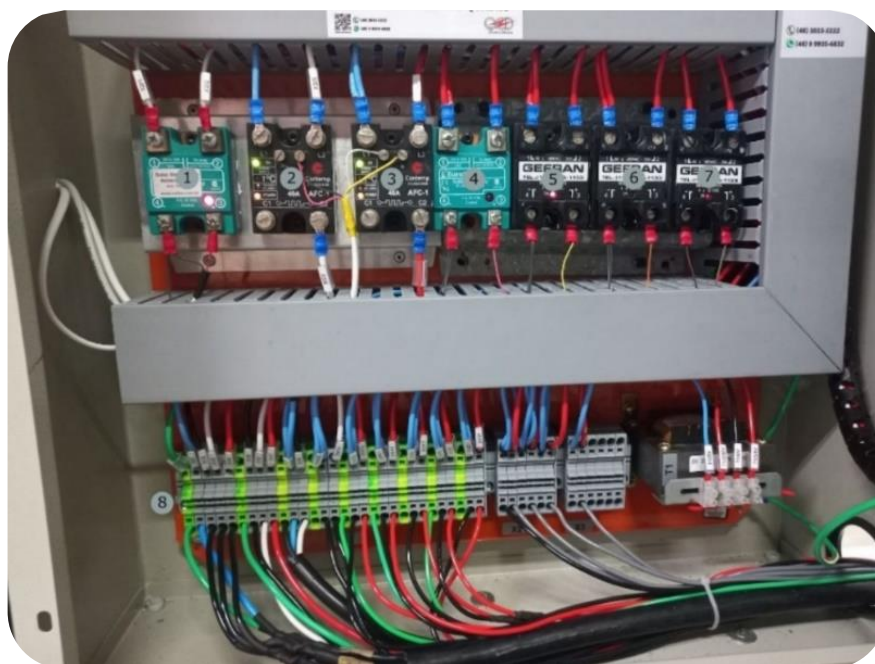
YOKOYAMA, Etsuro; KURODA, Toshio. Pattern formation in growth of snow crystals occurring in the surface kinetic process and the diffusion process. **Physical Review A**, v. 41, n. 4, p. 2038, 1990.

ZHANG, Long et al. Frosting mechanism and behaviors on surfaces with simple geometries: a state-of-the-art literature review. **Applied Thermal Engineering**, v. 215, p. 118984, 2022.

APÊNDICE I – SUBSISTEMAS DE POTÊNCIA E DE CONTROLE.

SUBSISTEMA DE FORNECIMENTO DE POTÊNCIA

O quadro elétrico recebe energia através de um sistema trifásico 380 V, responsável por distribuir energia a 380 e 220 V para os componentes do projeto que não são alimentados por corrente contínua. Possui medidas de segurança, como botão de emergência, e contadoras, que isolam o projeto da rede elétrica. Fazem parte do quadro - chaves de ativação individual por componentes, com respectivos indicadores LED - chave para ativação da fonte de transformação - botão de emergência - uma chave geral que pode ser ligada em MANUAL (quadro sempre energizado) ou AUTO (quadro depende do sistema de aquisição para ser energizado) que utiliza a lógica de um relé temporizador juntamente com um relé de estado sólido dentro do quadro. No quadro, optou-se por utilizar relé de ângulo de fase para regular a tensão de alimentação tanto da resistência do banho como também da resistência de ajuste de temperatura do túnel, uma vez que essas resistências são atuadores para controle de temperatura. As resistências de degelo, por sua vez, são controladas por relé de estado sólido e uma lógica de *duty-cycle* pois não é exigido um controle preciso de potência para elas. Na figura abaixo é mostrado o interior do quadro elétrico, com uma identificação por número dos componentes, abaixo da figura consta uma legenda indicando o propósito de cada componente.



