

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

VALTER SALLES DO NASCIMENTO JUNIOR

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE
CONTATO SOBRE A FORMAÇÃO DE GEADA EM PLACA PLANA SOB
CONVECÇÃO FORÇADA**

CURITIBA

2017

VALTER SALLES DO NASCIMENTO JUNIOR

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE
CONTATO SOBRE A FORMAÇÃO DE GEADA EM PLACA PLANA SOB
CONVECÇÃO FORÇADA**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade
Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do
grau de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais

Orientador: Professor Christian Johann Losso Hermes, Dr.Eng.
Co-orientador: Professor Rodrigo Perito Cardoso, Dr.Eng

CURITIBA

2017

N244a

Nascimento Junior, Valter Salles do

Análise teórica-experimental da influência do ângulo de contato sobre a formação de geada em placa plana sob convecção forçada / Valter Salles do Nascimento Junior. – Curitiba, 2017.
117 f. : il. color. ; 30 cm.

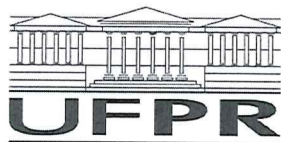
Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2017.

Orientador: Christian Johann Losso Hermes.

Coorientador: Rodrigo Perito Cardoso.

1. Formação de geada. 2. Placa plana horizontal. 3. Molhabilidade superficial. I. Universidade Federal do Paraná. II. Hermes, Christian Johann Losso. III. Cardoso, Rodrigo Perito. IV. Título.

CDD: 620.11



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR CIÊNCIAS EXATAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
CIÊNCIA DOS MATERIAIS

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **VALTER SALLES DO NASCIMENTO JUNIOR** intitulada: **ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE CONTATO SOBRE A FORMAÇÃO DE GEADA EM PLACA PLANA SOB CONVECÇÃO FORÇADA**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 17 de Novembro de 2017.

CHRISTIAN JOHANN LOSSO HERMES
Presidente da Banca Examinadora

CLAUDIO MELO
Avaliador Externo

CYRO KETZER SAUL
Avaliador Interno

SILVIO LUIZ DE MELLO JUNQUEIRA
Avaliador Externo

JOSE VIRIATO COELHO VARGAS
Avaliador Interno

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Christian J. L. Hermes e ao coorientador Prof. Dr. Rodrigo P. Cardoso por fornecer estrutura e ambiente propício à realização do presente trabalho, pela dedicação e empenho dispensados à minha formação profissional e desenvolvimento pessoal.

A minha família, especialmente meu irmão Vagner pela companhia e incentivo.

A meus colegas do Laboratório de Termodinâmica e Termofísica, em especial ao Dr. Felipe Loyola pelo apoio e amizade, aos alunos de iniciação científica e mestrado que contribuíram de alguma forma na realização desse trabalho,

A todos os professores de pós graduação do PIPE, pelo inestimável conhecimento transmitido.

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

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo investigar, por meio de uma abordagem teórico-experimental, o efeito da molhabilidade superficial na formação de geada sobre superfícies planas horizontais sob condições de convecção forçada laminar. Um túnel de vento fechado foi especialmente projetado e construído para fornecer um controle rigoroso das condições psicrométricas do ar na entrada da seção de testes e também das temperaturas da superfície da placa. Um sistema de aquisição de imagem foi usado para medir a espessura da camada de geada ao longo do tempo. Um conjunto de dados composto por 828 pontos de dados experimentais que abrangem diferentes temperaturas da superfície (de -20 a -10 ° C) e temperaturas do ar (de 5 a 16 ° C), com o número Jakob modificado variando de $1,05$ a $2,10$ e ângulos de contato variando de 60 ° (hidrofílico) a 123 ° (hidrofóbico) foi coletado para investigar os efeitos individuais e simultâneos dos principais parâmetros de transferência de calor e massa na taxa de crescimento de geada. Uma abordagem de modelagem de primeiros princípios foi usada em conjunto com os dados experimentais obtidos no trabalho para obter uma expressão semi-empírica totalmente algébrica para a espessura da geada como função do tempo, do número Jakob modificado, do gradiente de umidade e o ângulo de contato da superfície. Verificou-se que a correlação proposta foi capaz de prever a maioria dos pontos de dados experimentais ($> 90\%$) para a espessura de geada dentro de limites de erro de $\pm 15\%$.

Palavras-chave: formação de geada. placa plana horizontal. molhabilidade superficial. análise Experimental. correlação semi-empírica

ABSTRACT

The present study is aimed at investigating, by means of a theoretical-experimental approach, the effect of surface wettability on the frost accretion over horizontal flat surfaces under laminar forced convection conditions. A purpose-built closed-loop wind-tunnel facility was especially designed and constructed to provide a strict control of the psychrometric conditions at the entrance of the test section, and also of the plate surface temperatures. An image acquisition system was used to measure the thickness of the frost layer over time. A dataset comprised of 828 experimental data points spanning different surface temperatures (from -20 to -10°C) and air temperatures (from 5 to 16°C), with the modified Jakob number ranging from 1.05 to 2.10, and contact angles ranging from 60° (hydrophilic) to 123° (hydrophobic) was gathered to investigate both the individual and the simultaneous effects of key heat and mass transfer parameters on the frost growth rate. A first-principles modeling approach was used together with the experimental data obtained in-house to come out with a semi-empirical fully-algebraic expression for the frost thickness as a function of the time, the modified Jakob number, the humidity gradient, and the surface contact angle. It was found that the proposed correlation was able to predict most of the experimental data points (>90%) for the frost thickness within $\pm 15\%$ error bounds.

Keywords: frost accretion. horizontal flat plate. surface wettability. experimental analysis.
semi-empirical correlation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do consumo e produção de energia elétrica no Brasil.....	15
Figura 2 – Formação de geada no evaporador de um refrigerador.....	16
Figura 3 – Diagrama de fase da água.	17
Figura 4 – Representação de (a) gelo e (b) geada.....	17
Figura 5 – Número de publicações sobre geada no <i>IIR - International Congress of Refrigeration</i>	18
Figura 6 –Número de publicações sobre geada na <i>Internatinal. Refrigeration and Air-Conditioning Conference at Purdue</i>	18
Figura 7 – Representação esquemática do modelo (balanço de massa em uma camada de geada).....	24
Figura 8 – Morfologia característica dos cristais de gelo em função da temperatura do substrato e grau de supersaturação do ar para 1 atm.	27
Figura 9 – Ilustrações das diferentes formas de cristal de geada.....	27
Figura 10 – Grau de super-resfriamento para nucleação em função do ângulo de contato.....	29
Figura 11 – Número de publicações sobre a aplicação de superfícies estruturadas em baixas temperaturas.....	29
Figura 12 – Representação da formação de geada em uma carta psicrométrica	37
Figura 13 – Esquema de nucleação (a) homogênea e (b) heterogênea.....	38
Figura 14 – Variação de $(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta)$ com θ	40
Figura 15 – Balanço de massa e energia na camada de geada	42
Figura 16 – Ilustração esquemática das assíntotas da equação (2.32).....	46
Figura 17 – Aparato experimental montado no Laboratório de Termodinâmica e Termofísica da UFPR.	47
Figura 18 – Representação esquemática do sistema de instrumentação e controle.....	48
Figura 19 – Interface de controle e aquisição no software Labview.	50
Figura 20 – Instrumentação da seção de Testes.	51
Figura 21 – Fotos da seção de testes (Teste #60; $T_w = -15,4\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{ar} = 5^\circ\text{C}$; $\phi = 80\%$) ..	52
Figura 22 – Variação temporal da temperatura da superfície de teste ao longo de um ensaio de 120 minutos (7200 segundos).	53
Figura 23 – Variação temporal da temperatura do ar na entrada da seção de teste ao longo de um ensaio de 120 minutos (7200 segundos).	53
Figura 24 – Variação temporal da umidade do ar na entrada da seção de teste longo de um ensaio de 120 minutos (7200 segundos).	54
Figura 25 – Dimensões das amostras.	54
Figura 26 –superfícies de teste	55
Figura 27 – Equipamento utilizado para medida do ângulo de contato.	56
Figura 28 – Imagem de medida de ângulo de contato.....	56
Figura 29 – Imagem de medida de ângulo de contato.....	57
Figura 30 – Vista lateral da seção de testes, antes de iniciar o teste.	58
Figura 31 – Imagem da régua de calibração.....	59
Figura 32 – Imagem da superfície no início do teste.....	59
Figura 33 – Imagem da geada formada.	60
Figura 34 – Análise de variabilidade do coeficiente a em função das condições de operação	66

Figura 35 – Análise de sensibilidade do coeficiente a em função das condições de operação	67
Figura 36 – Variação de a com o grau de super-resfriamento ΔT	68
Figura 37 – Análise de variabilidade do coeficiente b em função das condições de operação	69
Figura 38 – Análise de sensibilidade do coeficiente b em função das condições de operação	70
Figura 39 – Variação de b com o grau de super-resfriamento	71
Figura 40 – Interpretação física do sinal do coeficiente b	71
Figura 41 – Comparação entre resultados experimentais e calculados através da eq. (4.5) – modelo com 5 coeficientes	73
Figura 42 – Comparação entre resultados experimentais e calculados através da eq. (4.6) – modelo com 3 coeficientes	74
Figura 43 – Variação de $b\theta$ com o grau de super-aquecimento	75
Figura 44 – Comparação entre resultados experimentais e calculados através da eq. (4.9) – modelo com 4 coeficientes	76
Figura 45 – Comparação entre resultados experimentais e calculados através da eq. (4.10) – modelo de convecção natural	77
Figura 46 – Sensibilidade do tempo inicial em relação ao ângulo de contato e ao grau de super-resfriamento	79
Figura 47 – Esquema de medição da vazão de ar em túnel de vento,	114
Figura 48 – Ilustração de incerteza de medição de espessura,	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos principais trabalhos numérico-computacionais sobre formação de geada.....	19
Tabela 2 – Principais trabalhos de natureza experimental voltados para análise da nucleação e do crescimento de geada.....	20
Tabela 3 – Correlações para densidade da geada baseadas na equação (1.5)	25
Tabela 4 – Principais trabalhos realizados sobre a formação de geada em superfícies estruturadas em condições de baixas temperaturas.	30
Tabela 5 – Valores de constante cinética de mudança de fase e energia livre de superfície....	40
Tabela 6 – ângulo de contato das amostras (superfícies testadas).....	57
Tabela 7 – Rugosidade das amostras (superfícies testadas).	57
Tabela 8 – Fatores e níveis testados experimentalmente.....	60
Tabela 9 – Condições de teste.	61
Tabela 10 – Sumário dos resultados experimentais,.....	64
Tabela 11 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada.....	64
Tabela 12 – Modelos e coeficiente ajustados,	82
Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada.....	90
Tabela 14 – Parâmetros regredidos para cada superfície Comparativo de incerteza de medição para dois transdutores de pressão	115

LISTA DE ABREVIACÕES

Abreviação	Descrição
EPS	Poliestireno expandido (<i>Expanded polystyrene</i>)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PID	<i>Proportional–integral–derivative controller</i>
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos

Símbolo	Descrição	Unidade
c_p	Calor específico a pressão constante	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
D_f	Difusividade do vapor d'água no ar	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
G	Energia livre de Gibbs	$[J]$
Fo	Número de Reynolds	$[-]$
h	Coeficiente convectivo de transferência de calor	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
h_m	Coeficiente convectivo de transferência de massa	$[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
I	Taxa de formação de embriões	$[m^{-2} \cdot s^{-1}]$
I_0	Constante cinética de formação de embriões	$[m^{-2} \cdot s^{-1}]$
i_{sv}	Calor latente de dessublimação	$[J \cdot kg^{-1}]$
K	Constante de Boltzmann	$[J \cdot K^{-1}]$
k	Condutividade térmica	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
L	Comprimento de placa	$[m]$
Le	Número de Lewis	$[-]$
M	Massa de geada	$[g]$
m	Massa molar da água	$[kg \cdot mol^{-1}]$
m''	Fluxo de massa	$[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
P	Pressão	$[Pa]$
Pr	Número de Prandtl	$[-]$
q''	Fluxo de calor	$[W \cdot m^{-2}]$
R	Constante dos gases ideais	$[J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$

r	Raio do embrião	[m]
Re	Número de Reynolds	[-]
S	Entropia	[J·K ⁻¹]
Sh	Número de Sherwood	[-]
T	Temperatura	[°C]
t	Tempo	[s]
U	Energia interna	[J]
V	Volume	[m ³]
v	Velocidade	[m·s ⁻¹]
y	Direção perpendicular ao substrato	[m]

Símbolos Gregos

Símbolo	Descrição	Unidade
δ	Espessura da camada de geada	[m]
ε	Porosidade	[-]
θ	Ângulo de contato da superfície	[-]
λ	Número de Jakob modificado	[-]
ρ	Massa específica (densidade)	[kg·m ⁻³]
φ	Umidade relativa do ar	[%]
σ	Tensão superficial na interface	[J·m ⁻²]
Ψ	Rugosidade da superfície	[μm]
ω	Umidade absoluta do ar	[kg _{água} /kg _{ar}]

Subscritos

Símbolo	Descrição
a	Ar
ad	Adensamento
ae	Interação ar-embrião
as	Interação ar-substrato
c	Crescimento
cr	Crítico
dp	Ponto de orvalho
e	Embrião
es	Interação embrião-substrato
f	Camada de geada
i	Gelo
lat	Latente
m	Congelamento (<i>melting</i>)
s	Superfície da camada de geada
sat	Saturação
sup	Super-resfriamento
supf	Superficial
tot	Total
w	Superfície da placa
P	Associado a coeficientes de correlações de densidade

Índices

Símbolo	Descrição
*	Crítico
+	Crescimento positivo da camada de geada

SUMÁRIO

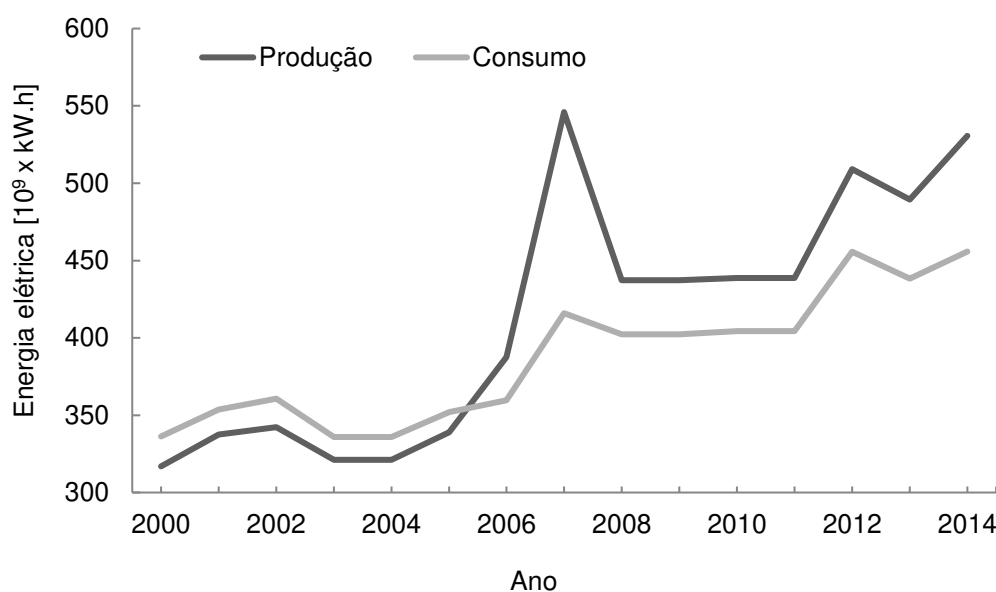
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTO	15
1.2	FORMAÇÃO DE GELO E GEADA.....	16
1.3	LITERATURA.....	18
1.3.1	Densidade da camada de geada	23
1.3.2	Estudos sobre superfícies	28
1.4	OBJETIVOS	34
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
2.1	TEORIA DA NUCLEAÇÃO.....	35
2.1.1	Nucleação Homogênea.....	38
2.1.2	Nucleação Heterogênea.....	39
2.1.3	Morfologia.....	42
2.2	MODELO SEMI-EMPÍRICO DE CRESCIMENTO DA GEADA	42
3	TRABALHO EXPERIMENTAL	47
3.1	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES.....	47
3.1.1	Estrutura	48
3.1.2	Instrumentação e controle das condições psicrométricas	49
3.1.3	Instrumentação e controle das superfícies de testes	51
3.2	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES.....	54
3.3	PROCEDIMENTO DE ENSAIO	58
3.4	PLANO DE TESTES.....	60
4	RESULTADOS.....	63
4.1	Resultados Experimentais	63
4.2	Ajuste do Modelo.....	72
4.3	Análise de Sensibilidade	77
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	80
5.1	CONCLUSÕES	80
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
	Referências Bibliográficas	83
	Apêndice A – Condições de teste e medidas de crescimento.....	90
	Apêndice B – Sistema de medição de ar	114
	Apêndice C – Cálculo de Incertezas.....	116

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O consumo de energia elétrica tem crescido substancialmente nos últimos 15 anos (Figura 1). A fim de evitar a sobrecarga do sistema, e fomentar o crescimento econômico dos próximos anos, é necessário aumentar a oferta ou reduzir o consumo de energia elétrica.

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DO CONSUMO E PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.



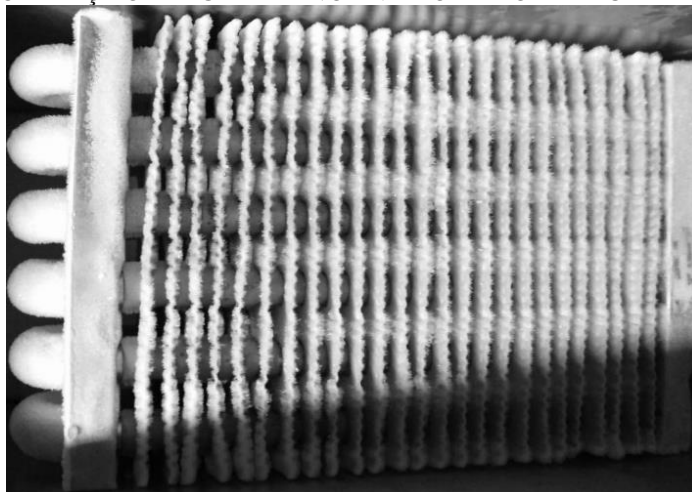
FONTE: INDEXMUNDI (2017).

O aumento da produção de energia elétrica é bastante dependente de fatores econômicos e ambientais. A viabilidade dos investimentos depende do tempo de retorno da construção de usinas, enquanto os impactos ambientais devem também ser observados. A disponibilidade da fonte geradora também é um fator limitante na produção de energia elétrica. Por esse motivo, muitos esforços têm sido concentrados na redução do consumo de energia em diversos setores chave, incluindo a refrigeração doméstica e comercial.

A fim de reduzir o consumo de energia em sistemas de refrigeração, as seguintes linhas de trabalho têm sido adotadas (RADERMACHER e KIM, 1996) (MELO e SILVA, 2010): (i) desenvolvimento de componentes mais eficientes; (ii) desenvolvimento de tecnologias alternativas de refrigeração; (iii) desenvolvimento de novas tecnologias para o isolamento térmico de gabinetes, e (iv) desenvolvimento de novas estratégias para o controle de sistemas de refrigeração.

Nesta última, uma linha de trabalho que tem se destacado consiste em desenvolver estratégias para a remoção da geada que se forma no evaporador do sistema de refrigeração. Devido às baixas temperaturas de evaporação empregadas na maioria dos refrigeradores domésticos ($\sim -25^{\circ}\text{C}$) e comerciais ($\sim -10^{\circ}\text{C}$), as condições de operação favorecem a formação de geada sobre a superfície do evaporador (Figura 2), o que interfere diretamente na eficiência de todo o sistema.

FIGURA 2 – FORMAÇÃO DE GEADA NO EVAPORADOR DE UM REFRIGERADOR.



FONTE: NASCIMENTO (2013).

A geada não só diminui a taxa de transferência de calor no evaporador, devido à sua baixa condutividade térmica, como também restringe a área de passagem de ar, causando uma perda de carga significativa, que implica no aumento da potência de bombeamento ou na redução da vazão de operação (RIBEIRO e HERMES, 2014). Em todos os casos, tais efeitos diminuem a capacidade de refrigeração do evaporador e, conseqüentemente, fazem com que a energia gasta para garantir o mesmo de resfriamento, se comparado a um refrigerador sem formação de geada, seja maior, uma vez que o compressor precisa atuar por mais tempo (SILVA, HERMES e MELO, 2011a).

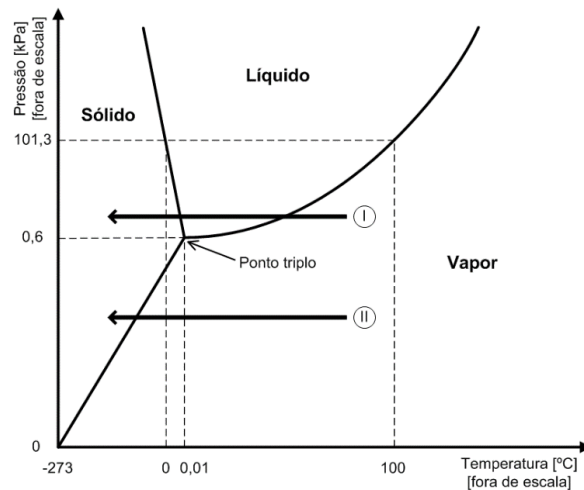
1.2 FORMAÇÃO DE GELO E GEADA

A geada é definida como um meio poroso, composto de cristais de gelo e ar úmido, formado através da transferência de vapor d'água contido no ar para uma superfície, como mostra a Fig. 3. Se a temperatura da superfície estiver abaixo do ponto de orvalho, e se este estiver acima de $0,01^{\circ}\text{C}$ (ponto triplo da água), pode haver a condensação do vapor. Ainda, se

a temperatura da superfície estiver abaixo de $0,01^{\circ}\text{C}$, o vapor condensado pode se solidificar, formando cristais de gelo.