Sistema de condicionamento da superfície de formação de geada do túnel

Legenda dos componentes do quadro elétrico:

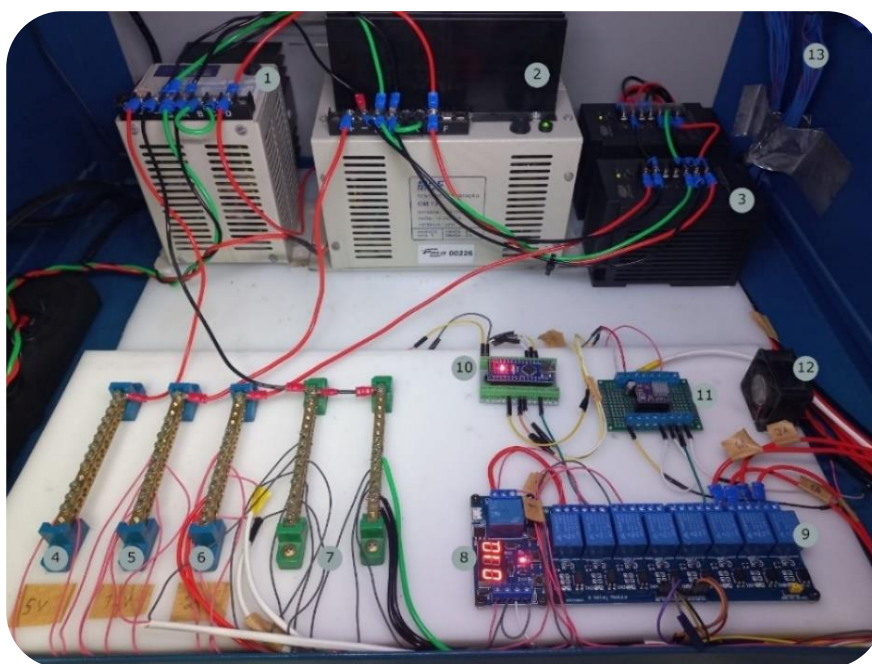
1. Relé de estado sólido, referente à posição (AUTO) da chave MANUAL/AUTO;
2. Relé de ângulo de fase, referente à resistência do banho;
3. Relé de ângulo de fase, referente à resistência do túnel;
4. Relé de estado sólido referente a válvula solenoide do evaporador 1 no túnel;
5. Relé de estado sólido, referente a válvula solenoide do evaporador 2 no túnel;
6. Relé de estado sólido, referente à resistência do evaporador 1;
7. Relé de estado sólido, referente à resistência do evaporador 2;
8. Fios de alimentação do quadro e dos componentes - lista da função de cada fio:
 - Bornes 1-5: alimentação trifásica do quadro, com terra, neutro e fases;
 - Bornes 6-9: inversor de frequência (WEG CFW-08);
 - Bornes 10-12: compressor do banho (Tecumseh TYA2438ZES);
 - Bornes 14 e 15: resistência do banho (1600 W);
 - Bornes 16-18: compressor do túnel (Embraco NT 2180GK);
 - Bornes 20 e 21: resistência do túnel (600 W);
 - Bornes 23 e 24: umidificador;
 - Bornes 26 e 27: resistência do vidro da câmara de teste (12 W);
 - Bornes 29 e 30: câmara EOS 250D;
 - Bornes 31 e 32: resistência do evaporador 1 (100 W);
 - Bornes 31 e 34: válvula solenoide evaporador 1;
 - Bornes 31 e 36: resistência do evaporador 2 (100 W);
 - Bornes 31 e 38: válvula solenoide evaporador 2.

CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

A maior parte do controle e toda a aquisição de dados é realizada por um computador conectado a um sistema de aquisição National Instruments CompactDAQ. A parte superior do sistema de aquisição e controle da bancada conta com as fontes de alimentação (corrente contínua) dos instrumentos e componentes eletrônicos presentes no projeto. Suas respectivas tensões (5, 12 e 24 Volts) estão ligadas nos barramentos, compartilhando o neutro (ligado também ao terra), juntamente com todos os outros componentes. Fazem parte dos componentes: um Arduino Nano, responsável por converter sinais analógicos para sinal PWM e enviar um sinal contador para o *driver* que controla um motor de passo, responsável por controlar os 3 *dampers*; um relé temporizador, que serve como medida de emergência caso o sistema supervisor desligue por motivos externos; uma placa de relés com optoacoplador, a fim de acionar certos equipamentos; e um ventilador para dissipar o calor. A parte inferior da bancada conta com o sistema de aquisição, que possui 5 módulos de leitura ou envio de sinais. As saídas dos módulos de envio e leitura de tensão e corrente

estão dispostas nos bornes. As saídas dos módulos de leitura de temperatura estão dispostas nas tomadas de termopares (tipo T), na parte externa da bancada.

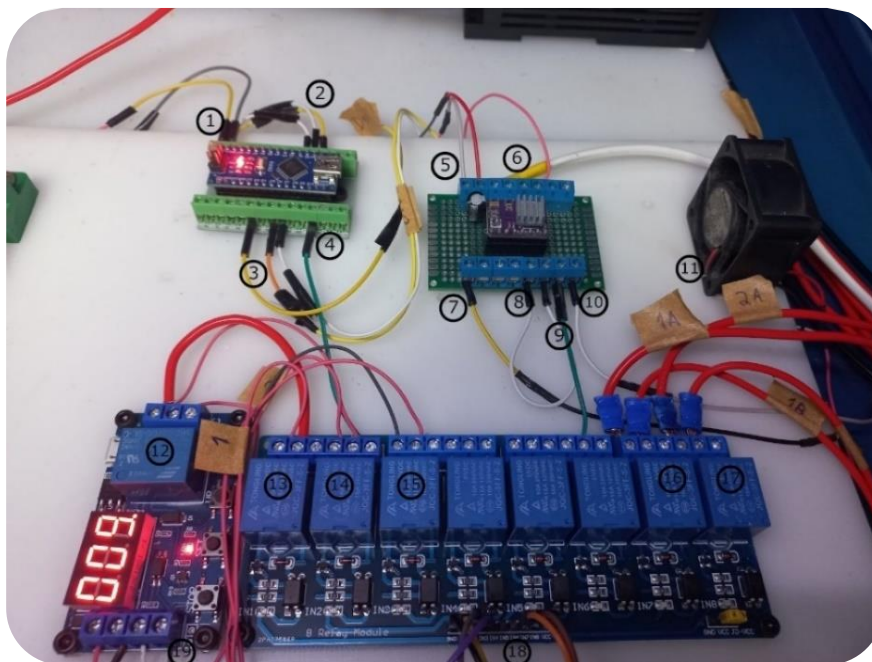
Seguem 3 figuras que ilustram o sistema de controle e aquisição. A primeira mostra a parte superior da bancada. A segunda figura, conta com um enfoque nos componentes: relé temporizador; módulo de placa de relé; Arduino Nano; e driver com uma legenda abaixo da imagem indicando a funcionalidade de cada entrada e saída. Por fim, a terceira figura ilustra a parte inferior da bancada, com destaque para o sistema de aquisição.



Controle e aquisição do túnel, parte superior da bancada

Legenda dos componentes controle e aquisição do túnel, parte superior da bancada:

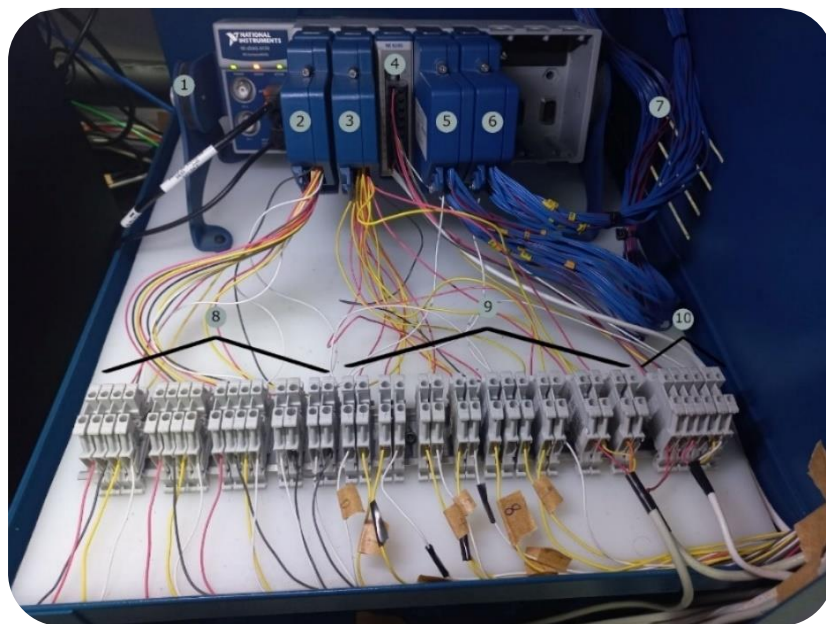
1. Fonte 5V;
2. Fonte 12V;
3. Duas fontes 24V;
4. Barramento 5V;
5. Barramento 12V;
6. Barramento 24V;
7. Barramento neutro (0V);
8. Relé Temporizador Digital XY-J02;
9. Relé 5V 10A 8 Canais com Optoacopladores;
10. Arduino Nano;
11. Driver para motor de passo DRV8825;
12. Ventilador;
13. Tomadas dos termopares conectados ao sistema de aquisição.