Nos casos em que tanto a temperatura de orvalho quanto a temperatura superficial estiverem abaixo de $0,01^{\circ}\text{C}$, ocorre a dessublimação do vapor, ou seja, mudança do estado gasoso diretamente para o estado sólido.

FIGURA 3 – DIAGRAMA DE FASE DA ÁGUA.



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

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DE (A) GELO E (B) GEADA



(a)



(b)

1.3 LITERATURA

O estudo sobre a formação de geada em superfícies é relativamente recente, e os resultados obtidos têm sido amplamente discutidos (Silva, Hermes e Melo, 2011b). As Figuras 5 e Figura 6 resumizam o número de publicações sobre geada nas edições mais atuais dos principais congressos na área de refrigeração, o *IIR - International Congress of Refrigeration* e o *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. Em ambos os congressos, observa-se um número crescente de artigos publicados sobre formação de geada, principalmente em trocadores de calor, o que leva à conclusão de que a literatura de formação de geada está sendo formada e aprimorada.

FIGURA 5 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NO *IIR - INTERNATIONAL CONGRESS OF REFRIGERATION*

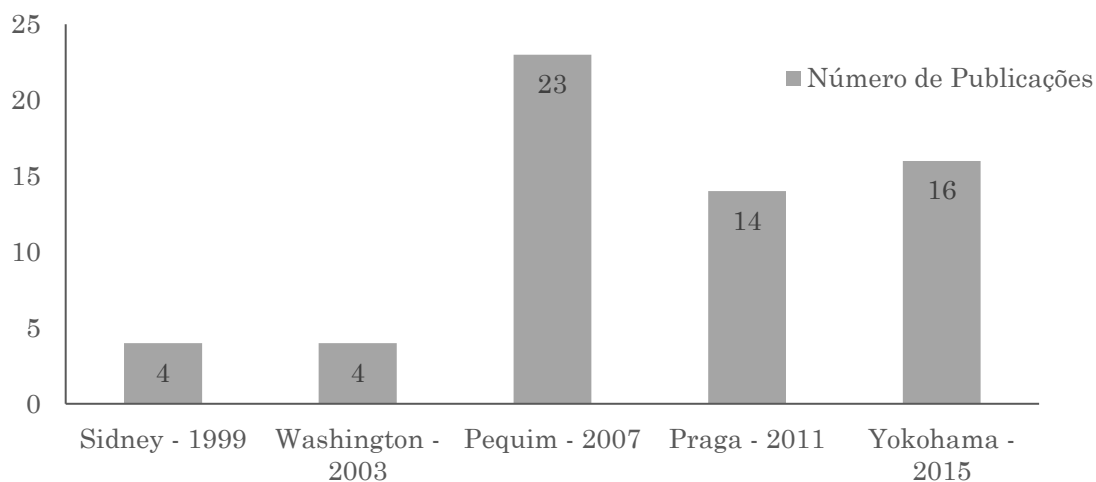
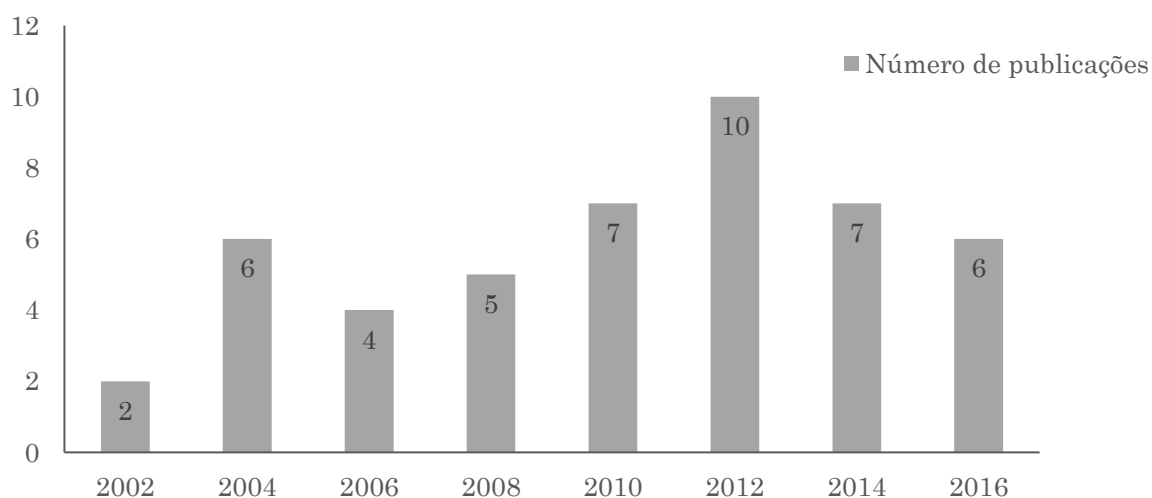


FIGURA 6 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE GEADA NA *INTERNATINAL. REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING CONFERENCE AT PURDUE*



Os trabalhos publicados sobre a formação de geada podem ser classificados entre os de natureza teórica-computacional, resumidos na Tabela 1, e os de natureza experimental, apresentados na Tabela 2.

TABELA 1 – RESUMO DOS PRINCIPAIS TRABALHOS NUMÉRICO-COMPUTACIONAIS SOBRE FORMAÇÃO DE GEADA

Autor	Origem	Meio Poroso	Geometria	Condição inicial		Interface ar-geada	Condutividade de térmica $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
				Espessura [mm]	Densidade $[kg \cdot m^{-3}]$		
O'Neal (1982)	EUA	Sim	Canal	0,05	40	Saturada	Sanders (1974)
Sami & Duong (1989)	Canadá	Sim	Placa plana	-	-	Saturada	Yonko e Sepsy (1967)
Tao et al. (1993)	Canadá	Não	Placa plana	0,1	92,84	Saturada	Correlação própria
Le Gall & Grillot (1997)	França	Sim	Placa plana	0,1	25	Saturada	Auracher (1986)
Lee et al. (1997)	Coréia do Sul	Não	Placa plana	-	-	Saturada	Lee et al. (1994)
Lüer & Beer (2000)	Alemanha	Sim	Canal	0	Várias	Saturada	Auracher (1986)
Cheng & Cheng (2001)	China	Não	Placa plana	-	Hayashi et al. (1977)	Saturada	Brian et al. (1969)
Na & Webb (2004)	EUA	Sim	Placa plana	0,02	30	Saturada	Baseado em Sanders (1974)
Hermes et al. (2009)	Brasil	Sim	Placa plana	0,001	Própria	Saturada	Lee et al. (1994)
Kandula (2011)	EUA	Sim	Placa plana	0	Própria	Saturada	Kandula (2010)
Cui et al. (2011)	China	Sim	Canal	0	Modelo de nucleação	Saturada	Modelo cúbico de Lattice
Hermes (2012)	Brasil	Sim	Placa plana	0,001	Própria	Saturada	Baseado em Lee et al. (1994)
Loyola et al. (2014)	Brasil	Sim	Canal	0,001	Nascimento (2013)	Super-saturada	Hermes (2012)
El Cheikh & Jacobi (2014)	EUA	Sim	Placa plana	0,0001	40	Super-saturada	O'Neal e Tree (1985)

TABELA 2 – PRINCIPAIS TRABALHOS DE NATUREZA EXPERIMENTAL VOLTADOS PARA ANÁLISE DA NUCLEAÇÃO E DO CRESCIMENTO DE GEADA.

Autor	Origem	Variáveis Medidas							
		δ	M	v	T_w	T_a	ω_a	θ	Ψ
Seki N. et al. (1985)	Japão	X		X	X	X	X	X	
Cheng e Shiu (2002)	Taiwan	X		X	X	X	X		
Na e Webb (2003)	EUA				X	X	X	X	
Lee et al. (2004)	Coréia do Sul	X	X	X	X	X	X	X	
Lee et al. (2005)	Coréia do Sul	X	X	X	X	X	X		
Liu et al. (2006a,b)	China	X			X	X	X		
Liu et al. (2007)	China	X			X	X	X	X	
Wu et al. (2007)	China	X			X	X	X	X	
Piucco et al. (2008)	Brasil	X	X	X	X	X	X	X	X
Zhang et al. (2010)	China				X	X	X	X	X
Rahimi et al. (2015)	Dinamarca	X	X	X	X	X	X	X	X

DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS ABORDADAS NOS TRABALHOS: δ = ESPESSURA DA CAMADA DE GEADA, m = MASSA DA GEADA, v = VELOCIDADE DA CORRENTE DE AR, T_w = TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE, T_a = TEMPERATURA DO AR, ω_a = UMIDADE ABSOLUTA DO AR, θ = ÂNGULO DE CONTATO, ψ = RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE.

Esses trabalhos visam avançar no entendimento dos fenômenos de nucleação, crescimento e adensamento da geada em superfícies simples (placas planas, cilindros e canais) e complexas (evaporadores aletados). Em geral, a formação de geada abordada pelos principais trabalhos está baseada nas seguintes hipóteses simplificativas (HERMES, PIUCCO, et al., 2009): (i) os processos de transferência de calor e massa são considerados quase-estáticos e unidimensionais; (ii) a espessura da camada de geada é uniformemente distribuída ao longo da placa; (iii) a pressão do ar é uniforme dentro e fora da camada de geada; e (iv) a analogia de Lewis é aplicada para a camada limite.

Dentro do escopo e objetivo desta tese, uma maior atenção será destinada aos trabalhos de natureza experimental.

Por exemplo, Seki et al. (1985) realizaram um estudo analítico e experimental a respeito do crescimento da geada em uma placa resfriada e exposta à convecção forçada. Os autores destinaram maior atenção à formação dos cristais de gelo a partir da condensação de

umidade do vapor d'água do ar. O estudo foi conduzido analisando dois tipos de placas com diferentes ângulos de contato entre a superfícies e a gota d'água (10° e 43°). Além disso, um modelo teórico, baseado nas observações experimentais, foi desenvolvido para prever as tendências gerais do crescimento dos embriões e da camada de geada propriamente dita.

Cheng e Shiu (2002) realizaram uma ampla revisão bibliográfica focada na formação de geada sobre superfícies planas, identificando os principais parâmetros que afetam o crescimento e o adensamento da camada de geada. Os autores se concentraram principalmente na morfologia e nos estágios de crescimento da geada, realizando experimentos variando a temperatura, a umidade relativa e a velocidade da corrente de ar, além da temperatura da superfície de placa. Um sistema para captar imagens do processo foi também desenvolvido, através do qual se verificou que a camada de geada apresenta uma espessura praticamente uniforme ao longo da superfície, exceto nas bordas da placa, onde se observou uma forma arredondada. Como esperado, camadas de geada mais espessas foram observadas em condições de maiores temperaturas e umidades relativas do ar, além de menores temperaturas de superfície da placa.

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

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

num estágio seguinte quando a resistência térmica é reduzida devido ao adensamento da camada de geada.

Lee et al. (2004) investigaram experimentalmente a formação de geada sobre duas superfícies com diferentes ângulos de contato (23° e 88°). As temperaturas de tais superfícies, assim como a temperatura, umidade e velocidade do ar foram variadas. Percebeu-se que a forma dos cristais de geada variava com as diferentes temperaturas e umidades do ar, bem como com a temperatura da superfície da placa. Verificou-se também que a velocidade do ar pouco afetou a taxa de crescimento da geada. A influência do ângulo de contato sobre a nucleação da geada não foi corretamente avaliada, pois as superfícies foram submetidas a graus de super-resfriamento que transcendiam o limite de nucleação, a partir do qual o ângulo de contato deixa de ter influência significativa no processo.

Lee et al. (2005) investigaram experimentalmente a formação de geada sobre um material polimérico, denominado PBT (*polybutylene terephthalate*), cuja condutividade térmica é de três a cinco vezes superior à de outros polímeros. Os autores compararam os resultados obtidos com amostras de alumínio com os obtidos com diversos tipos de polímeros, incluindo o PBT. O objetivo principal do trabalho foi o desenvolvimento de um novo material para revestimento de trocadores de calor. Verificou-se que o crescimento de geada sobre o PBT é equivalente ao observado no alumínio, mas diferente dos demais materiais poliméricos investigados.

Liu et al. (2006a,b) aplicaram um revestimento à base de verniz acrílico sobre uma superfície metálica e avaliaram a formação de geada ao longo do tempo sob diversas condições psicrométricas (temperatura e umidade do ar) e de temperatura superficial da placa. Os autores observaram que, sob certas condições, não havia formação de geada sobre a superfície. O efeito da velocidade do ar não foi investigado e a massa de geada formada ao longo do tempo não foi registrada.

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

Wu et al. (2007) apresentaram um trabalho teórico-experimental onde investigaram através de imagens o processo de formação de geada sobre superfícies com ângulos de contato de 56° e 110° . O aparato consistia essencialmente de uma seção de testes resfriada por um módulo termoeletrônico. Uma câmera de aquisição de imagens microscópicas foi utilizada para

acompanhar e registrar o processo. Os testes mostraram que, para as condições de temperatura de superfície e umidade aplicadas, a formação de geada ocorria em três fases: formação e congelamento de gotas de condensado, formação e crescimento de cristais de geada, e adensamento e crescimento da camada de geada. A condensação de vapor d'água antes da formação de geada foi explicada a partir dos conceitos de energia livre de Gibbs. A análise teórica também mostrou que a passagem direta de vapor d'água para geada poderia ser obtida mediante a elevação do grau de super-resfriamento, já que isso diminuiria tanto o raio crítico do embrião como a barreira de energia livre de Gibbs.

Piucco et al. (2008) investigou a nucleação de embriões de geada em superfícies planas. O estudo considerou as condições de ar (temperatura, umidade e velocidade) e da superfície fria (temperatura, rugosidade e ângulo de contato). O processo de nucleação foi analisado teórica e experimentalmente. Na análise teórica, assumiu-se um processo de nucleação heterogênea sobre uma superfície lisa. Observou-se que o aumento do ângulo de contato atua no sentido de aumentar o grau de super-resfriamento necessário para desencadear o processo de nucleação. Observou-se também que o limite de nucleação se torna praticamente independente do ângulo de contato quando este atinge valores superiores a 140° . Além disso, mostrou-se que a nucleação sempre ocorre quando o grau de super-resfriamento é superior a 5°C , o que sugere que tratamentos superficiais afetam apenas levemente o início da nucleação de embriões para a grande maioria das aplicações de refrigeração e condicionamento de ar.

Rahimi et al. (2015) apresentaram um estudo sobre os estágios iniciais (5 a 10 min) do crescimento e adensamento da geada, sobre superfícies de alumínio com diferentes rugosidades e diferentes ângulos de contato ($80\text{-}120^\circ$), o estudo mostrou que nos estágios iniciais a geada cresce e se adensa lentamente em superfícies hidrofóbicas, e que o efeito contrário é observado em superfícies hidrofílicas. O estudo foi essencialmente experimental e não explorou teoricamente esse comportamento.

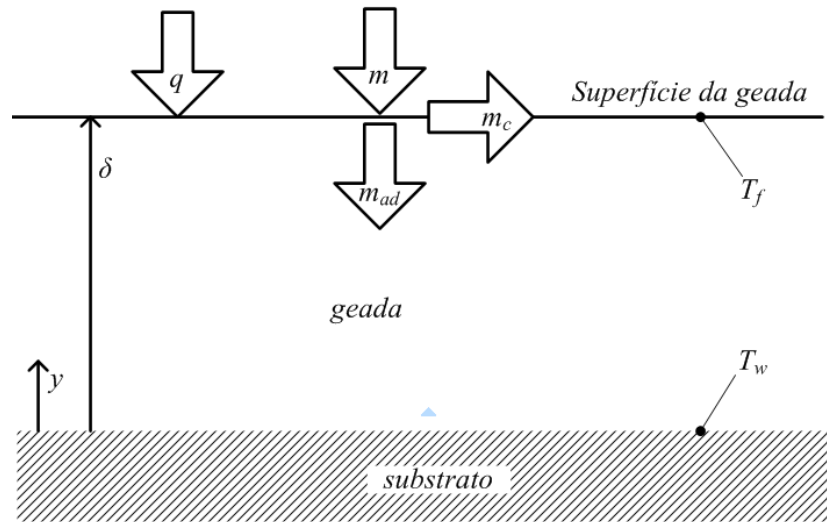
1.3.1 Densidade da camada de geada

A ampla maioria dos modelos para o crescimento e o adensamento de uma camada de geada existentes na literatura tem sido formulada com base no balanço de massa em uma camada de geada representado na equação (1.1) e apresentado esquematicamente na Figura 7 (HERMES, 2012).

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

onde $m'' = h_m(\omega_a - \omega_f)$ é o fluxo de massa de vapor do ar úmido para o meio poroso, ρ_f é a densidade média da camada de geada de espessura δ , e h_m é o coeficiente convectivo de transferência de massa, que está relacionado ao coeficiente convectivo de transferência de calor, h , através da analogia de Lewis, $h_m = h/c_p Le^{2/3}$ (INCROPERA e DEWITT, 2014). Onde Le refere-se número de Lewis (≈ 1).

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MODELO (BALANÇO DE MASSA EM UMA CAMADA DE GEADA)



FONTE: HERMES (2012)

Adicionalmente ao balanço global de massa, representado pela equação (1.1), os seguintes balanços locais de massa e energia são respectivamente empregados para determinar a concentração de vapor d'água e também a distribuição de temperatura ao longo da camada de geada (LOYOLA, NASCIMENTO JR e HERMES, 2014):

$$D_f \frac{d^2 \omega}{dy^2} = \frac{d\rho_f}{dt} \quad (1.2)$$

$$k_f \frac{d^2 T}{dy^2} = - \frac{d\rho_f}{dt} i_{sv} \quad (1.3)$$

onde D_f é a difusividade efetiva de vapor d'água no ar dentro da geada, enquanto k_f é a condutividade térmica efetiva da camada, sendo ambos dependentes da porosidade do meio

poroso (geada), ε , e i_{sv} é o calor latente de sublimação. As condições de contorno necessárias à solução da equação (1.2) são $d\omega/dy = 0$ em $y = 0$ (superfície impermeável) e $\omega = \omega_{sat}(T_f)$ em $y = \delta$. A equação (1.3), por sua vez, pode ser resolvida considerando-se uma condição de temperatura prescrita na superfície da placa, $T = T_w$, e a continuidade do fluxo de calor em $y = \delta$ (HERMES, PIUCCO, et al., 2009):

$$k_f \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=\delta} = q + \rho_f \frac{d\delta}{dt} i_{sv} \quad (1.4)$$

onde $q = h(T_a - T_s)$ é o fluxo de calor da corrente de ar para a camada de geada. A formulação apresentada, a qual permite o cômputo da espessura da camada de geada ao longo do tempo, $\delta(t)$, a partir da solução da equação (1.1), requer que se conheça, de antemão, as propriedades termofísicas do meio poroso, particularmente a densidade e a condutividade térmica da geada, que dependem fortemente da morfologia dos cristais, que por sua vez está relacionada com as condições de operação (HERMES, LOYOLA e NASCIMENTO JR, 2014) que variam de acordo com a aplicação. Assim, para o fechamento do sistema de equações, são necessárias informações adicionais para a densidade e a condutividade térmica da geada, as quais são geralmente obtidas de correlações empíricas com a seguinte forma (HERMES, 2012):

$$\rho_f = a_\rho \cdot \exp(b_\rho T' + c_\rho T'') \quad (1.5)$$

em que os coeficientes a_ρ , b_ρ e c_ρ da equação (1.5) têm sido obtidos experimentalmente por diferentes autores para diferentes condições morfológicas, como mostra a Tabela 3.

TABELA 3 – CORRELAÇÕES PARA DENSIDADE DA GEADA BASEADAS NA EQUAÇÃO (1.5)

Autor	a_ρ	b_ρ	c_ρ	T'	T''	Aplicação
Hayashi et al. (1977)	480	0,277	0	T_s	0	$-18,6^\circ\text{C} < T_f < -5^\circ\text{C}$
Hermes et al. (2009)	207,3	0,2664	-0,06148	T_s	T_w	$-15^\circ\text{C} < T_w < -5^\circ\text{C}$
Knabben, Hermes e Melo (2011)	492,9	0,053	-0,0530	T_w	T_w	$T_w \sim -25^\circ\text{C}$
Silva, Hermes e Melo (2011a)	480	0,110	-0,0610	T_f	T_w	$T_w \sim -10^\circ\text{C}$

Em adição às correlações na forma da equação (1.5), ilustradas na Tabela 3, Mao et al. (1999) propuseram uma abordagem adimensional para representar a densidade da geada como função dos números de Reynolds Re e de Fourier Fo (INCROPERA e DEWITT, 2014), da diferença de temperatura adimensional baseada nas temperaturas da superfície da geada, da superfície da placa e do ponto triplo da água, bem como da umidade absoluta da corrente de ar. Tal correlação foi posteriormente revisitada por Yang e Lee (2004), que propuseram:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 1,54 \cdot 10^{-4} Re^{0,351} Fo^{0,311} \omega_a^{-0,368} \left(\exp \left(\frac{T_a - T_f}{T_a - T_w} \right) \right)^{2,4} \quad (1.6)$$

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

A correlação de Hayashi et al. (1977) apresentada na Tabela 3, foi recentemente revisitada por Wang et al. (2012) que propuseram dois fatores multiplicativos para levar em conta as temperaturas do ar e da superfície da geada:

$$\rho_f = 650 \exp(T_f) c_{\rho,1} c_{\rho,2} \quad (1.7)$$

onde,

$$c_{\rho,1} = 0,70132 - 0,11346 T_w - 0,00203 T_w^2 \quad (1.8)$$

$$c_{\rho,2} = 1,4333 - 0,17389 T_a + 0,00722 T_a^2 \quad (1.9)$$

sendo válida para $-1,6 < T_w < -8^\circ C$, $11 < T_a < 19^\circ C$, $42 < \phi_a < 80\%$ e $v_a = 5$ m/s.

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

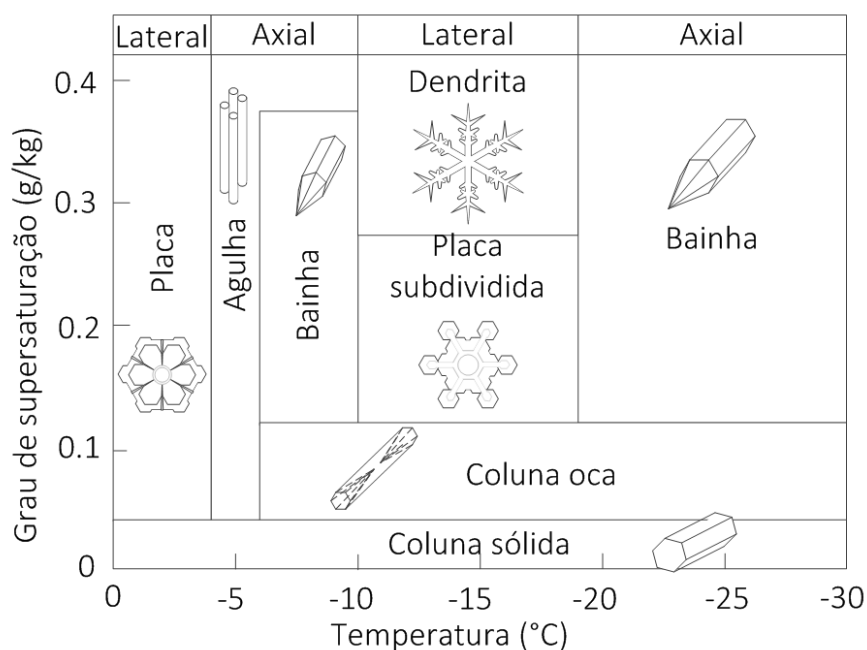
$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 0,5 \left(\frac{T_f - T_w}{T_m - T_w} \right) \exp \left\{ - \left[0,376 + 1,5 \left(1 - \left(\frac{T_f - T_w}{T_m - T_w} \right) \right) \right] \right\} \left(1 - \sqrt{\frac{Re}{Re_c}} \right) \quad (1.10)$$

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

Um estudo rigoroso dos trabalhos que envolvem o estudo da densidade de uma camada de geada mostra que as correlações empíricas disponíveis para a densidade da geada se

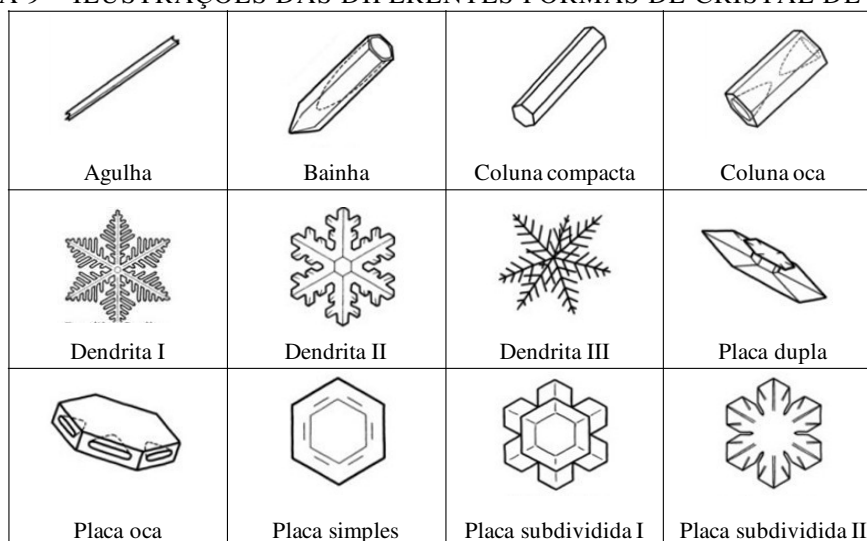
restringem a condições específicas de operação (i.e., temperatura da superfície e grau de supersaturação) que, por sua vez, afetam as características morfológicas da geada (i.e., crescimento e adensamento). Por exemplo, a correlação proposta por Knabben, Hermes e Melo (2011) para condições de operação de refrigeração doméstica (i.e., cristais de gelo na forma de colunas) prevê uma densidade significativamente menor que a obtida através da correlação proposta por Silva, Hermes e Melo (2011a) para condições de refrigeração comercial, resultando na formação de dendritas, como se observa nas Figura 8 e Figura 9.

FIGURA 8 – MORFOLOGIA CARACTERÍSTICA DOS CRISTAIS DE GELO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO SUBSTRATO E GRAU DE SUPERSATURACÃO DO AR PARA 1 ATM.



FONTE: ADAPTADO DE KOBAYASHI (1958).

FIGURA 9 – ILUSTRAÇÕES DAS DIFERENTES FORMAS DE CRISTAL DE GEADA.



FONTE: ADAPTADO DE KOBAYASHI (1958).

Propondo a resolução desse problema, Nascimento, Loyola e Hermes (2014) conduziram recentemente um estudo teórico-experimental dos processos de crescimento e adensamento de geada em canais formados por placas paralelas isotérmicas. Para tanto, foi especialmente projetado e construído um aparato experimental, que consiste em um túnel de vento fechado, em que a condição do ar na entrada do canal e as temperaturas das superfícies da seção de testes são rigorosamente controladas. Um sistema de aquisição de imagens foi empregado para medir a evolução da espessura da geada ao longo do tempo, enquanto uma balança de precisão foi utilizada, ao final do teste, para medir a massa de geada depositada. Com base em uma análise teórica, realizada com o intuito de identificar as escalas do problema, foi proposta uma equação evolutiva para a porosidade da geada que deu origem à seguinte correlação semi-empírica para a densidade da geada formada tanto em canais como em placas planas:

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = 0,0026 \left[\frac{c_p(T_{dp} - T_w)}{i_{sv}(\omega_a - \omega_{sat}(T_w))} \right]^{-\frac{4}{3}} \sqrt{t} \quad (1.11)$$

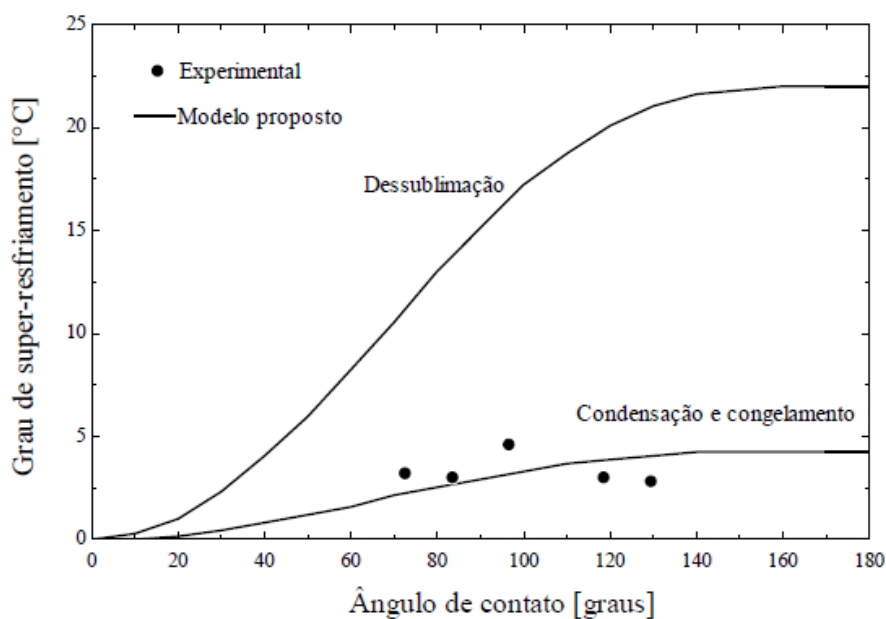
Quando comparada com os dados experimentais, a correlação proposta foi capaz de prever aproximadamente 90% dos dados com erros na faixa de $\pm 15\%$.

1.3.2 Estudos sobre superfícies

Uma parcela considerável da literatura sobre formação de geada diz respeito não somente processos de nucleação e crescimento da geada, mas também do efeito de superfícies estruturadas (e.g., hidrofóbicas e super-hidrofóbicas) em condições de operação sujeitas a baixas temperaturas. O uso de revestimentos super-hidrofóbicos, tendem a retardar ou até mesmo inibir a formação de geada sobre superfícies resfriadas (OBERLI, CARUSO, et al., 2014).

Piucco et al. (2008) estudaram o efeito do ângulo de contato de um embrião de condensado sobre o grau de super-resfriamento necessário para o congelamento do embrião, como mostra a Figura 10. O estudo foi conduzido para uma gama de variação de ângulo de contato ($72,6^\circ < \theta < 129,5^\circ$).

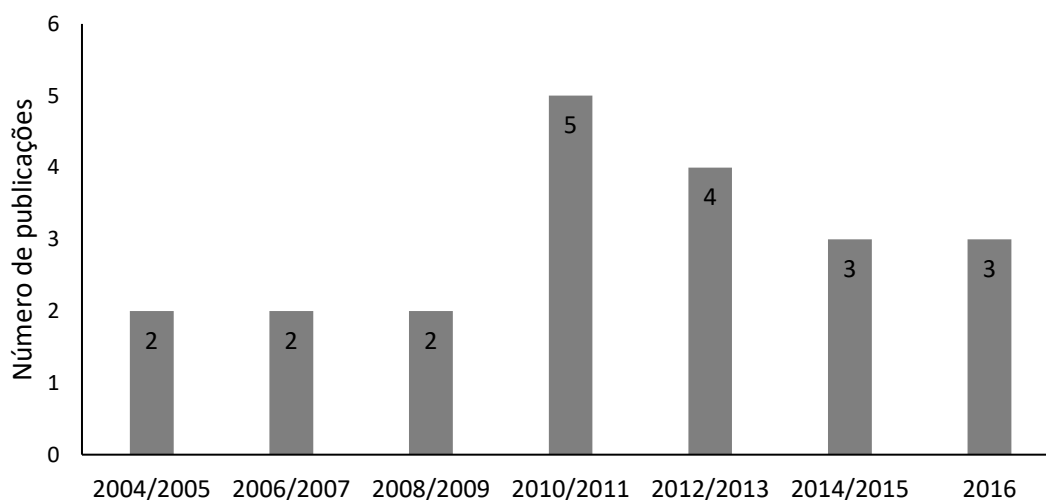
FIGURA 10 – GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO PARA NUCLEAÇÃO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO.



FONTE: PIUCCO (2008).

A Figura 11 ilustra o número de trabalhos publicados que abordam a aplicação de superfícies estruturadas (i.e. com diferentes ângulos de contato devido a variações de rugosidade e energia livre de superfície) em baixas temperaturas, o que demonstra o interesse crescente na influência das características das superfícies sobre a formação de geada. Os principais trabalhos que relacionam a formação de geada com a utilização de superfícies estruturadas estão sumarizados na Tabela 4.

FIGURA 11 – NÚMERO DE PUBLICAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DE SUPERFÍCIES ESTRUTURADAS EM BAIXAS TEMPERATURAS.



FONTE: SCIENCE DIRECT (2016).

TABELA 4 – PRINCIPAIS TRABALHOS REALIZADOS SOBRE A FORMAÇÃO DE GEADA EM SUPERFÍCIES ESTRUTURADAS EM CONDIÇÕES DE BAIXAS TEMPERATURAS.

Autor	Origem	Tipo de estudo			Variáveis Medidas		
		Condensação	Dessublimação	Solidificação de gota	Condições Psicrométricas	θ	σ
Farhadi et al. (2011)	Canadá			X	X	X	
Kim e Lee (2011)	Coreia do Sul	X	X		X	X	
Huang et al. (2011)	China			X	X		
Antonini et al. (2011)	Itália	X	X				
Huang et al. (2012)	China			X	X	X	
Boinovich et al. (2013)	Rússia			X			
Oberli et al. (2014)	Suíça			X	X	X	
Jing et al. (2013)	Coreia do Sul			X	X	X	
Chaudhary e Li (2014)	Índia			X	X		
Wang et al. (2015)	Coreia do Sul			X	X	X	X
Rahimi et al. (2015)	Dinamarca		X		X	X	X
Rahman e Jacobi (2015)	EUA	X	X	X	X	X	
Sommers et al. (2016)	EUA		X		X	X	
Sommers et al. (2017)	EUA		X		X	X	

DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS ABORDADAS NOS TRABALHOS: θ = ÂNGULO DE CONTATO, σ = ENERGIA DE SUPERFÍCIE

Farhadi et al. (2011) estudaram o desempenho de retardamento de formação de geada sobre diversas superfícies hidrofóbicas, variando micro-nano rugosidade e composição química da superfície. Para isso, foram realizados estudos sobre a aderência da geada formada sobre essas superfícies. Os resultados mostram que as propriedades “anti-geada” desses revestimentos se deterioram com o processo de formação de gelo e de degelo, tal que a durabilidade do revestimento é um problema a ser considerado. Observa-se também que o efeito hidrofóbico das superfícies é significativamente menor a baixas temperaturas. Os autores concluíram que superfícies hidrofóbicas nem sempre são gelofóbicas (*icephobics*), mesmo quando a umidade do ar é alta, limitando, portanto, a utilização desses revestimentos nas aplicações de refrigeração.

Kim e Lee (2011) investigaram os efeitos de congelamento e descongelamento de água nas superfícies das aletas de uma bomba de calor operando em condições de inverno. Essas aletas foram previamente tratadas com o objetivo de obter-se diferentes ângulos de contato: hidrofílica $2,5^\circ$, sem tratamento 75° e hidrofóbica 142° . Através dos resultados, os autores observaram que a aleta hidrofóbica retardou a formação de geada enquanto a aleta hidrofílica apresentou uma espessura de geada menor e mais densa dentre as testadas. Os efeitos no descongelamento foram considerados insignificantes, porém a água residual na superfície hidrofílica foi significante menor que a da superfície hidrofóbica. Contudo os autores concluíram que os tratamentos não trazem alterações significativas para essa aplicação.

Huang et al. (2011) estudaram um revestimento em cobre que permite um ângulo de contato elevado (i.e., superfície hidrofóbica). Os autores focaram nos efeitos de retardo do tempo para congelamento de uma gota d'água, onde foram observados períodos de até 20 min para as condições estudadas. Além disso, desenvolveram um estudo teórico levando em consideração a molhabilidade da superfície e a teoria de transição de fase da água.

Antonini et al. (2011) realizaram um estudo qualitativo sobre a aplicação de revestimentos hidrofóbicos para aplicações em aviação. Os resultados mostraram que tal estratégia pode não só ser um importante fator de controle da quantidade de massa de geada formada nas asas de um avião, como também reduz a energia necessária para remover o gelo depositado.

Huang et al. (2012) estudaram o congelamento de uma gota de água sobre superfícies com diferentes ângulos de contato. Os autores observaram que quanto maior o ângulo de contato da superfície refrigerada maior será o grau de super-resfriamento necessário para que ocorra a solidificação e, consequentemente, o tempo necessário para ocorrer a nucleação. Foi relatado um crescimento maior da geada formada sobre superfícies hidrofóbicas, por apresentar um aspecto dendrítico.

Boinovich et al. (2013) apresentaram as vantagens dos revestimentos hidrofóbicos como método de proteção contra a formação de geada. São analisados os mecanismos físico-químicos fundamentais que determinam o desempenho anti-geada dessas superfícies, além de apresentarem dados sobre a perda da eficiência dos revestimentos ao longo do tempo.

Jing et al. (2013) testaram o congelamento e descongelamento de gotas de água sobre superfícies com diferentes ângulos de contato. Testaram também superfícies super-hidrofóbicas rígidas e flexíveis, onde ambas apresentaram efeitos no retardamento da formação de geada. Entretanto, somente a superfície rígida manteve sua característica hidrofóbica depois do degelo, já a superfície flexível perdeu sua característica hidrofóbica.

Oberli et al. (2014) realizaram um trabalho voltado à degradação dos revestimentos super-hidrofóbicos, e como esse feito influencia no congelamento de gotas de água macroscópicas depositadas nas placas de teste. Os autores concluíram que a característica super-hidrofóbica da superfície não é suficiente para retardar a nucleação em condições de baixas temperaturas de superfícies, e que as superfícies não conseguem manter a característica super-hidrofóbica devido à presença constante de contaminantes, especialmente poeira.

Chaudhary e Li (2014) apresentaram um estudo experimental e numérico sobre o congelamento de gotas de água em superfícies com diferentes ângulos de contato, registrando o tempo necessário para o congelamento e a dinâmica do processo. A evolução da temperatura das gotículas foi comparada através de métodos experimental e numérico. Experimentalmente foram utilizados métodos invasivos e não-invasivos para identificar os processos envolvidos no resfriamento e na mudança de fase das gotículas. Verificou-se que o tempo necessário para que uma gotícula seja congelada depende da temperatura das gotículas no momento de pré-solidificação, assim como a molhabilidade da superfície. Os resultados numéricos obtidos para o congelamento da gota foram comparados com os dados experimentais, mostrando uma boa concordância entre os tempos de congelamento obtidos pelas duas abordagens.

Wang et al. (2015) apresentaram um estudo sobre um revestimento hidrofóbico específico, com um ângulo de contato de 147° . O revestimento foi obtido através da aplicação de um agente de acoplamento de aluminato sobre uma superfície de alumínio. A formação de geada foi observada através de um microscópio óptico e de uma câmera. Os resultados experimentais mostraram que a superfície do revestimento hidrofóbico retardou o crescimento da geada em aproximadamente 60 min quando comparado com uma superfície de alumínio sem tratamento. Testes de fadigas também foram utilizados para investigar a durabilidade do revestimento, onde foi observado que os revestimentos apresentaram uma interface forte e estável.

Rahman e Jacobi (2015) desenvolveram técnicas de produção de micro ranhuras (*microgrooved*) sobre um substrato de alumínio, e estudaram o comportamento dessa superfície quando sujeitas a baixa temperatura. A análise foi feita sobre condensação e dessublimação do vapor d'água do ar úmido. Além disso, foram verificados os processos de gelo e degelo dessas superfícies. Os autores concluíram que essa topografia de superfície favorece a drenagem da água após o degelo.

Recentemente importantes contribuições ao estudo das propriedades macroscópicas da geada sobre superfícies hidrofóbicas e hidrofílicas foram obtidas através do desenvolvimento

dos modelos de densidade de geada, esses modelos foram inicialmente adaptados dos existentes para superfície padrão.

Sommers et al. (2016) apresentaram uma análise da evolução da densidade da geada em três diferentes substratos com diferentes ângulos de contato: 45,3° 81,9° 158,9°. Os autores realizaram uma regressão da densidade da camada de geada obtida experimental com a correlação obtida no trabalho de Nascimento et al, (2015). Os resultados mostraram uma boa concordância para a superfície sem tratamento. Para a superfície hidrofóbica foi encontrada uma redução na densidade da geada entre 37 e 41%, enquanto que para a superfície hidrofílica houve aumento entre 20 e 26% na densidade. Tais resultados expressam quantitativamente a influência do ângulo de contato sobre a densidade da geada.

As três superfícies testadas por Sommers et al. possuíam características químicas distintas (i.e., energia livre de superfícies), a superfície hidrofílica foi obtida por tratamento químico, enquanto a superfície hidrofóbica foi obtida por aspersão de óleo com característica hidrofóbica, adicionalmente no último caso foi relatado a degradação da característica hidrofóbica após os testes, esse mesmo comportamento foi relatado por outros pesquisadores (VALIPOUR, BIRJANDI e SARGOLZAEI, 2014).

No ano seguinte, Sommers et al. (2017) publicaram um novo estudo apresentando uma correlação semi-empírica 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 do ar, umidade do ar). Os estudos conduzidos pelos autores foram obtidos para condições de temperatura do ar úmido variando entre 20,5 e -23,9°C, umidade relativa entre 40 e 80%, e temperatura da superfície entre -5 e -13°C. Resultando, portanto, em graus de supersaturação (i.e., diferença entre umidade absoluta presente no ar e umidade de saturação na temperatura de superfície) variando entre 6,2 e 12,5 g/kg. Tais condições de teste resultam em morfologias predominantes do tipo agulha e dendrita. 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:

$$\rho_f = 2,17\lambda^{-3/2}\sqrt{t}\left(\frac{4,5}{\ln \theta}\right)^{0,95}\left(\frac{0,80}{\phi}\right)^{0,61} \quad (1.12)$$

Os estudos apresentados acima expressam as relações entre os fenômenos de crescimento e adensamento de uma camada de geada com os ângulos de contato de diversas superfícies.

Ainda, é interessante conduzir experimentos que busquem condições de formação de geada com diferentes morfologias, contemplando temperaturas de superfície encontrada em evaporadores de refrigeradores comerciais (em torno de -10°C) e domésticos (em torno de -25°C), além de uma maior faixa de temperatura do ar úmido ($0 \sim 22^{\circ}\text{C}$).

A partir da análise da literatura, observa-se que não se quantifica, com certeza, quão efetivos são os tratamentos superficiais para evitar ou retardar os processos de formação de gelo e geada. Adicionalmente, não há uma análise concisa sobre a evolução do crescimento e adensamento da camada de geada em tais superfícies. Existem muitos dados empíricos, mas há claramente a falta de um modelo que consiga descrever a influência do ângulo de contato no processo de crescimento da camada de geada. Preencher tais lacunas é o principal objetivo do presente trabalho.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo da tese é desenvolver e validar experimentalmente um modelo com fundamentação teórica, que descreva o crescimento da camada de geada sobre superfícies isotérmicas.

O estudo deve contemplar uma análise conjunta de condições psicrométricas do ar, temperatura e ângulo de contato da superfície isotérmica e características de escoamento que influenciam a formação de geada.