Entrada e saídas: Arduino Nano, temporizador, relés e driver

Legenda de entradas e saídas, arduino Nano, temporizador, relés e *driver*:

1. Alimentação 5V para o Arduino Nano;
2. Entrada dos sinais analógicos enviados pela DAQ;
3. Saída dos sinais PWM, convertidos do sinal analógico pelo Arduino para uma frequência de 4kHz, a fim de controlar a velocidade dos ventiladores utilizados no projeto;
4. Saída da contagem de pulsos para o *driver*, que controla os *dampers*;
5. Alimentação do motor de passo (12V) com capacitor eletrolítico (100μF) para redução de ruído e estabilidade na fonte | Alimentação do driver DRV8825 (5V) | Neutro compartilhado;
6. Cabo com os 4 fios das bobinas do motor de passo;
7. Sinal de ENABLE enviado pela DAQ;
8. *Jump* entre o RESET e SLEEP do *driver*;
9. Entrada da contagem de pulsos para o motor de passo, enviado pelo Arduino Nano;
10. Sinal de DIRECTION enviado pela DAQ;
11. Ventilador para dissipação de calor;
12. Relé temporizador: recebe um sinal periódico do sistema de aquisição para continuar ligado, servindo como uma medida de emergência caso o sistema desligue. Quando desligado, desativa o relé do quadro, desligando toda a bancada;
13. Relé responsável pelo quadro (ligar/desligar remotamente);
14. Relé responsável pelo Arduino Nano (ligar/desligar remotamente);
15. Relé responsável pelo inversor;
16. Relé responsável por abrir e fechar a válvula borboleta 1;
17. Relé responsável por abrir e fechar a válvula borboleta 2;
18. Alimentação (5V) e sinais da placa de relés;
19. Alimentação (5V) do relé temporizador;



Controle e aquisição do túnel, parte inferior da bancada

Legenda controle e aquisição do túnel, parte inferior da bancada:

1. Sistema de aquisição National Instruments CompactDAQ com 8 entradas para módulos;
2. Módulo de leitura de tensão/corrente NI-9207 (DSUB);
3. Módulo de envio de tensão NI-9264 (DSUB);
4. Módulo de envio de corrente NI-9265;
5. Módulo de leitura de termopar NI-9214;
6. Módulo de leitura de termopar NI-9214;
7. Fios dos termopares que levam para as tomadas;
8. Bornes com os fios do módulo NI-9207 (DSUB) - lista dos componentes relacionados:
 - Bornes 1-4, 5-8, 9-12: leitura dos 3 transdutores de pressão (Testo - 6681);
 - Bornes 13 e 14, 15 e 16: leitura dos 2 transmissores de pressão diferencial (Dwyer MSX-W11-IN-LCD);
9. Bornes com os fios do módulo NI-9264 (DSUB) - lista dos componentes acionados por fio:
 - Contador de tempo do Relé Temporizador;
 - Relé de estado sólido no quadro elétrico para a potência geral;
 - Ventilador do túnel - EBM G1G126-AC13-50;
 - Ventilador da sílica - EBM G1G144-AE13-30;
 - Ativação (ENABLE) dos motores de passo;
 - Direção (DIRECTION) dos motores de passo;
 - Abrir válvula borboleta;
 - Fechar válvula borboleta;
 - Liga/desliga inversor do motor da bomba;
 - Posição do *damper*;
 - Relé para ativação do Arduino Nano;
 - Ventilador do umidificador - EBM G1G126-AC13-50;