A fim de atingir tal propósito, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Desenvolver um aparato experimental para possibilitar o estudo do crescimento de geada em uma ampla faixa de condições psicrométricas e temperatura de superfície;
- Obter e caracterizar superfícies de teste com diferentes ângulos de contato, contemplando uma faixa significativa de ângulos de contato;
- Gerar uma base de dados experimental em uma ampla faixa de condições psicrométricas e temperatura de superfície para os diferentes ângulos de contato;
- Analisar o efeito da temperatura da superfície, do ângulo de contato e do grau de supersaturação sobre o crescimento da geada;
- Obter um modelo de base física, para prever o crescimento da camada da geada em função das variáveis independentes, tais como grau de supersaturação, temperatura da superfície e ângulo de contato.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica necessária ao trabalho foi baseada na teoria da nucleação e em um modelo semi-empírico de abordagem macroscópica de formação da camada de geada (crescimento e adensamento) sobre uma placa plana. Dentro do modelo de nucleação é apresentado a influência da superfície da placa plana sobre a morfologia dos cristais de gelo e sobre a energia livre necessária para que ocorra a mudança de fase sobre essa superfície. Além disso, apresenta-se no modelo semi-empírico de formação de geada as limitações para que essa abordagem seja considerada macroscópica e possa ser utilizada como método de regressão de dados experimentais.

2.1 TEORIA DA NUCLEAÇÃO

O estágio inicial da formação da geada é caracterizado pelo processo de nucleação, pequenas gotículas são formadas devido a condensação ou dessublimação do vapor d'água presente no ar sobre uma superfície sólida resfriada com temperatura inferior ao ponto de orvalho. Se a temperatura da superfície for suficientemente abaixo da temperatura de congelamento do vapor d'água há a formação de geada.

A formação de geada, necessita de maior quantidade de energia para a deflagração do que o processo de formação de gelo (condensação seguida de solidificação), visto que é necessário um maior resfriamento a partir do ponto de orvalho.

O processo de nucleação estudado é decorrente da mudança de fase do vapor de água presente no ar, a qual pode ocorrer de duas formas distintas: (i) homogênea, quando não há interação entre o vapor de água e um substrato, caso de formação de névoa; e (ii) heterogênea, quando a nucleação se deve à interação entre forças coesivas (entre moléculas de água) e adesivas (afinidade entre moléculas de água e substrato), como no caso da formação de cristais sobre uma superfície resfriada (Fletcher, 1970).

A energia total necessária para promover a nucleação, é composta de duas parcelas:

$$\Delta G_{\text{tot}} = \Delta G_{\text{lat}} + \Delta G_{\text{supf}} \quad (2.1)$$

A energia latente necessária para converter n moléculas de vapor d'água para o estado sólido pode ser expressa através da energia livre de Gibbs (G), como indicado a seguir,

$$G = U + PV - TS \quad (2.2)$$

onde o diferencial da equação (2.2) é dado por:

$$dG_{lat} = dU + PdV - VdP - TdS - SdT \quad (2.3)$$

Como o processo de mudança de fase é isotrópico, um balanço de energia no volume de controle na forma diferencial pode ser aplicado,

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (2.4)$$

onde $\delta Q = TdS$ e $\delta W = PdV$, logo:

$$dU - TdS + PdV = 0 \quad (2.5)$$

Combinando as equações (2.3) e (2.5), e considerando a mudança de fase a temperatura constante, obtém se:

$$dG_{lat} = VdP \quad (2.6)$$

Assumindo que a mistura ar seco e vapor de água se comporta como gás ideal, $PV = (\rho_i/m)RT$, a energia livre latente de nucleação ΔG_{lat} , pode ser expressa por,

$$\Delta G_{lat} = -\frac{\rho_i VRT_e}{m} \ln \left(\frac{P_a}{P_{sat,e}} \right) \quad (2.7)$$

onde $P_a / P_{sat,e}$ representa a razão entre as pressões parciais do vapor no meio envolvente e na interface onde ocorre a nucleação, sendo que $P_a / P_{sat,e} \approx \omega_a / \omega_{sat,e}$, para a nucleação de um embrião de gelo, pode-se reescrever a equação (2.7) da seguinte forma,

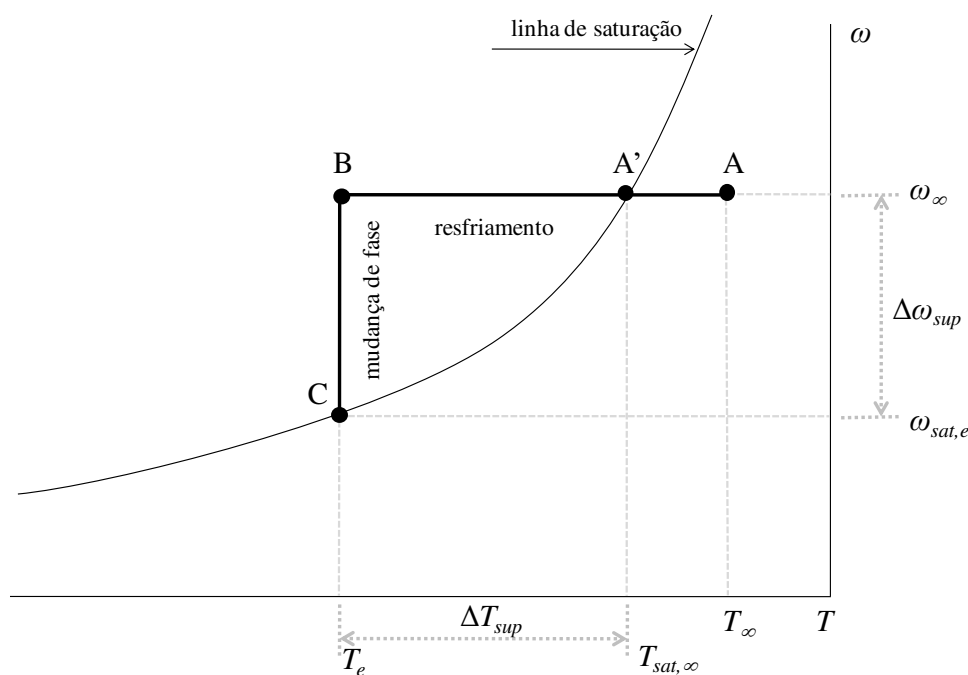
$$\Delta G_{lat} \cong -\frac{\rho_i VRT_e}{m} \ln \left(\frac{\omega_a}{\omega_{sat,e}} \right) \quad (2.8)$$

em que ρ_i representa a densidade do gelo, V o volume do embrião e m a massa molar da água.

A Figura 12 permite interpretar o processo de nucleação a partir de uma sequência de processos psicrométricos. Primeiramente ocorre um resfriamento do vapor d'água até atingir o ponto de orvalho (processo A-A'). Nesta etapa não há mudança de fase, e toda perda de energia é na forma de calor sensível, transferida devido ao gradiente de temperatura na camada limite térmica da superfície.

Tanto a nucleação homogênea quanto a heterogênea demandam uma quantidade adicional de energia para romper o equilíbrio e desencadear o processo de mudança de fase (processo A'-B). Quando esse equilíbrio é rompido, inicia-se efetivamente a mudança de fase (processo B-C). Figura 12 – Representação da formação de geada em uma carta psicrométrica

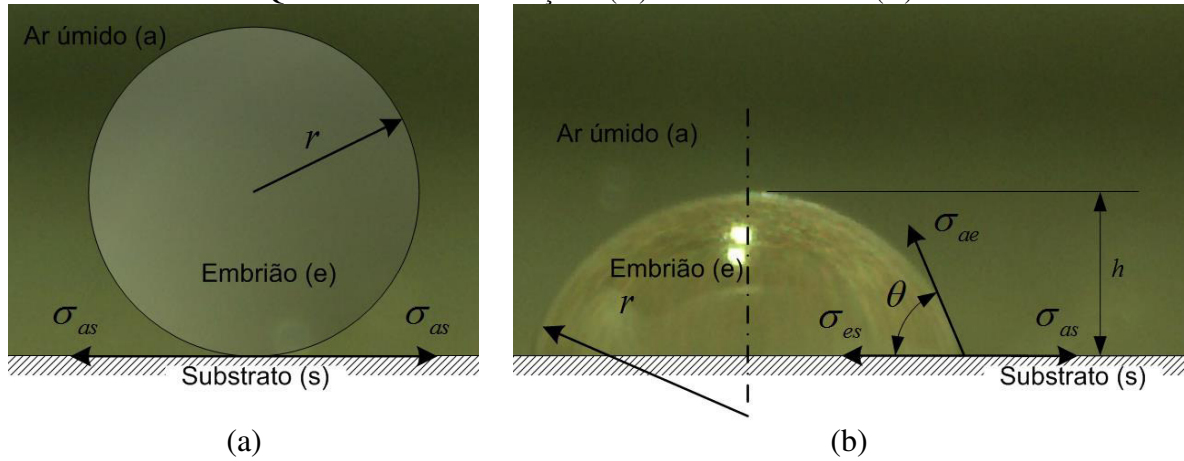
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DA FORMAÇÃO DE GEADA EM UMA CARTA PSICROMÉTRICA



FONTE: PIUCCO (2008).

Como, no equilíbrio, o sistema tende para uma condição de mínima energia, o embrião procura a menor área superficial que comporte o seu volume. Desta forma, o embrião assume um formato esférico, no caso da nucleação homogênea, ou um formato de calota esférica, no caso da nucleação heterogênea, como ilustra a Figura 13.

FIGURA 13 – ESQUEMA DE NUCLEAÇÃO (A) HOMOGÊNEA E (B) HETEROGÊNEA



Através da Figura 13 também é possível identificar as tensões superficiais envolvidas na nucleação: (i) tensão superficial entre o ar úmido e o embrião σ_{ae} ; (ii) a tensão superficial entre o substrato e o ar úmido σ_{as} ; e (iii) a tensão superficial entre o embrião e a superfície σ_{es} . Também estão representados o raio do embrião r , a altura da calota esférica h .

2.1.1 Nucleação Homogênea

Conforme a equação (2.1), a energia livre total necessária para nucleação, é composta de uma parcela de energia latente, ΔG_{lat} , dada pela equação (2.8), e uma parcela de energia de superfície, que depende da interface entre o ar úmido (meio envolvente) e o embrião, tal que:

$$\Delta G_{supf} = \sigma_{ae} A_{ae} \quad (2.9)$$

Assim,

$$\Delta G_{tot} = -\frac{\rho_i V R T_e}{m} \ln \left(\frac{\omega_a}{\omega_{sat,e}} \right) + \sigma_{ae} A_{ae} \quad (2.10)$$

Para um embrião esférico (Figura 13-a) de raio r , $A_{ae} = 4\pi r^2$ e $V = 4\pi r^3/3$, de modo que é possível reescrever a equação anterior da seguinte forma,

$$\Delta G_{tot} = -\frac{4\pi}{3} r^3 \frac{\rho_i R T_e}{m} \ln \left(\frac{\omega_a}{\omega_{sat,e}} \right) + \sigma_{ae} 4\pi r^2 \quad (2.11)$$

2.1.2 Nucleação Heterogênea

Na nucleação heterogênea, componentes de força agem sobre o embrião, de modo que a resultante dessas forças atribui a ele um formato de calota esférica (Figura 13-b). Para uma calota esférica de raio r , a parcela de energia de superfície é determinada adicionando-se um termo resultante de um balanço de energia superficial na interface do substrato, $(\sigma_{es} - \sigma_{as})A_{es}$, à energia de nucleação homogênea:

$$\Delta G_{\text{supf}} = \sigma_{ae}A_{ae} + (\sigma_{es} - \sigma_{as})A_{es} \quad (2.12)$$

$$\Delta G_{\text{tot}} = -\frac{\rho_i V R T_e}{m} \ln \left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat},e}} \right) + \sigma_{ae}A_{ae} + (\sigma_{es} - \sigma_{as})A_{es} \quad (2.13)$$

Analisando a disposição geométrica da Figura 13-b, na interface a-e-s, pode-se correlacionar as tensões superficiais, $\cos\theta = (\sigma_{as} - \sigma_{es}) / \sigma_{ae}$, com outras relações geométricas, $V = \pi H^2 (3r - H) / 3$, $A_{ae} = 2\pi r H$, $A_{es} = \pi r^2 \sin^2\theta$, e $h = r (1 - \cos\theta)$, tal que ΔG_{tot} pode ser dado por:

$$\Delta G_{\text{tot}} = \left[-\frac{\pi}{3} r^3 \frac{\rho_i R T_e}{m} \ln \left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat},e}} \right) + \sigma_{ae} \pi r^2 \right] (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) \quad (2.14)$$

onde θ representa o ângulo de contato entre a superfície e o embrião.

A fim de se conhecer o tamanho mínimo do raio de formação de um embrião (i.e., raio crítico, r^*) deriva-se a equação (2.14) em relação ao raio, e igualando-se a equação a zero. Substituindo o resultado na equação acima, obtém-se a energia livre mínima necessária para a formação de um embrião em função das condições psicrométricas e do ângulo de contato,

$$\Delta G_{\text{tot}}^* = \frac{\frac{4\pi}{3} \sigma_{ae}^3}{\left[-\frac{\rho_i R T_e}{m} \ln \left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat},e}} \right) \right]^2} (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) \quad (2.15)$$

onde a temperatura do embrião T_e é aproximadamente igual a temperatura do substrato, $T_e \approx T_w$, a energia livre de superfície σ_{ae} é função da temperatura, e I_0 é a constante cinética de mudança de fase e pode ser obtida da Tabela 5.

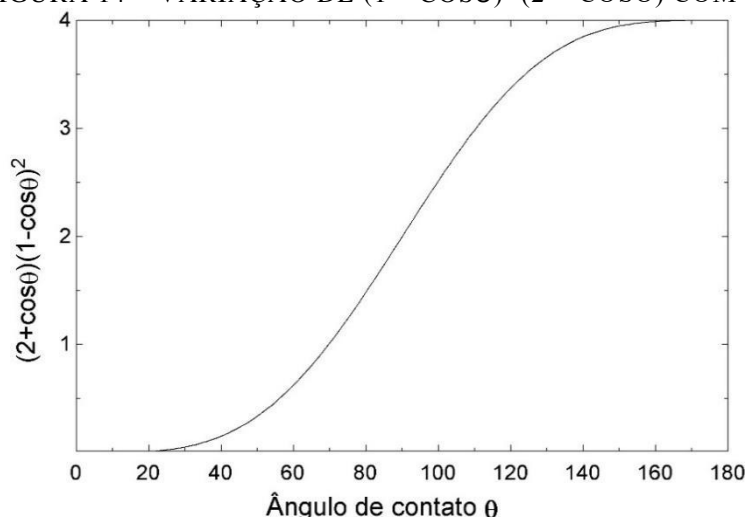
TABELA 5 – VALORES DE CONSTANTE CINÉTICA DE MUDANÇA DE FASE E ENERGIA LIVRE DE SUPERFÍCIE.

Mudança de fase	Estado		$I_0 \text{ (m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$	Energia livre de superfície (meio envolvente-embrião) σ (kJ/m ²)
	Meio envolvente	Embrião		
Condensação	Vapor	Água	10^{29}	$(75,7 - 0,1775 T) \cdot 10^{-6}$
Dessublimação	Vapor	Gelo	10^{29}	$(99,5 - 0,0750 T) \cdot 10^{-6}$
Congelamento	Água	Gelo	10^{32}	$(23,8 + 0,1025 T) \cdot 10^{-6}$

FONTE: NA E WEBB (2003)

Como demonstrado por Piucco (2008), a Figura 14 expressa a variação do termo $(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta)$ com θ , onde se observa a existência de um valor máximo para $\theta = 180^\circ$, indicando que a energia necessária para a nucleação homogênea é sempre maior que a necessária para a nucleação heterogênea, em que $\theta < 180^\circ$.

FIGURA 14 – VARIAÇÃO DE $(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta)$ COM θ



FONTE: PIUCCO (2008).

Volmer e Flood (1934) obtiveram dados experimentais que indicam que a nucleação homogênea se inicia quando existe uma taxa mínima de formação de embriões de aproximadamente 2,2 embriões/cm²s. Essa taxa mínima de formação de embriões é utilizada como estimativa preliminar para os processos de dessublimação e condensação. Becker e

Doring (1935) propuseram uma função exponencial para estimar a taxa mínima de formação de embriões, quando a nucleação é heterogênea:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_{\text{tot}}^*}{KT_w}\right) \quad (2.16)$$

onde $K = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ refere-se à constante de Boltzmann.

Assim, é possível resolver a equação (2.16) tanto para processos de dessublimação como condensação a partir das condições psicrométricas e do ângulo de contato.

Conhecendo-se a temperatura da superfície T_w , e consequentemente o grau de super-resfriamento ΔT_{sup} (diferença entre a temperatura de orvalho e a temperatura do substrato), é possível combinar as equações (2.14) e (2.16),

$$\left(\ln \frac{I_0}{I}\right) KT_w = \frac{\frac{4\pi}{3} \sigma_{\text{ae}}^3}{\left[-\frac{\rho_i RT_w}{m} \ln\left(\frac{\omega_a}{\omega_{\text{sat},e}}\right)\right]^2} (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \quad (2.17)$$

A fim de determinar o grau de super-resfriamento necessário para iniciar o processo de mudança de fase em função do ângulo de contato (Figura 12), de modo que a solução da equação (2.17) fornece a temperatura do substrato e, consequentemente, o grau de super-resfriamento onde se inicia o processo de mudança de fase em função do ângulo de contato.

Os estudos realizados por Volmer e Flood (1934), e a teoria da nucleação homogênea e heterogênea (Fletcher, 1970), são validas somente para substratos completamente lisos. No entanto, as superfícies dos materiais utilizados em trocador de calor não são completamente lisas, e geram sítios propícios à nucleação, acelerando o processo de nucleação. Como estes dois fatores podem aumentar substancialmente a taxa de nucleação de embriões, I , uma vez que esta é uma função exponencial da energia necessária para nuclear um embrião, a taxa mínima de formação de embriões proposta por Volmer e Flood (1934) pode não se adequar aos tipos de superfície utilizados em aplicações práticas.

Piucco (2008) apresentou dados experimentais para 5 tipos de superfícies com ângulos de contato distintos (entre $72,6^\circ$ e $129,5^\circ$).

2.1.3 Morfologia

Kobayashi (1958) descreveu diversos tipos de morfologia, numa ampla gama de grau de supersaturação e temperatura de substrato, já apresentados na Figura 8. Porém seu estudo não tinha por finalidade avaliar a influência das características superficiais (e.g., energia livre de superfície e rugosidade) sobre a morfologia.

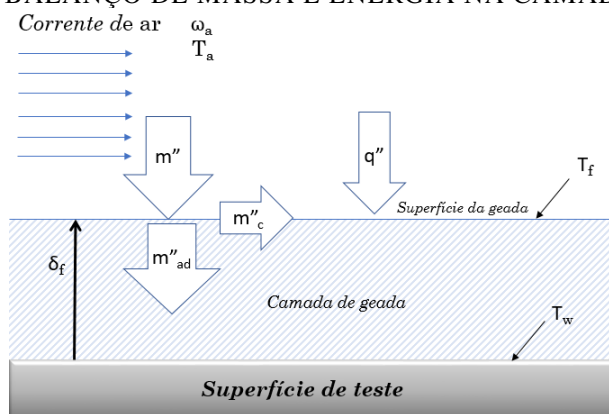
Algumas dessas morfologias relatadas estão ilustradas na Figura 9, dentre as quais são observadas as formas dendríticas e de colunas, presentes respectivamente nos evaporadores dos refrigeradores comerciais (que possuem temperatura de superfície em torno de -10°C) e domésticos (que apresentam temperatura de superfície em torno de -25°C). Em ambos os casos, as estruturas formam uma camada de geada mais porosa, i.e., menos densa, e com menor condutividade térmica, se comparadas com o gelo sólido.

O presente trabalho visa determinar se e como essas características morfológicas podem ser alteradas quando formadas sobre superfícies com diferentes características de ângulo de contato.

2.2 MODELO SEMI-EMPÍRICO DE CRESCIMENTO DA GEADA

O modelo semi-empírico para o crescimento da camada de geada foi baseado no artigo de Hermes et al., (2017b), originalmente voltado para convecção natural, onde as seguintes hipóteses são aplicadas: (i) processo quase-estático; (ii) difusão de calor e massa unidimensional; (iii) camada de geada uniforme ao longo da placa plana e, (iv) a analogia de Lewis é válida. Portanto, ambos os processos de crescimento de adensamento são representados pelo balanceamento de massa na camada de geada na Figura 15.

FIGURA 15 – BALANÇO DE MASSA E ENERGIA NA CAMADA DE GEADA



FONTE: ADAPTADO DE HERMES ET AL. (2017B)

O balanço de massa na camada de geada fornece:

$$\frac{d}{dt}(\rho_f \delta) = m'' \quad (2.18)$$

Desenvolvendo o lado esquerdo da equação acima, chega-se a:

$$\delta \frac{d\rho_f}{dt} + \rho_f \frac{d\delta}{dt} = m'' \quad (2.19)$$

Rearranjando

$$\frac{\delta}{\rho_f} \frac{d\rho_f}{dt} + \frac{d\delta}{dt} = \frac{m''}{\rho_f} \quad (2.20)$$

onde o primeiro termo da equação acima refere-se ao processo de adensamento da camada de geada ao longo do tempo, e o segundo termo representa a taxa de crescimento da geada. Nascimento et al. (2015) e Negrelli et al, (2016) demonstraram que, para baixas velocidades, a massa de geada tem um aumento linear em função do tempo ($M \sim t$), de maneira que o fluxo mássico de vapor d'água é constante no tempo.

Nascimento et al. (2015), através de um estudo teórico-experimental dos processos de crescimento e adensamento de geada formada em placas paralelas isotérmicas, obtiveram uma correlação semi-empírica para a densidade da geada ρ_f , que abrange uma ampla faixa de operações com uma faixa de erro bastante satisfatório ($\pm 15\%$). Assim, a densidade da camada de geada pode ser representada por:

$$\rho_f = \rho_i C \lambda^{-n_\rho} \sqrt{t} \quad (2.21)$$

onde C pode ser uma constante (HERMES, LOYOLA e NASCIMENTO JR, 2014) ou uma função do ângulo de contato e da umidade relativa (SOMMERS, NAPORA, *et al.*, 2017). O parâmetro n_ρ foi obtido experimentalmente para placas planas e paralelas, enquanto a relação $\sqrt{t}$ se mostrou constante. Para o caso de placa plana, $n_\rho = 3/2$ (HERMES, LOYOLA e NASCIMENTO JR, 2014) e $n_\rho = 3/4$ para placas planas paralelas (NASCIMENTO JR, LOYOLA e HERMES, 2015). Enquanto o número de Jakob modificado λ representa a razão

entre o calor sensível e o calor latente envolvidos no processo de dessublimação (HERMES, LOYOLA e NASCIMENTO JR, 2014),

$$\lambda = \frac{c_p(T_{dp} - T_w)}{i_{sv}(\omega_a - \omega_{sat,w})} \quad (2.22)$$

onde c_p é o calor específico do ar úmido, T_{dp} é a temperatura de orvalho do ar úmido, i_{sv} é o calor latente de dessublimação do vapor de água, e $\omega_{sat,w}$ é a umidade absoluta do ar saturado na temperatura da superfície resfriada.

A derivada da correlação para densidade da geada (2.21) é expressa pela seguinte equação:

$$\frac{d\rho_f}{dt} = \frac{b\rho_i C\lambda^{-n}}{\sqrt{t}} \quad (2.23)$$

A partir da combinação das equações (2.21) e (2.20) é possível obter a seguinte equação diferencial ordinária para o crescimento da camada de geada:

$$\frac{d\delta}{dt} + \frac{\delta}{t} = \frac{m''}{\rho_i C\lambda^{-n}\sqrt{t}} \quad (2.24)$$

onde $m''/\rho_i C\lambda^{-n}\sqrt{t}$ é constante ao longo do tempo. A solução da equação diferencial ordinária acima pode ser obtida analiticamente,

$$\delta(t) = \left(\frac{m''}{\rho_i C\lambda^{-n}} \right) \sqrt{t} + \frac{b_c}{\sqrt{t}} \quad (2.25)$$

O fluxo de massa pode ser descrito através da seguinte expressão:

$$m'' = h_m \rho_a (\omega_a - \omega_{sat,w}) \quad (2.26)$$

onde h_m é o coeficiente de transferência de massa por convecção, tipicamente h_m é relacionado ao número adimensional de Sherwood (Sh) (INCROPERA e DEWITT, 2014) equação

$$Sh = \frac{L}{D_a} h_m \sim Re^m Pr^{1/3} \quad (2.27)$$

onde D_a é a difusividade do vapor d'água no ar [m^2s^{-1}] e L é o comprimento da placa ($L = 0,12$ m). Sob condições de escoamento forçado, o número de Sherwood possui escala do produto dos números de Reynolds (vL/ν) e Prandtl (ν/α), conforme a equação acima. Para escoamentos laminares $m \approx 1/2$ e $4/5$ para escoamentos turbulentos. A variação de umidade para cada condição é dada pela diferença da umidade do ar úmido com a umidade de saturação da placa plana, ou seja: $\Delta\omega = (\omega_a - \omega_{sat,w})$. Assim, o fluxo de massa pode ser escrito como:

$$m'' = Re^m Pr^{1/3} \frac{D_a}{L} \rho_a \Delta\omega \quad (2.28)$$

Logo, combinando as equações (2.28) e (2.25) pode-se reescrever a taxa de crescimento da camada de geada da seguinte forma:

$$\delta(t) = a_c \left(\frac{\rho_a}{\rho_i} \right) \left(\frac{D_a \Delta\omega}{L} \right) Re^m Pr^{1/3} \lambda^n \sqrt{t} + \frac{b_c}{\sqrt{t}} \quad (2.29)$$

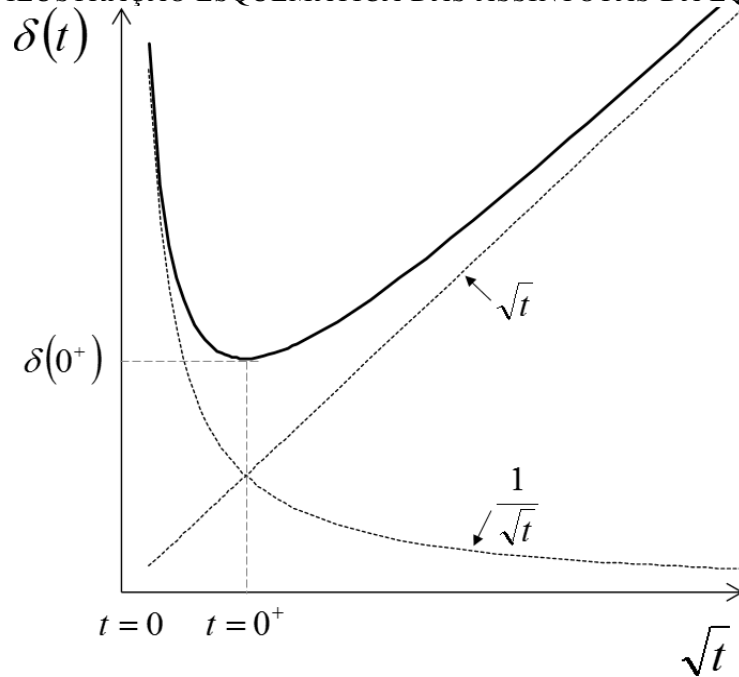
onde os coeficientes a_c e b_c , além dos expoentes m e n devem ser ajustados através da regressão dos dados experimentais a fim de se obter uma correlação semi-empírica para a evolução da camada de geada, $\delta(t)$, ao longo do tempo sob determinada faixa de aplicação. Espera-se que ambos os coeficientes a e b sejam funções do ângulo de contato da superfície, sendo o primeiro devido aos efeitos da superfície na densidade da geada e o segundo por levar em conta as condições iniciais $\delta(t=0^+)$ para o crescimento da camada de geada, onde 0^+ denota o instante em que o processo de formação de geada torna-se macroscópico. Assim, o presente modelo, que é baseado na hipótese do contínuo, é aplicável.

É possível observar na equação (2.25) duas assíntotas no domínio do tempo, uma relacionada ao primeiro termo ($t^{1/2}$) e a segunda baseada no segundo termo ($t^{-1/2}$), ambas no lado direito da equação. A primeira é relacionada ao crescimento da geada ao longo do tempo e a segunda ao decaimento da geada ao longo do tempo, como mostrado na Figura 16. Entretanto, termodinamicamente, não é possível ter um decaimento de geada para um fluxo de massa positivo. Logo, o modelo acima só pode ser aplicado quando $d\delta/dt = 0$ (i.e., $t=0^+$), fisicamente o tempo anterior à aplicação do modelo é regido pela dinâmica de nucleação e a

interação direta do vapor d'água presente no ar com a superfície resfriada . Assim, derivando a equação (2.29) com relação ao tempo e igualando a 0, é possível obter o tempo inicial em que o modelo tem validade, como se segue:

$$t_{0+} = \sqrt{\frac{b_c}{a_c \left(\frac{\rho_a}{\rho_i}\right) \left(\frac{D_a \Delta \omega}{L}\right) \text{Re}^m \text{Pr}^{1/3} \lambda^n}} \quad (2.30)$$

FIGURA 16 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS ASSÍNTOTAS DA EQUAÇÃO (2.32)



FONTE: HERMES ET AL. (2017)

Substituindo a equação acima na equação de crescimento de camada de geada (2.25), obtém-se o valor inicial de espessura de geada onde o modelo descrito passa a ter validade:

$$\begin{aligned} \delta_{0+} = & b_c^{1/4} \left[a_c \left(\frac{\rho_a}{\rho_i} \right) \left(\frac{D_a \Delta \omega}{L} \right) \text{Re}^m \text{Pr}^{1/3} \lambda^n \right]^{3/4} \\ & + b_c^{3/4} \left[a_c \left(\frac{\rho_a}{\rho_i} \right) \left(\frac{D_a \Delta \omega}{L} \right) \text{Re}^m \text{Pr}^{1/3} \lambda^n \right]^{1/4} \end{aligned} \quad (2.31)$$

O modelo será avaliado e ajustado contra dados experimentais que foram obtidos no presente trabalho.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental desenvolvido a fim de obter uma base de dados experimentais confiáveis para validar o modelo teórico, foi dividido em duas frentes.

Na primeira, um aparato experimental, projetado e construído pelo autor, foi adaptado com o intuito de permitir a obtenção de dados referentes à formação de geada sobre uma placa plana horizontal isotérmica de forma controlada e em uma ampla faixa de condições de operação

Outra frente experimental está relacionada à obtenção e caracterização das superfícies de teste. Ambas serão descritas detalhadamente neste capítulo. Adicionalmente, os procedimentos de ensaio e o plano de testes serão apresentados.

3.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

O aparato experimental, mostrado na Figura 17, consiste em um túnel de vento horizontal em circuito fechado que permite o controle das condições psicrométricas do ar, da vazão de ar e da temperatura da superfície da placa plana a ser ensaiada.

FIGURA 17 – APARATO EXPERIMENTAL MONTADO NO LABORATÓRIO DE TERMODINÂMICA E TERMOFÍSICA DA UFPR.

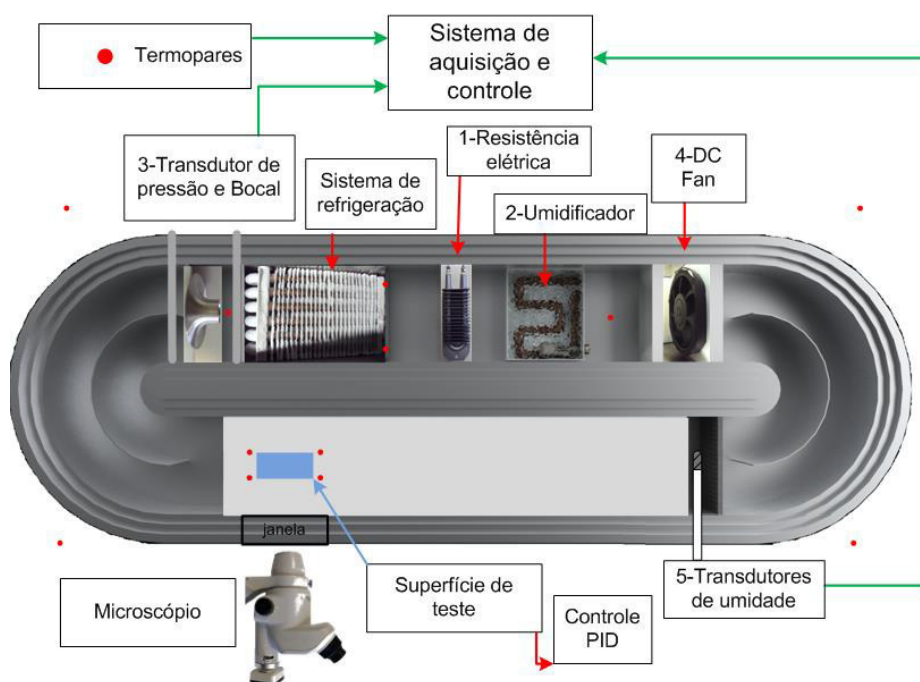


A bancada foi dividida em três subsistemas: Estrutura; Instrumentação e controle do túnel de vento; e Instrumentação e controle das seções de testes.

3.1.1 Estrutura

O circuito de ar possui uma seção transversal de 200 x 200 mm, sendo composto por dois trechos retos, um em que ficam os componentes para climatização da bancada (i.e. controle de umidade e temperatura do ar na entrada da seção de testes, bem como o bocal para medição de vazão) e outro onde está instalada a seção de testes.

FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE.



Placas de material isolante EPS (poliestireno expandido) foram empregadas para formar o canal onde o ar deve escoar até chegar à seção de teste, e as paredes do túnel foram isoladas com placas de EPS (poliestireno expandido) com 50 mm de espessura. O cálculo de carga térmica da bancada, necessário ao dimensionamento do sistema de refrigeração, é detalhado em Nascimento (2013).

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

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

3.1.2 Instrumentação e controle das condições psicrométricas

A Figura 18 apresenta a disposição dos elementos que compõem o sistema de aquisição de dados e controle das condições psicrométricas do ar. O ar que escoar no interior do túnel de vento tem sua temperatura reduzida por um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor especialmente projetado e construído para a bancada. O sistema de refrigeração foi instalado em série com uma resistência de 350 W (item 1) pilotada por um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), cuja função consiste em obter um controle fino da temperatura com base em um sinal médio obtido por dois termopares instalados na entrada da seção de testes.

Uma segunda resistência elétrica, de 180 W, foi imersa em uma bandeja de água (item 2) a fim de umidificar o ar, o controle de umidade é feito por um controlador PID que recebe um sinal de umidade dos dois transdutores capacitivos instalados na entrada do canal de escoamento e controla o aquecimento da bandeja de água. Adicionalmente, a bandeja do umidificador possui um sensor de nível magnético, conectado a um relé *on/off*, que desliga a alimentação de energia da resistência caso falte água na bandeja. As resistências estão conectadas a relés de estado sólido modelo AFC-01 da Comtemp, que permitem controlar, a partir do sinal recebido dos controladores PIDs, o ângulo de fase e, conseqüentemente, a tensão entregue às resistências.

A velocidade na seção de testes é obtida através da vazão de ar, medida em um bocal convergente de perfil conhecido e um transdutor de pressão diferencial (item 3), de acordo com o procedimento previsto na norma ASHRAE 51 (1999). Neste trabalho, é utilizado um transdutor Dwyer, modelo 607-21, que trabalha numa faixa de operação de 0 a 125 Pa, com incerteza de medição de 0,25% sobre o fundo de escala (i.e., 0,35 Pa). Foi utilizado um bocal de 1" de diâmetro, fabricados pela Helander. Um ventilador DC axial (item 4), controlado por uma fonte Hikari modelo HK-3003D, é responsável pela movimentação de ar, e permite operar com vazões de trabalho na faixa de 1 a 20 m³/h.

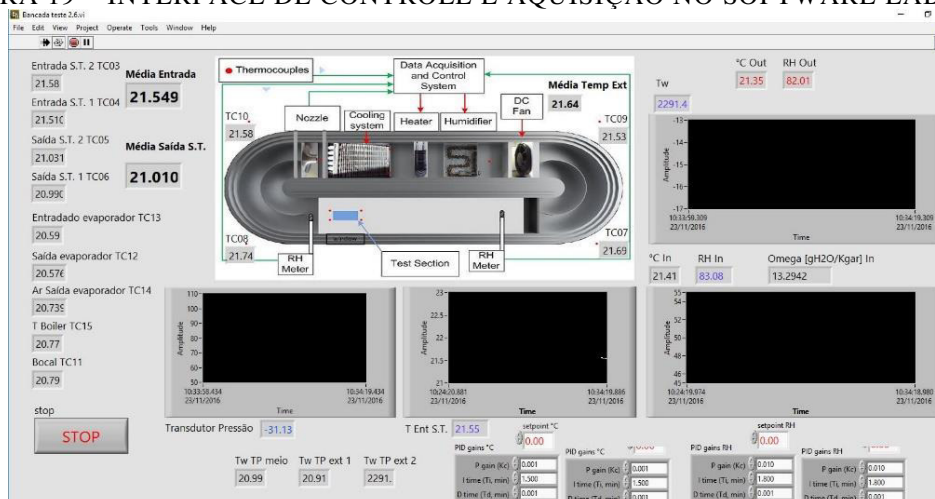
Dois transdutores de umidade relativa do tipo capacitivo (item 5), da marca Testo, modelo 6610 e sonda 6681, com faixa de medição de 0 a 100% de umidade relativa e erro de 1,7% sobre medições acima de 80%, são empregados para medir umidade relativa. Esta medida, juntamente com a pressão atmosférica e a temperatura do ar, permite obter a umidade absoluta do ar ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar}}$), como mostra a Figura 18. Ao final do teste uma balança da marca Shimadzu, modelo BL3200H com incerteza de medição de 0,01g é empregada para medir a quantidade de água depositada sobre a superfície de teste.

As temperaturas ao longo da bancada são medidas por termopares do tipo T modelo Omega PR-T-24-SLE, com incerteza de 0,2 K. Foram empregadas duas tomadas de temperatura a montante e duas a jusante da seção de teste, três tomadas de temperatura na entrada, meio e saída do evaporador, uma tomada entre o umidificador e o ventilador, uma tomada de temperatura no bocal de medição de vazão e quatro tomadas de temperatura no ambiente externo da bancada.

Os componentes de medição foram especificados de maneira a obter-se as menores incertezas de medição dentro das condições de teste. Um sistema de aquisição NI Rack CDAQ-9178, com 8 *slots* e conexão USB 2.0, foi empregado de forma a permitir não só aquisição de dados, mas também o controle de alguns componentes. Foram empregados 16 canais para medição de temperatura (NI 9213), 4 canais para medição de baixa tensão (NI 9211), 16 canais analógicos genéricos que permitem a medição de tensão ou corrente (NI 9207) e 4 canais analógicos (NI 9265) com saída em corrente, para controle. Assim, a bancada pode ser operada de maneira totalmente automatizada, podendo inclusive ser controlada remotamente.

A Figura 19 mostra a interface de aquisição e controle da bancada, programada no software Labview (2014).

FIGURA 19 – INTERFACE DE CONTROLE E AQUISIÇÃO NO SOFTWARE LABVIEW.



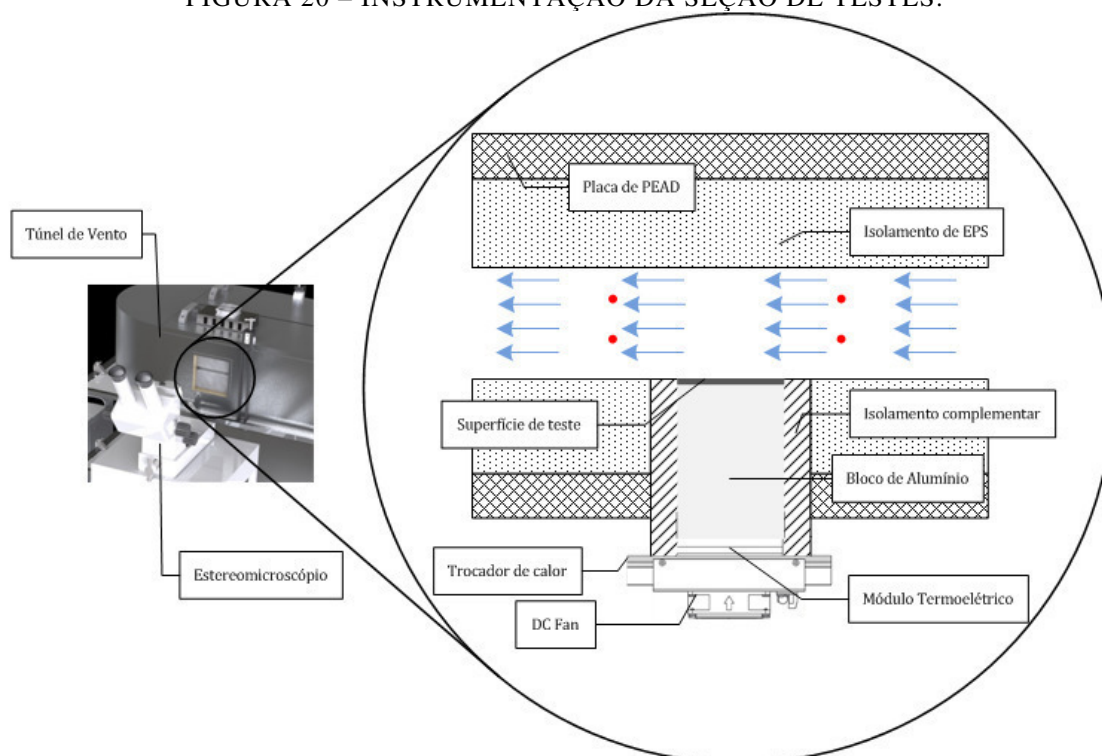
3.1.3 Instrumentação e controle das superfícies de testes

No lado oposto dos componentes de climatização, situa-se a seção de teste, como mostra a Figura 18. O comprimento do trecho reto foi definido de modo que o escoamento tenha condição de se desenvolver antes de chegar à seção de teste propriamente dita, onde a geada será formada sobre a superfície resfriada. Na entrada do canal foi utilizada uma tela homogeneizadora para laminarizar o escoamento e, com isso, reduzir os efeitos de estratificação de temperatura e umidade.

Detalhes da seção de teste são apresentados na Figura 20. A temperatura da superfície de testes é controlada por um módulo termoeletrico da marca Lairdtech modelo DAC060-24-02, acionado por um controlador PID modelo MTTC-1410. Tal conjunto, não só forma a seção de testes propriamente dita, mas também permite um controle rigoroso da temperatura de superfície em que a geada será estudada. Para complementar a estrutura do módulo termoeletrico, foi construída uma extensão de alumínio que atribui uma inércia térmica à seção de testes.