- Relé de estado sólido no quadro elétrico, referente à resistência do evaporador 1;
 - Relé de estado sólido no quadro elétrico, referente à válvula do evaporador 1 no túnel;
 - Relé de estado sólido no quadro elétrico, referente à resistência do evaporador 2;
 - Relé de estado sólido no quadro elétrico, referente à válvula do evaporador 2 no túnel;
10. Bornes com os fios do módulo NI-9265 - lista dos componentes acionados:
- Bornes 1 e 2: controle do umidificador;
 - Bornes 3 e 4: relé de ângulo de fase no quadro elétrico, referente à resistência do banho;
 - Bornes 5 e 6: relé de ângulo de fase no quadro elétrico, referente à resistência do túnel.

APÊNDICE II – ANÁLISE DE INCERTEZAS

CONCEITOS

Nenhuma medição de grandeza física é exata, há sempre um erro atribuído ao valor encontrado. Este erro é a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro da grandeza, o qual raramente é conhecido (ISOGUM, 2008). Portanto é necessária a determinação de uma incerteza experimental, um valor possível para o erro de medição, que define uma faixa para o valor verdadeiro.

Através da incerteza de medição é possível avaliar a confiabilidade dos dados obtidos, validando qualitativamente o resultado e verificando se o objeto das medições está dentro das especificações e requisitos de qualidade. Há vários fatores que influenciam no resultado de uma incerteza de medição, a qual é composta por componentes agrupados em duas categorias principais (ISOGUM, 2008):

Incerteza do Tipo A: proveniente da repetibilidade dos experimentos, baseada em métodos estatísticos, com um desvio padrão dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (\text{II.1})$$

onde σ é o desvio padrão das amostras, n é a quantidade de medições realizadas, x_i é o valor medido e $\bar{x}$ é a média das medições.

Incerteza do Tipo B: baseada em métodos não estatísticos, como a especificação do aparelho utilizado.

METODOLOGIA

Medições diretas

Medições diretas são feitas comparando a grandeza a ser medida com uma unidade. No presente trabalho, as variáveis de medição direta incluem: diferença de pressão do ar, espessura de geada, temperatura e umidade relativa do ar. Os valores das incertezas são mencionados no corpo do texto do capítulo 2 e estão sumarizados na tabela abaixo.

Incertezas expandida dos instrumentos utilizados

Grandeza	Instrumento	Incerteza
Temperatura	Termopar tipo T + CompactDAQ	0,2 °C
Diferença de pressão	Dwyer MSX-W11-IN-LCD	12 Pa
Umidade relativa	Testo 6681	1,7%
Espessura de geada	Canon EOS 250D + <i>Software</i> próprio	0,02 mm

Medições indiretas

Medições indiretas são aquelas obtidas por derivação matemática de grandezas medidas diretamente. De forma geral, a incerteza de medição de uma variável indireta pode ser expressa por:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2} \quad (\text{II.2})$$

Forma utilizada para derivar as incertezas de medições indiretas neste trabalho. Particularmente a incerteza na medição de vazão de ar (realizada pelo Δp do bocal) foi calculada utilizando a norma ASHRAE 41.2.

Repetibilidade

Usualmente, a incerteza aleatória (tipo A) é determinada pela distribuição estatística das medições de uma variável ao longo de um único ensaio (Gonçalves, 2004). Contudo, devido ao elevado número de aquisições⁵, a incerteza obtida por este método tende a ser significativamente baixa. Além disso, essa abordagem não captura as diversas fontes de incerteza inerentes à preparação do teste, que podem variar em função das condições iniciais, do operador e do dia de realização do ensaio.

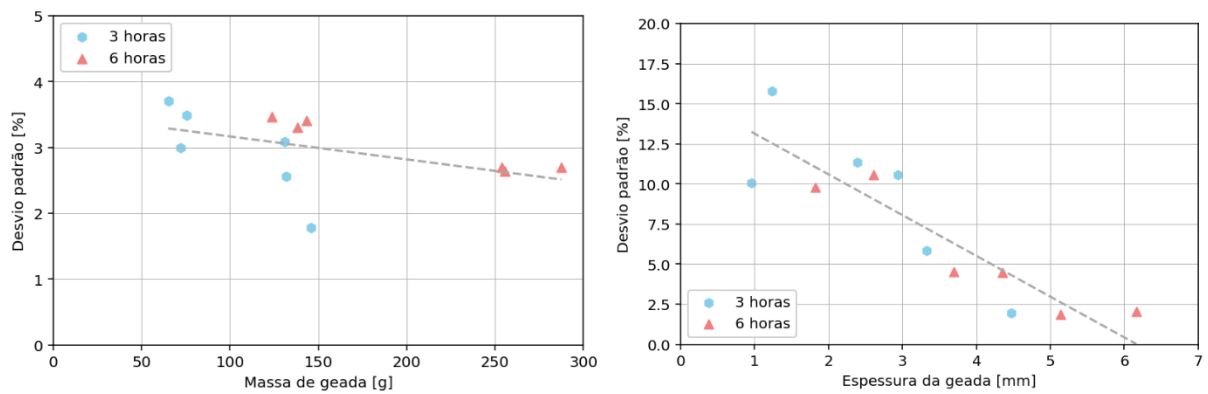
Para garantir que a incerteza final reflita de maneira mais realista o intervalo esperado para o valor final medido (M_f, δ_f), dada as condições de teste ($F_p, u, OT, T_w, \Delta\omega$), propõe-se uma análise baseada na replicação de experimentos.

Neste método, a incerteza é avaliada a partir do desvio padrão de grupos de ensaios realizados sob as mesmas condições-alvo, mas em dias distintos. Ao repetir integralmente o preparo do teste em cada réplica, a incerteza resultante passa a refletir a variabilidade

⁵ Para os experimentos realizados nesse trabalho, ocorre 1 aquisição a cada 5 segundos. Em um teste de 6 horas, isso resulta em um total de 4320 medidas.

esperada na reprodução do experimento, sendo, portanto, mais representativa.

Para calcular o desvio padrão de uma amostra é necessário ao menos 3 testes em cada grupo, em uma matriz de 46 testes isso iria resultar em um total de 138 testes. Como cada teste demora ao menos 1 dia, além do tempo para possíveis manutenções, essa quantidade de experimentos seria inviável. Dessa forma, a replicação foi executada para 6 condições específicas, conforme detalhado no capítulo 3.2.2. Cada uma dessas condições foi repetida três vezes, e a análise subsequente revelou que os erros relativos para massa e espessura apresentam uma dependência com os próprios valores medidos, conforme ilustrado nos gráficos a seguir:



Com a análise dos gráficos é possível obter curvas de incerteza aleatórias esperadas dados os valores de massa e espessura. Através dessas curvas estima-se o erro do tipo A para todos os experimentos realizados. Essa incerteza é então combinada, com a incerteza do tipo B, já propagada para as medições indiretas de interesse (M_f, δ_f). Para tanto, é adotado o método de (Gonçalves, 2004):

$$u = \sqrt{u_b^2 + \sigma^2} \quad (\text{II.3})$$

onde u_b é a incerteza padrão do tipo B advinda dos aparelhos de medição utilizados (já propagada), e σ é a incerteza do tipo A, obtida pelas curvas.

Incerteza expandida

Ainda de acordo com o ISOGUM (2008), incerteza expandida é a medida adicional de incerteza que permite fornecer um intervalo de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, podendo ser obtida através de:

$$U = ku(y) \quad (\text{II.4})$$

em que U é a incerteza expandida para determinada variável, $u(y)$ é a incerteza-padrão combinada, e k o coeficiente de *t-student*, sendo igual a 2, para um nível de confiança de 95,5%. Os resultados dos mensurados são então expressos por:

$$Y = y \pm U \quad (\text{II.5})$$

em que Y é o mensurando (expresso na Tabela 2), e y é o valor medido.