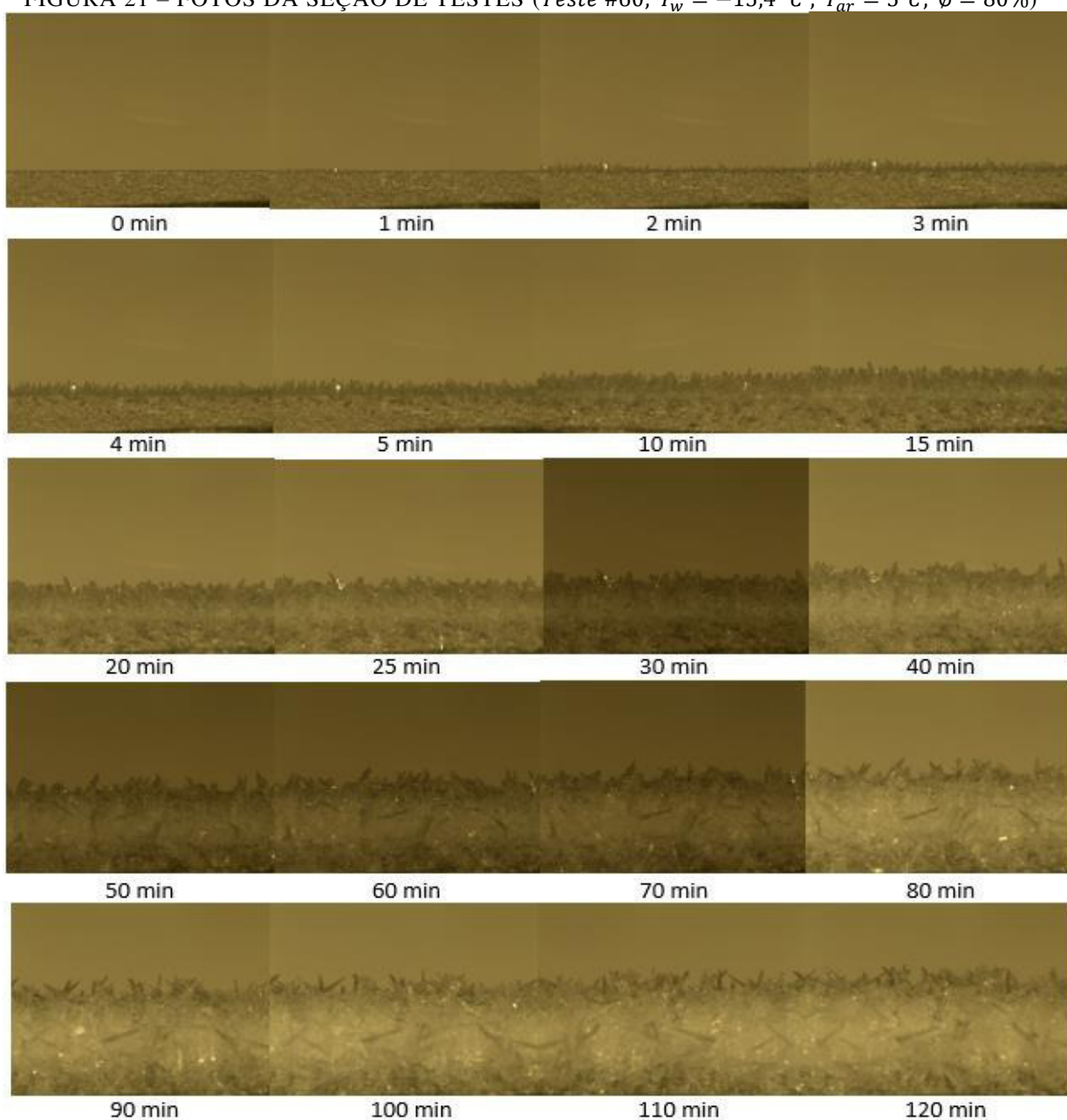
Observa-se na Figura 20 que a superfície de testes é fixada no bloco de alumínio, adicionalmente um termopar é engastado na superfície de testes de modo a medir a temperatura da superfície de teste.

FIGURA 20 – INSTRUMENTAÇÃO DA SEÇÃO DE TESTES.



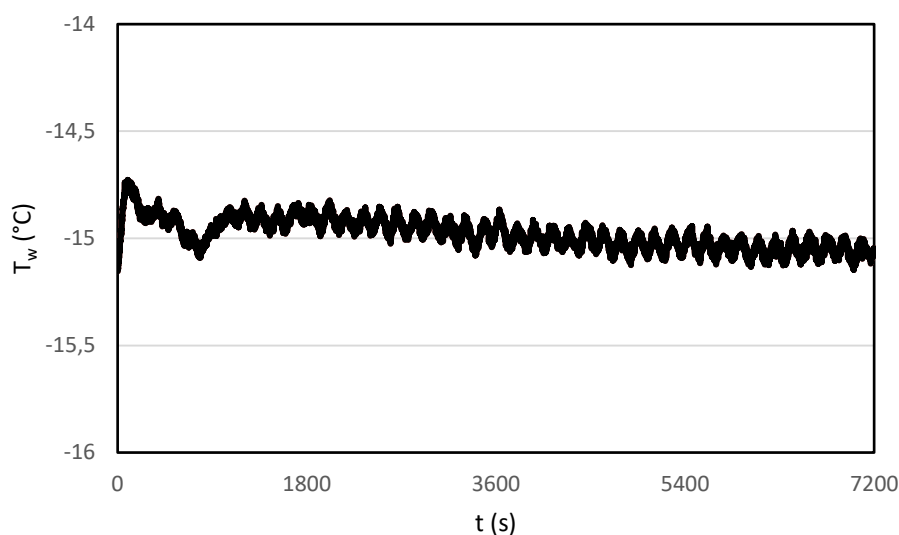
O sistema de aquisição de imagens, composto por um estéreo-microscópio instalado em uma janela quadrada de 220 mm de lado (cedida pelo POLO-UFSC, através do professor Melo), localizada na lateral da seção de teste do túnel de vento, é empregado para medir a espessura da geada com uma incerteza de 50 μm . Optou-se por um estéreo-microscópio modelo SMZ-745T da marca Nikon, com câmera de 3 megapixel, lente ocular de 10x, lente objetiva de 0,5x e iluminação através de fibra óptica. A janela empregada tem vidro triplo e é preenchida com argônio. A título de exemplo, a Figura 21 mostra a evolução da formação da geada ao longo de um teste de 120 min sobre a superfície padrão.

FIGURA 21 – FOTOS DA SEÇÃO DE TESTES (*Teste #60; $T_w = -15,4^\circ\text{C}$; $T_{ar} = 5^\circ\text{C}$; $\phi = 80\%$*)



Após as adaptações na bancada, os parâmetros de controle da temperatura de superfície, da umidade relativa do ar e da temperatura do ar foram ajustados, é possível verificar na Figura 22 a capacidade de controle e comportamento da temperatura da superfície ao longo de um teste com duas horas de duração.

FIGURA 22 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DE TESTE AO LONGO DE UM ENSAIO DE 120 MINUTOS (7200 SEGUNDOS).



As figuras 23 e 24 por sua vez, apresentam a variação da temperatura e umidade do ar na entrada da seção de teste, respectivamente.

FIGURA 23 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DO AR NA ENTRADA DA SEÇÃO DE TESTE AO LONGO DE UM ENSAIO DE 120 MINUTOS (7200 SEGUNDOS).

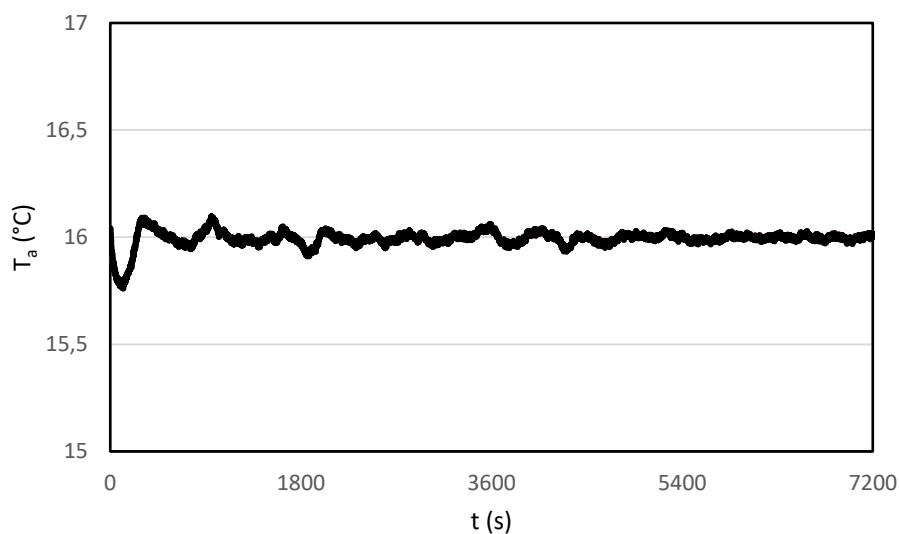
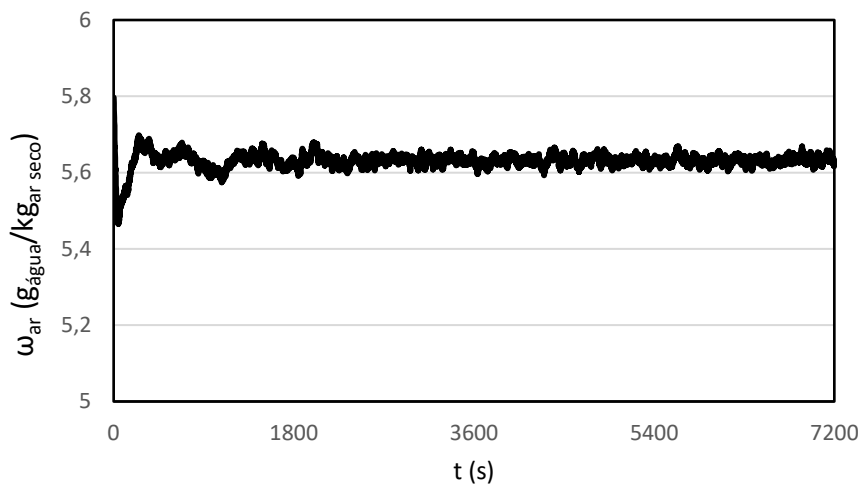


FIGURA 24 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA UMIDADE DO AR NA ENTRADA DA SEÇÃO DE TESTE LONGO DE UM ENSAIO DE 120 MINUTOS (7200 SEGUNDOS).



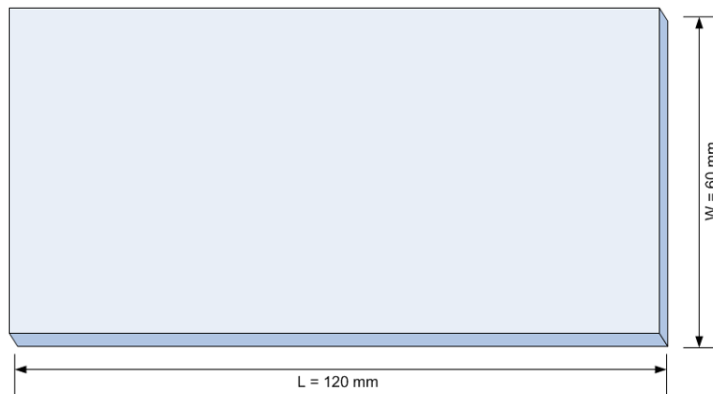
COMO APRESENTADO NAS

Figura 22, 23 e 24 considera-se que o controle dos parâmetros é adequado. A bancada foi adaptada e testada para operar em um amplo intervalo de condição de testes, com temperaturas do ar variando de -5°C a 22°C , umidade relativa de 30% a 80%, e temperatura de superfície de substrato com limite inferior de -23°C . Tais condições de operação cumprem os requisitos necessários para realização do trabalho experimental.

3.2 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

As amostras (superfícies de teste, Figura 25) para os experimentos possuem uma dimensão de 60 x 120 mm e espessura entre 6 e 9 mm.

FIGURA 25 – DIMENSÕES DAS AMOSTRAS.

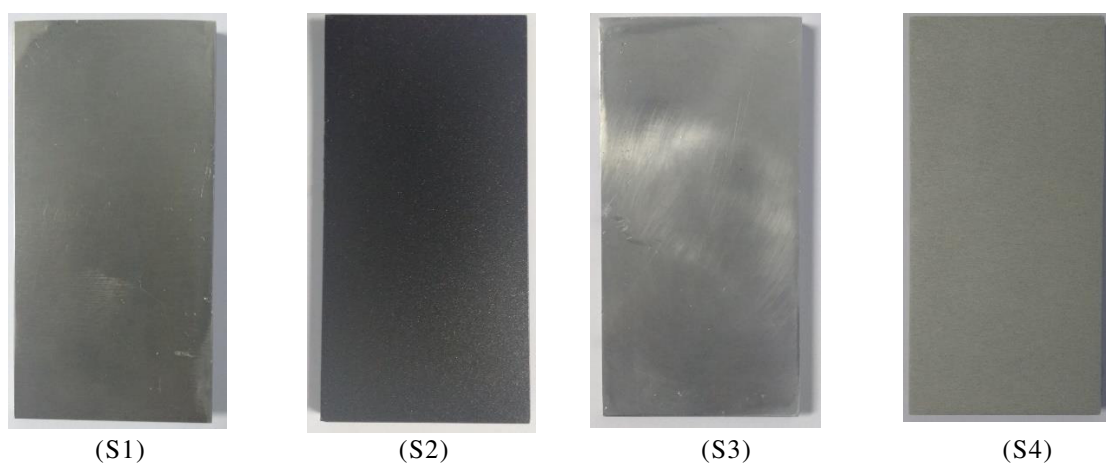


Foram preparadas quatro superfícies de teste, todas as amostras possuem substrato de alumínio e antes de serem tratadas foram preparadas com um lixamento fino com granulometria 1200.

A amostra padrão (S1) foi obtida a partir de lixamento sem nenhum tipo de tratamento posterior, a amostra (S2) foi revestida com uma camada de politetrafluoretileno, tal revestimento é conhecido por ser estável e possuir baixa energia superficial e um alto ângulo de contato a fim de obter um baixo ângulo de contato, a amostra (S3) foi polida e revestida com uma fina camada de sílica através do processo de deposição por plasma.

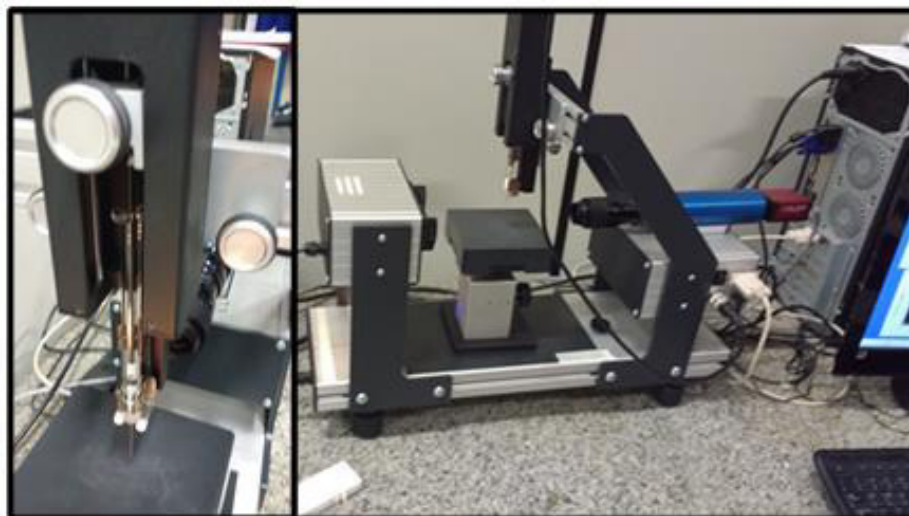
Por fim a amostra (S4) foi obtida após um tratamento químico que consiste em exposição por 5 minutos numa solução de água e hidróxido de sódio, seguido por um banho de 60 minutos em água em ebulição, este pré tratamento visa dar uma característica microscópica favorável a hidrofobicidade. Na sequência foi aplicado um revestimento nanométrico comercial (*nanoclean*), que permitiu obter uma superfície hidrofóbica estável, com uma medida de ângulo de contato maior do que a obtida através do revestimento com politetrafluoretileno, as amostras podem vistas na Figura 26.

FIGURA 26 –SUPERFÍCIES DE TESTE



A caracterização do ângulo de contato das superfícies de teste foi feita com um goniômetro modelo Drop Shape Analyzer DSA25, da marca KRUSS GmbH Germany, (Figura 27).

FIGURA 27 – EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA MEDIDA DO ÂNGULO DE CONTATO.



O volume e a velocidade de deposição da gota podem ser selecionados através do software de interface. Foram selecionados os valores de $5\ \mu\text{l}$ e $450\ \mu\text{l}/\text{min}$ respectivamente. A fim de obter o ângulo de contato dinâmico é efetuada uma aquisição de imagem por segundo, após um minuto que a gota foi depositada o ângulo de contato medido passa a ser considerado estático. Foram efetuadas 12 medidas para cada superfície antes e após os testes, sendo excluída a maior e a menor, com as 10 medidas restantes foi obtida a média e posteriormente calculada a incerteza da medição (em anexo), os resultados obtidos para todas as superfícies testadas são apresentados na Tabela 6.

FIGURA 28 – IMAGEM DE MEDIDA DE ÂNGULO DE CONTATO.

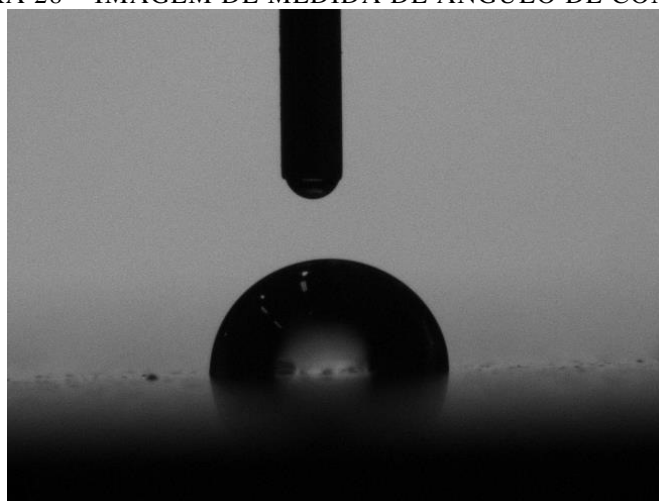


TABELA 6 – ÂNGULO DE CONTATO DAS AMOSTRAS (SUPERFÍCIES TESTADAS).

Amostra	$\theta(^{\circ})$
(S1) Padrão	$88 \pm 2,5$
(S2) Politetrafluoretileno	$108 \pm 2,5$
(S3) Hidrofílica	$60 \pm 2,5$
(S2) Hidrofóbica	$123 \pm 2,5$

A rugosidade da superfície foi medida com um microscópio confocal laser da marca Olympus, modelo LEXT OLS 4000, após a realização dos testes foram efetuadas três medidas de rugosidade para cada superfície, a Figura 29 apresenta as imagens ópticas enquanto a Tabela 7 apresenta os valores de rugosidade do tipo Ra (Ψ) com a incerteza associada.

FIGURA 29 – IMAGEM DE MEDIDA DE ÂNGULO DE CONTATO.

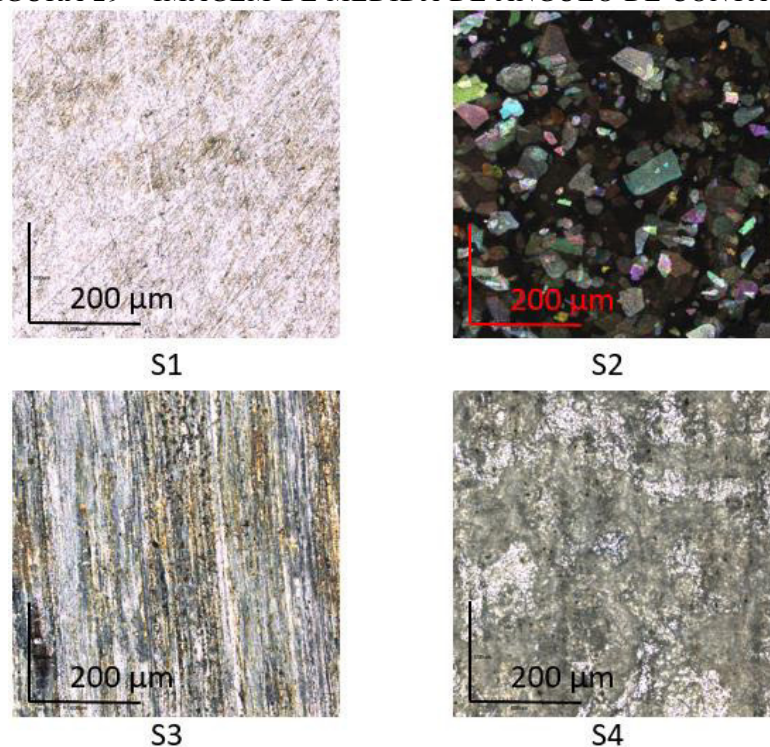


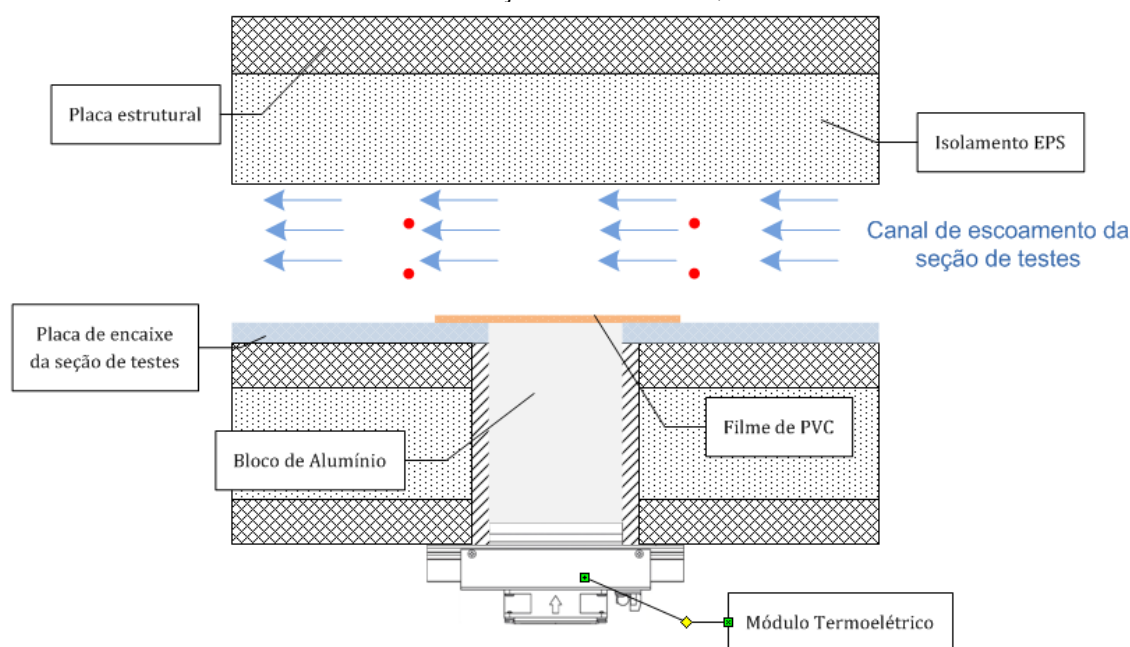
TABELA 7 – RUGOSIDADE DAS AMOSTRAS (SUPERFÍCIES TESTADAS).

Amostra	$\Psi(\mu\text{m})$
(S1) Padrão	$0,43 \pm 0,12$
(S2) Politetrafluoretileno	$1,73 \pm 0,06$
(S3) Hidrofílica	$0,51 \pm 0,12$
(S2) Hidrofóbica	$3,92 \pm 0,20$

3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Antes do ensaio, a bancada foi preparada para que, tanto o ar como a superfície da seção de testes, atinjam as condições desejadas. A fim de evitar a formação de geada sobre a superfície a ser ensaiada na seção de teste durante o período de estabilização das condições de teste da bancada, que dura em torno de 3h, foi utilizado um filme de PVC para proteção da superfície, que isola a seção de teste do fluxo de ar antes do início do experimento, evitando que a superfície da placa fria fique exposta à umidade, como mostrado na Figura 30.

FIGURA 30 – VISTA LATERAL DA SEÇÃO DE TESTES, ANTES DE INICIAR O TESTE.



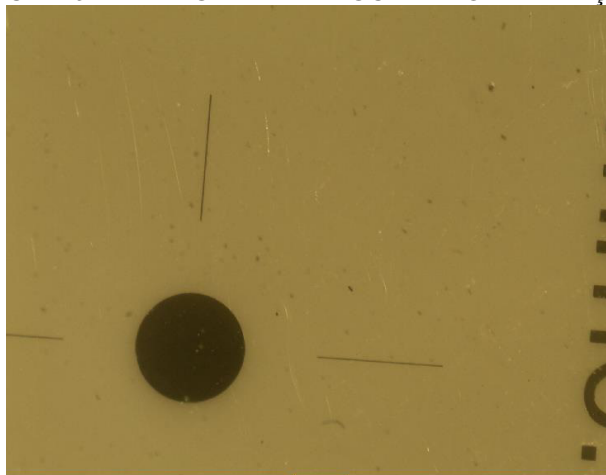
O teste só teve início após uma verificação das condições de velocidade, temperatura e umidade do ar na entrada da seção de testes, bem como a temperatura da superfície da placa fria, que deve alcançar a condição de estabilidade por ao menos 30 minutos antes do início teste.

Após a estabilização das condições de teste, a parte superior da seção de teste é aberta e o filme plástico é retirado para início do teste, esse processo dura aproximadamente 10 segundos.

Durante os testes, foram monitoradas e registradas a velocidade, a temperatura e a umidade do ar na entrada da seção de teste, bem como a temperatura da placa fria. Ao longo desse experimento, a seção de testes foi fotografada em intervalos de 1 minuto.

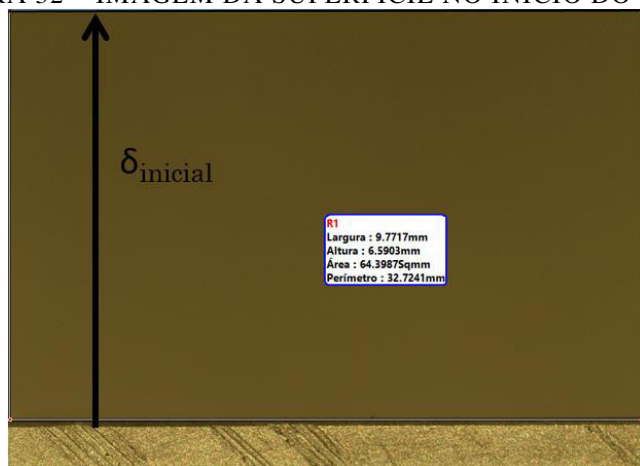
As imagens dos testes são processadas através do software Motic Images Plus 2.0 (MOTIC CHINA GROUP CO. LTD, 2013). Para todos os testes as dimensões das imagens são calibradas com auxílio de uma escala padrão (círculo de 0,75 mm), mostrada na Figura 31.

FIGURA 31 – IMAGEM DA RÉGUA DE CALIBRAÇÃO.



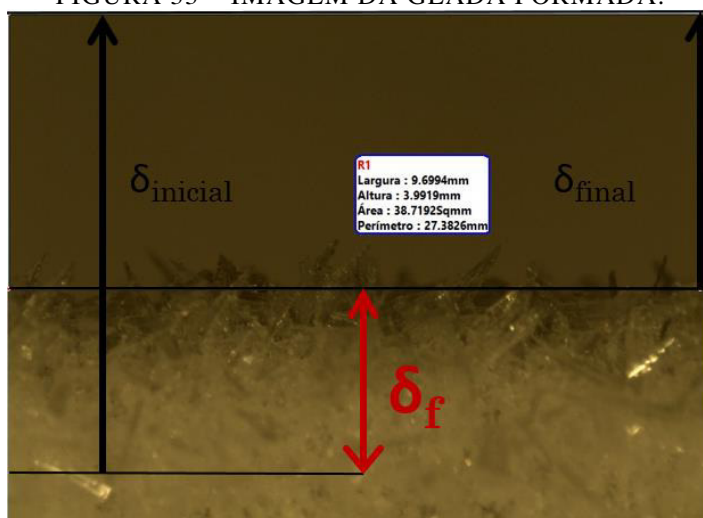
Após a retirada da película de PVC é medida a altura entre a superfície da placa e a parte superior da imagem, conforme a Figura 32

FIGURA 32 – IMAGEM DA SUPERFÍCIE NO INÍCIO DO TESTE.



A medida de espessura da camada de geada é realizada em intervalos de 10 minutos, devido a formação da geada na superfície da placa é conveniente adotar a parte superior da imagem como referência, a medição da espessura da camada de geada é realizada indiretamente pela diferença $\delta_f = \delta_{inicial} - \delta_{final}$, conforme a Figura 33.

FIGURA 33 – IMAGEM DA GEADA FORMADA.



3.4 PLANO DE TESTES

O plano de testes foi desenvolvido para contemplar a maior faixa possível de ângulo de contato, durante a seleção das amostras foi considerada a capacidade de a superfície manter o ângulo de contato antes e depois dos testes, as amostras estudadas foram avaliadas no intervalo $60^\circ < \theta < 123$, com valores intermediários de 88° e 108° .

As condições psicrométricas do ar e temperatura de superfície foram selecionadas de forma a reproduzir condições comumente presentes nas aplicações de refrigeração, considerando condições propícias à formação de diferentes morfologias de geada (Figura 8).

Afim de validar o modelo teórico experimental no maior intervalo de condições possível, foram testados intervalos abrangentes de super-resfriamento ($11^\circ\text{C} < \Delta T < 22^\circ\text{C}$), super-saturação ($3 g_{\text{água}}/kg_{\text{ar}} < \Delta \omega < 9 g_{\text{água}}/kg_{\text{ar}}$), número de Jakob modificado ($1 < \lambda < 2$), e velocidade ($1\text{m/s} < v < 2\text{m/s}$) A Tabela 8 representa de forma sucinta os parâmetros e níveis planejados para realização dos ensaios.

TABELA 8 – FATORES E NÍVEIS TESTADOS EXPERIMENTALMENTE.

θ (°)	T_w (°C)	T_a (°C)	ω_a (kg _{água} /kg _{ar})	v (m/s)
60	-10	5	0,004815	1
88	-15	10	0,006795	2
108	-20	16	0,01008	
123				

Foram realizados ao todo 69 testes com 120 minutos de duração, possibilitando adquirir 828 pontos experimentais. A tabela 9 traz um resumo das condições de teste ensaiadas, com as condições psicrométricas do ar, de superfície e parâmetros obtidos indiretamente.

TABELA 9 – CONDIÇÕES DE TESTE.

Teste	θ (°)	T_a (°C)	T_w (°C)	v (m/s)	ϕ (%)	λ	$\Delta\omega$ (kg _{água} /kg _{ar})	ΔT (K)
1	88	5,00	-9,6	0,97	80	1,38	0,0030	11,5
2	88	5,0	-14,9	1,07	80	1,63	0,0037	16,8
3	88	5,0	-21,0	1,01	80	1,96	0,0042	22,8
4	88	10,0	-9,8	0,87	80	1,19	0,0050	16,5
5	88	10,0	-15,2	1,07	80	1,38	0,0057	21,9
6	88	10,0	-21,5	0,98	80	1,63	0,0062	28,3
7	88	16,0	-9,2	1,00	80	0,96	0,0082	21,7
8	88	16,0	-15,1	0,94	80	1,11	0,0090	27,7
9	88	16,0	-14,1	0,92	80	1,08	0,0089	26,7
10	88	16,0	-14,3	0,93	80	1,08	0,0090	27,1
11	88	5,0	-19,5	0,92	50	2,42	0,0023	15,6
12	88	5,0	-20,1	0,92	50	2,47	0,0023	16,3
13	88	4,9	-9,8	1,82	80	1,39	0,0030	11,7
14	88	5,0	-15,8	1,80	80	1,67	0,0038	17,7
15	88	5,0	-20,1	1,84	80	1,90	0,0041	22,0
16	88	5,0	-20,6	1,83	80	1,93	0,0042	22,5
17	88	10,0	-10,3	1,86	80	1,20	0,0051	17,0
18	88	10,0	-15,1	1,81	80	1,38	0,0057	21,9
19	88	10,0	-19,7	1,81	80	1,56	0,0061	26,5
20	88	16,0	-9,8	1,83	80	0,97	0,0083	22,4
21	88	16,0	-14,9	1,85	80	1,10	0,0089	27,5
22	108	4,9	-10,9	1,04	80	1,43	0,0032	12,8
23	108	5,1	-15,5	1,05	80	1,66	0,0037	17,4
24	108	5,0	-20,2	1,05	80	1,91	0,0041	22,0
25	108	10,0	-10,3	1,07	80	1,20	0,0051	17,1
26	108	10,0	-14,6	1,09	80	1,36	0,0056	21,3
27	108	10,0	-19,5	1,02	80	1,55	0,0061	26,3
28	108	16,0	-10,3	1,05	80	0,98	0,0083	22,8
29	108	16,0	-12,5	1,17	80	1,04	0,0087	25,0
30	108	16,0	-15,6	1,03	80	1,12	0,0090	28,2
31	108	5,0	-10,2	1,85	80	1,40	0,0031	12,0
32	108	5,0	-15,1	1,86	80	1,64	0,0037	17,0
33	108	5,0	-20,2	1,83	80	1,91	0,0041	22,1
34	108	10,0	-10,1	1,86	80	1,20	0,0050	16,8
35	108	10,0	-14,1	1,86	80	1,34	0,0056	20,9
36	108	10,0	-19,1	1,86	80	1,53	0,0060	25,8

Tabela 9 – Condições de teste - Continuação

Teste	θ (°)	T_a (°C)	T_w (°C)	v (m/s)	Φ (%)	λ	$\Delta\omega$ (kg _{água} /kg _{ar})	ΔT (K)
37	108	16,0	-11,9	1,85	80	1,02	0,0086	24,4
38	108	16,0	-11,0	1,88	80	1,00	0,0084	23,5
39	108	16,0	-10,0	1,94	80	0,98	0,0083	22,6
40	108	16,0	-14,3	1,89	80	1,09	0,0089	26,9
41	60	5,0	-10,3	0,97	80	1,40	0,0031	12,2
42	60	5,0	-14,7	1,00	80	1,62	0,0037	16,6
43	60	5,0	-19,4	1,00	80	1,86	0,0041	21,3
44	60	10,0	-10,5	0,95	80	1,20	0,0052	17,5
45	60	10,0	-16,0	1,06	80	1,41	0,0058	22,8
46	60	10,0	-18,3	1,06	80	1,47	0,0062	25,6
47	60	16,0	-9,1	1,06	80	0,95	0,0082	21,7
48	60	16,0	-14,3	1,07	80	1,09	0,0089	26,9
49	60	5,0	-10,7	1,75	80	1,43	0,0031	12,6
50	60	5,0	-15,4	1,74	80	1,65	0,0037	17,3
51	60	5,1	-17,7	1,76	80	1,77	0,0039	19,6
52	60	5,1	-18,0	1,76	80	1,79	0,0040	19,9
53	60	10,0	-10,6	1,76	80	1,21	0,0051	17,4
54	60	10,0	-13,3	1,84	80	1,31	0,0055	20,1
55	60	10,0	-15,5	1,85	80	1,39	0,0057	22,2
56	60	10,0	-17,1	1,72	80	1,45	0,0059	23,9
57	60	16,0	-11,5	1,78	80	1,01	0,0085	24,1
58	60	16,0	-14,5	1,79	80	1,09	0,0089	27,1
59	123	5,0	-9,9	1,12	80	1,39	0,0030	11,8
60	123	5,0	-15,4	1,16	80	1,65	0,0037	17,3
61	123	10,0	-10,5	1,13	80	1,21	0,0051	17,2
62	123	10,0	-15,0	1,14	80	1,37	0,0057	21,7
63	123	16,0	-10,8	1,13	80	1,00	0,0084	23,4
64	123	5,0	-9,4	1,87	80	1,37	0,0029	11,3
65	123	5,0	-15,5	1,87	80	1,66	0,0037	17,4
66	123	10,0	-10,4	1,92	80	1,21	0,0051	17,1
67	123	10,0	-15,3	1,89	80	1,39	0,0057	22,1
68	123	16,0	-9,4	1,92	80	0,96	0,0082	21,9
69	123	16,0	-13,2	1,92	80	1,06	0,0087	25,7

4 RESULTADOS

O presente capítulo foi dividido em três partes, Na primeira, são apresentados os resultados experimentais de cada uma das 69 condições de teste descritas no capítulo anterior, bem como uma análise de sensibilidade das condições de teste sobre as variáveis resposta, no caso, a taxa de crescimento da geada, Na segunda parte, é proposto um modelo semi-empírico, com base no trabalho de Hermes et al, (2017) e nos dados experimentais obtidos no presente trabalho, Por fim, na parte final, o modelo matemático é utilizado, através de uma análise de sensibilidade, para melhorar o entendimento das relações de causa e consequência das condições de operação sobre o crescimento de uma camada de geada,

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A partir da função semi-empírica baseada na linearização do modelo de Hermes et al, (2017) apresentado no Cap, 2 eq. 2.29, considerando que as condições de teste são mantidas constantes (i.e. $a \left(\frac{\rho_a}{\rho_i} \right) \left(\frac{D_a \Delta \omega}{L} \right) \text{Re}^m \text{Pr}^{1/3} \lambda^n \approx cte$), o crescimento da camada de geada segue a equação

$$\delta \sqrt{t} = at + b \quad (4.1)$$

Os resultados experimentais estão sumarizados na Tabela 9 na forma dos coeficientes a e b ajustados para cada condição de teste, cada qual compreende 12 pontos experimentais com dados da espessura da camada de geada δ ao longo do tempo.

Observa-se que tal equação fornece um comportamento linear de $\delta \sqrt{t}$ em função do tempo, A variância do ajuste também é apresentada na Tab, 9 para cada condição de teste, onde se pode observar valores de R^2 acima de 0,99 para a ampla maioria (68 das 69 das condições de teste), confirmando a linearidade entre δ e $\sqrt{t}$ esperada dos dados experimentais já que se trata de um problema difusivo dominante,

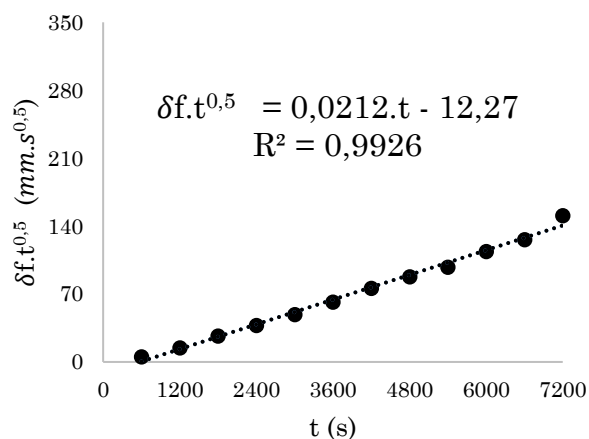
TABELA 10 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS,

Nº	a	b	R²	Nº	a	b	R²	Nº	a	b	R²
1	0,0212	-12,27	0,993	24	0,0360	-7,49	0,998	47	0,0337	3,31	0,999
2	0,0333	-6,13	0,999	25	0,0306	-8,62	0,997	48	0,0432	4,32	0,999
3	0,0390	2,74	0,999	26	0,0373	-5,08	0,999	49	0,0260	-7,50	0,999
4	0,0289	-3,14	0,996	27	0,0404	3,65	0,999	50	0,0345	-6,13	0,999
5	0,0402	-4,86	0,999	28	0,0351	0,14	0,999	51	0,0343	-0,78	0,999
6	0,0453	-2,30	0,999	29	0,0396	4,76	1,000	52	0,0376	0,27	0,999
7	0,0342	0,18	1,000	30	0,0438	2,02	1,000	53	0,0347	-10,45	0,999
8	0,0466	7,27	0,997	31	0,0272	-13,16	0,999	54	0,0375	-4,96	1,000
9	0,0431	3,89	1,000	32	0,0331	-4,58	0,998	55	0,0412	2,39	1,000
10	0,0424	10,09	0,999	33	0,0363	-0,29	1,000	56	0,0426	2,07	1,000
11	0,0240	-2,58	1,000	34	0,0343	-5,69	1,000	57	0,0342	6,89	0,999
12	0,0198	-17,15	0,986	35	0,0382	-3,97	1,000	58	0,0392	11,87	0,998
13	0,0265	-11,24	0,999	36	0,0455	0,53	1,000	59	0,0236	-13,74	0,998
14	0,0333	1,50	0,999	37	0,0355	11,30	0,998	60	0,0327	-3,04	1,000
15	0,0388	-0,76	1,000	38	0,0323	9,85	0,999	61	0,0350	-15,78	0,999
16	0,0392	0,11	0,999	39	0,0332	8,00	0,999	62	0,0377	2,80	0,997
17	0,0361	-6,33	1,000	40	0,0376	10,25	0,999	63	0,0368	3,33	0,999
18	0,0402	-0,29	1,000	41	0,0232	-15,37	0,994	64	0,0256	-4,62	0,998
19	0,0430	3,60	1,000	42	0,0275	-3,98	0,998	65	0,0353	-1,13	1,000
20	0,0327	3,82	1,000	43	0,0356	-1,97	0,999	66	0,0335	1,67	0,999
21	0,0376	9,53	0,998	44	0,0360	-17,98	0,999	67	0,0403	2,87	1,000
22	0,0221	-16,44	0,992	45	0,0437	-0,86	0,998	68	0,0297	6,49	0,999
23	0,0296	-5,72	0,998	46	0,0474	-2,37	0,999	69	0,0384	10,05	0,998

O Apêndice A apresenta os valores dos pontos experimentais para a espessura da geada em função do tempo para cada uma das 69 condições de teste, a fim de identificar a exposição dos dados, um dos testes (#1) é apresentado na Tabela 11.

TABELA 11 – CONDIÇÕES DE TESTE E EVOLUÇÃO DO CRESCIMENTO DA GEADA

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,04	0,00482	4,95	-9,67	0,211
1200	1,03	0,00481	5,00	-9,65	0,422
1800	1,02	0,00482	5,00	-9,62	0,633
2400	1,01	0,00482	4,99	-9,58	0,769
3000	1,00	0,00482	5,02	-9,63	0,889
3600	0,99	0,00482	4,99	-9,63	1,029
4200	0,97	0,00481	5,00	-9,63	1,169
4800	0,96	0,00481	5,01	-9,54	1,269
5400	0,94	0,00482	5,01	-9,55	1,33
6000	0,92	0,00482	4,99	-9,58	1,47
6600	0,90	0,00482	5,02	-9,54	1,55
7200	0,88	0,00482	5,01	-9,54	1,777

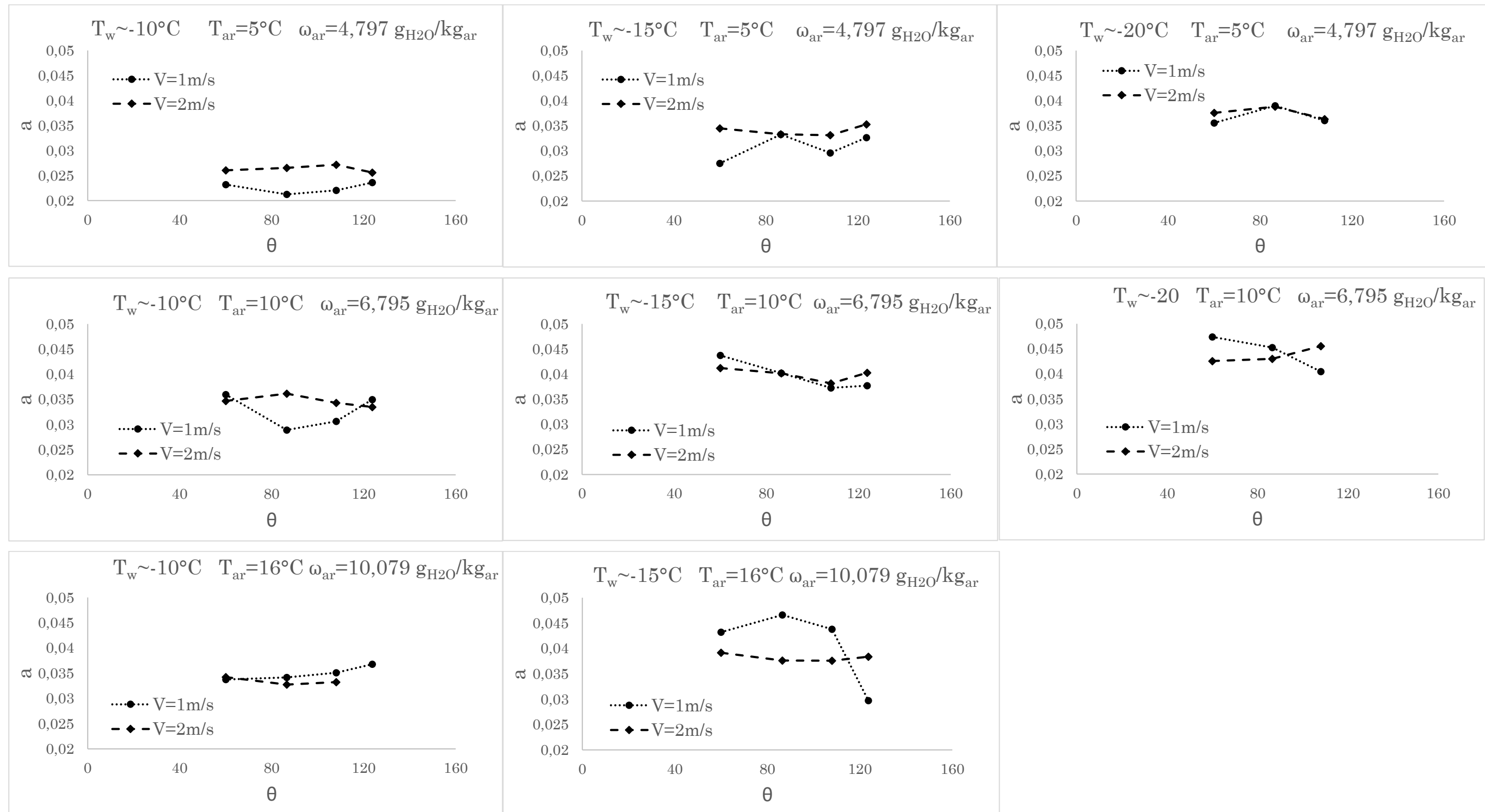
Teste # 1

O gráfico associado a Tabela 11 permite observar a variação linear de $\delta_f \sqrt{t}$ no tempo, bem como a qualidade do ajuste para a que. 4.1. No Apêndice A observa-se que os testes #12, #22 e #64 apresentaram tendências não-lineares, o que foi associado a erros experimentais, tendo sido descartados não só da análise dos dados mas também do exercício de ajuste do modelo,

Uma vez que apenas o teste #12 não apresentou $R^2 > 0,99$, a análise dos dados pode ser realizada com base nos coeficientes a e b da equação (4.1), o primeiro (coeficiente angular) indicando a taxa de crescimento de geada e o segundo (coeficiente linear) informando a condição inicial do processo, respectivamente.

A Fig. 34 sumariza os resultados obtidos para o coeficiente “a” em função das condições de operação, Os gráficos foram dispostos na forma matricial, de modo a facilitar as comparações, no sentido horizontal podemos observar a variação do coeficiente “a” com a mudança de temperatura de superfície, enquanto no sentido vertical os efeitos de super-resfriamento ou supersaturação são objetos da análise.

Em geral, percebe-se pouca influência do ângulo de contato e da velocidade sobre a taxa de crescimento, já que as variações apresentadas nos gráficos estão todas dentro do intervalo de incertezas de medição, há perceptível influência da umidade do ar e da temperatura do substrato, cujas variações promovem diferenças na ordem de 10-20% na taxa de crescimento da geada.

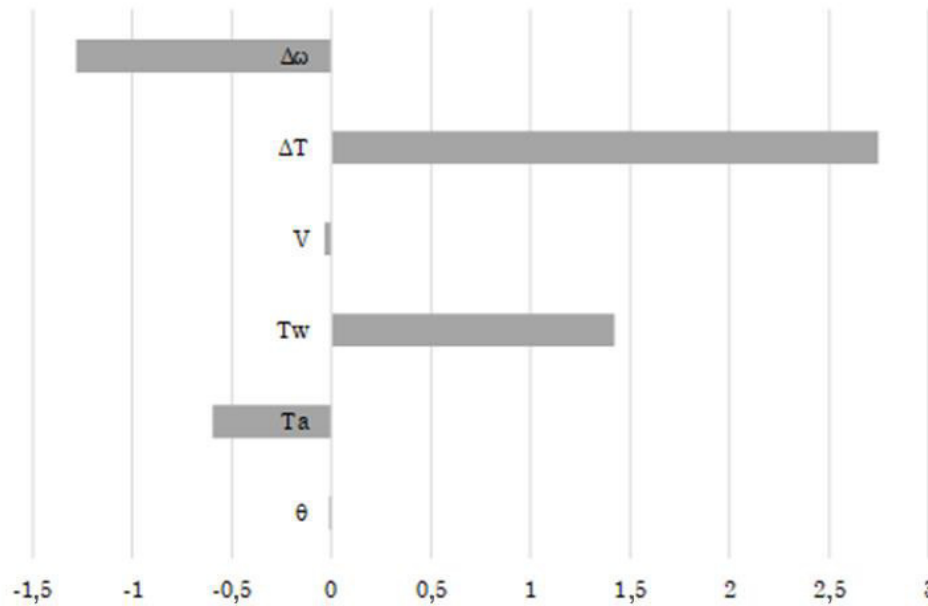
FIGURA 34 – ANÁLISE DE VARIABILIDADE DO COEFICIENTE α EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Uma adimensionalização dos dados a partir da seguinte expressão (MONTGOMERY et al, 2009),

$$\tilde{y} = \frac{y - \frac{y_{max} + y_{min}}{2}}{\frac{y_{max} - y_{min}}{2}} \quad (4.2)$$

onde $\tilde{y}$ indica o valor adimensional, variando no intervalo $[-1,1]$, e y_{max} e y_{min} os extremos do intervalo, seguida de um ajuste linear em função dos efeitos de 1ª ordem das condições de operação, acrescidas aqui do grau de super-resfriamento, $\Delta T = T_{dp} - T_w$, e do grau de supersaturação, $\Delta \omega = \omega_{ar} - \omega_{sat}(T_w)$, revelou os coeficientes de sensibilidade mostrados na Figura 35, Deve-se notar que os coeficientes maiores que a unidade (ou menores que -1) se devem à estrutura de confundimento do ajuste, já que a análise se limitou aos termos de 1ª ordem,

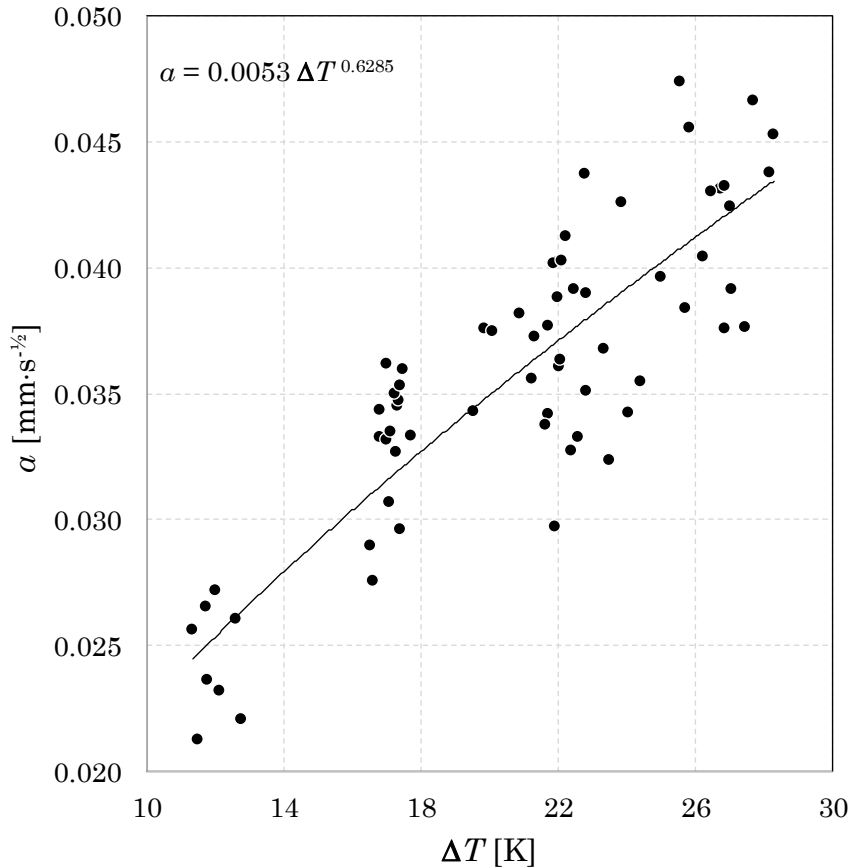
FIGURA 35 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO COEFICIENTE a EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO



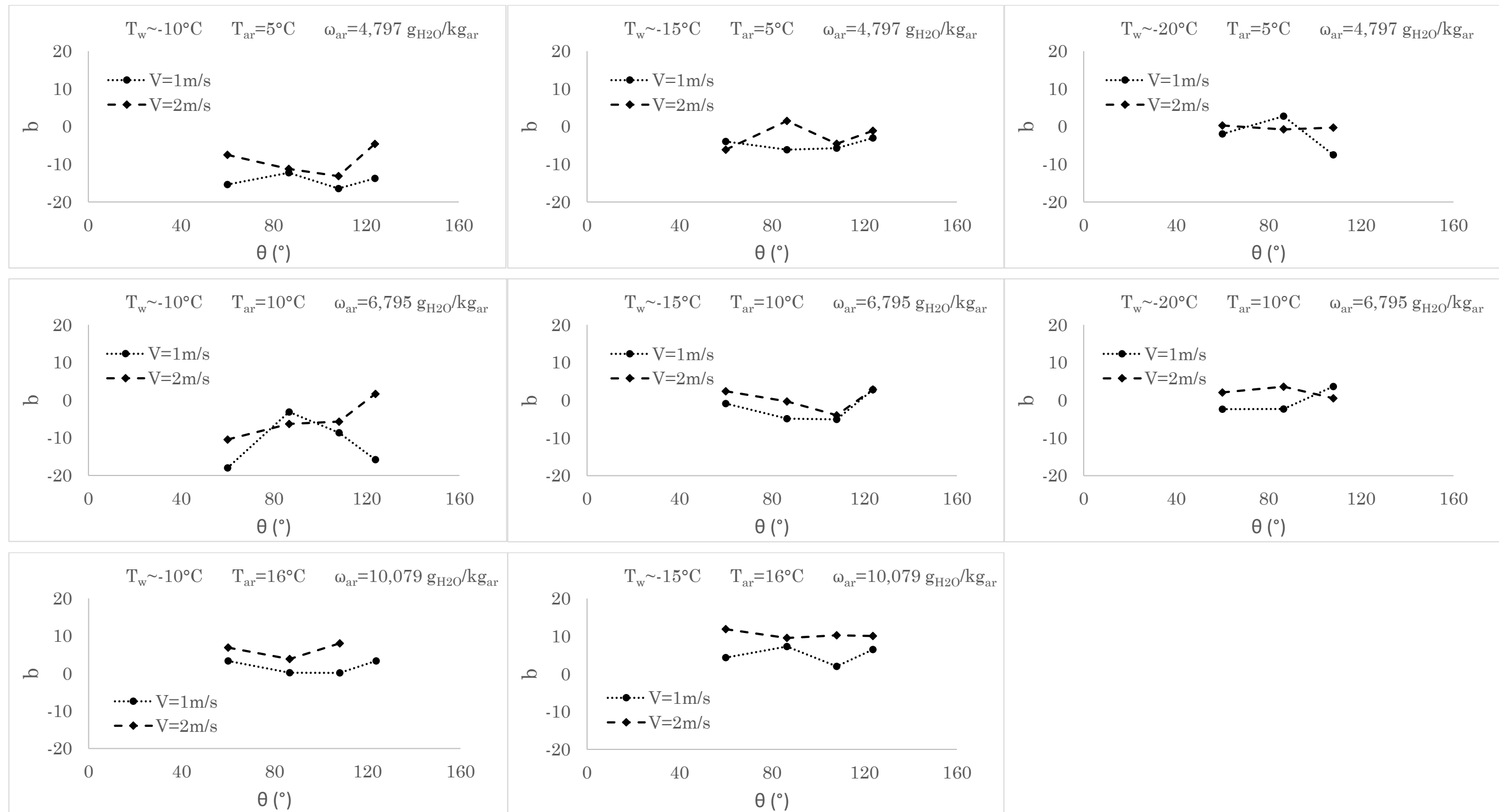
Verifica-se na Figura 35 uma grande influência do grau de super-resfriamento, seguido da influência moderada da temperatura da superfície e do grau de super-saturação, A análise de sensibilidade confirmou as observações anteriores de que tanto a velocidade como o ângulo de contato apresentaram uma fraca influência sobre a taxa de crescimento, A Figura 36 explora a variação de a com o grau de super-resfriamento, onde se observa um espalhamento dos dados

com uma tendência que segue, em linhas gerais, uma lei de potência, o espalhamento na vertical se dá devido ao efeito de velocidade e temperatura de superfície. Tais informações serão importantes na redução do modelo matemático, realizado na 2ª parte do capítulo,

FIGURA 36 – VARIAÇÃO DE α COM O GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO ΔT

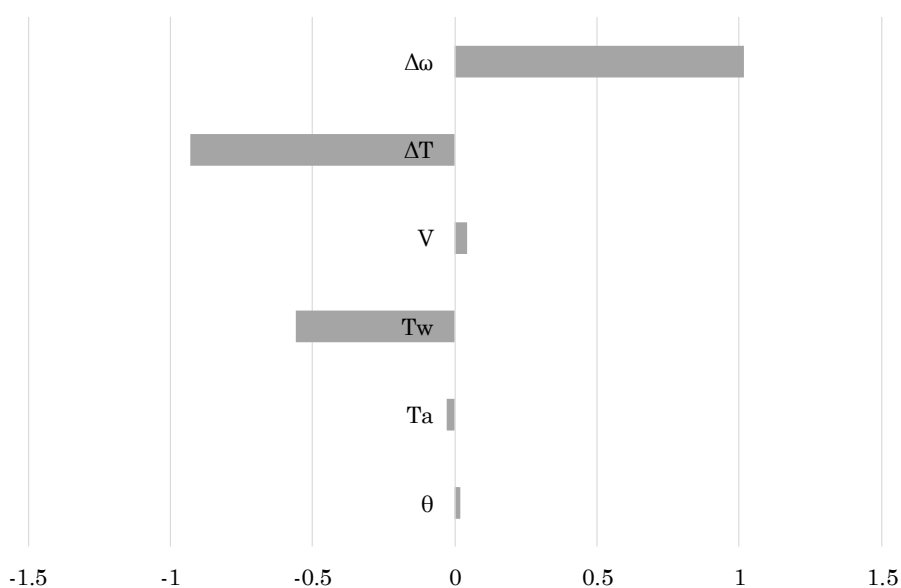


Uma análise semelhante foi conduzida para o coeficiente b , A Figura 37 sumariza os resultados obtidos para o coeficiente b em função das condições de operação, Novamente, percebe-se pouca influência do ângulo de contato e da velocidade sobre o parâmetro b , já que as variações apresentadas nos gráficos estão todas dentro do intervalo de incertezas de medição, Há perceptível influência da umidade do ar e da temperatura do substrato, cujas variações chegam a afetar o sinal do coeficiente b , Tais resultados são confirmados pela análise de sensibilidade reportada na Figura 38, em que os graus de super-saturação e de super-resfriamento se mostraram os parâmetros mais influentes, seguidos da temperatura da superfície, com efeitos moderados, e da velocidade e do ângulo de contato, ambos com fraca influência,

FIGURA 37 – ANÁLISE DE VARIABILIDADE DO COEFICIENTE b EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Os efeitos de mesma ordem dos graus de super-saturação e de super-resfriamento, Figura 38, os quais exercem papéis equivalentes sobre o processo de nucleação (Piucco et al., 2008), devem-se ao fato de que o parâmetro b carrega consigo informações do processo de nucleação, já que é oriundo da condição inicial do problema (Hermes et al., 2017),

FIGURA 38 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO COEFICIENTE b EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO



A Figura 39 mostra a variação de b com o grau de super-resfriamento, onde se observa um espalhamento dos dados com uma tendência, em linhas gerais, linear. Verifica-se na Figura 39 tanto valores positivos como negativos para o coeficiente b . Os primeiros podem ser associados a uma nucleação precoce, antes do início da contagem do tempo de teste, que ocorre pela presença de ar úmido entre a superfície resfriada e o filme plástico que é removido no tempo $t = 0$. Uma vez que a nucleação já ocorreu para $t < 0$, observa-se para $t = 0$ uma espessura δ_f positiva, como mostra a Figura 40. No caso de $b < 0$, por outro lado, verifica-se uma nucleação tardia (ou um atraso no processo de nucleação), já que valores positivos de δ_f são encontrados apenas para $t > 0$, como ilustra a Figura 40.

Novamente na Figura 39, observa-se a mudança de sinal de b para um grau de super-resfriamento de 22 K, abaixo do qual se tem um atraso na nucleação e acima do qual são observados valores positivos de b , com nucleação antes do início da cronometragem do teste. Nesta figura, os ângulos de contato são representados por diferentes cores, permitindo verificar uma distribuição praticamente aleatória do ângulo de contato, sem predominância da superfície

hidrofóbica (123° , amarela) na região onde houve atraso na nucleação ($b < 0$) e sem predominância da hidrofílica (60° , azul) na região onde houve nucleação precoce ($b > 0$),

O espalhamento dos pontos ao longo de uma ampla faixa de graus de super-resfriamento é um indicativo de que as superfícies testadas não influenciaram o processo de nucleação nem tampouco o processo de crescimento da geada, como mostra a Figura 36. Uma possível explicação ao fato de que a esperada influência do ângulo de contato não tenha sido observada pode estar na rugosidade da superfície, já que superfícies rugosas geram sítios propícios para a nucleação, sobressaindo-se ao efeito do ângulo de contato,

FIGURA 39 – VARIAÇÃO DE b COM O GRAU DE SUPER-REFRIAMENTO

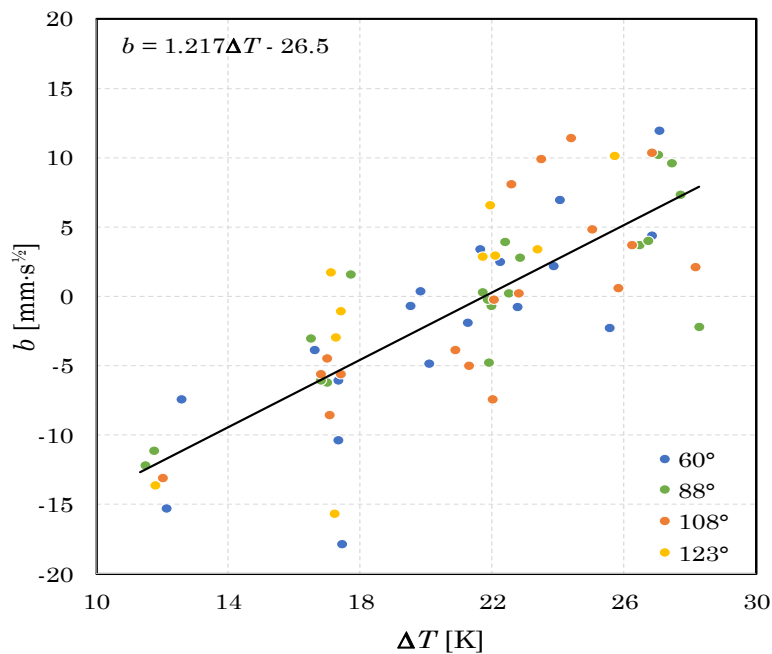
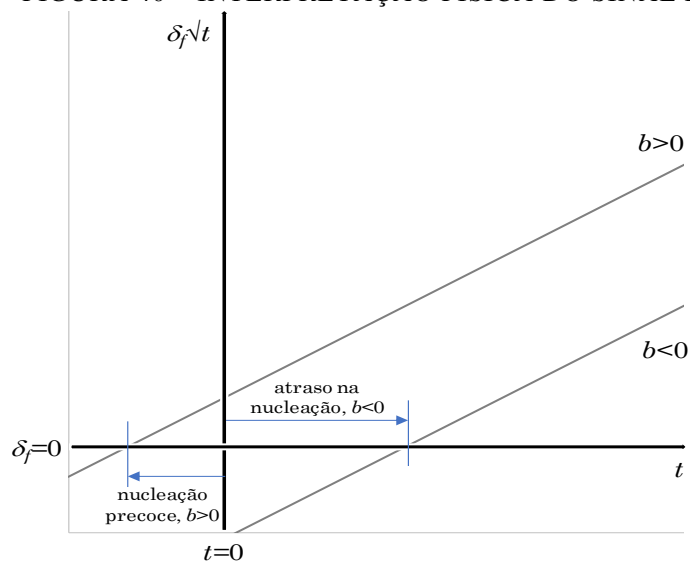


FIGURA 40 – INTERPRETAÇÃO FÍSICA DO SINAL DO COEFICIENTE b



4.2 AJUSTE DO MODELO

O modelo proposto e validado por Hermes et al, (2017) para crescimento de geada em superfícies hidrofílicas e hidrofóbicas em condições de convecção natural, descrito no cap, 2, foi empregado no presente trabalho, Em geral, a curva a ser ajustada possui a seguinte forma (Hermes et al., 2017):

$$\delta(t) = c_1 \left(\frac{\rho_a}{\rho_i} \right) \left(\frac{D_a \Delta \omega}{L} \right) \text{Re}^m \text{Pr}^{1/3} \lambda^n \sqrt{t} + \frac{c_2 e^{k\theta}}{\sqrt{t}} \quad (4.3)$$

onde os coeficientes c_1 e c_2 , e os expoentes m , n e k devem ser ajustados contra dados experimentais, totalizando-se 5 coeficientes ao todo, É válido comentar que a forma do numerador do termo da direita foi escolhida devido à dependência da espessura da camada da geada com o ângulo de contato da superfície, principalmente nos tempos menores (Hermes et al., 2017),

O exercício de ajuste foi conduzido através do método dos mínimos quadrados, utilizando 66 condições de teste com 12 pontos experimentais cada (até 7200s com passo de 600s), sendo que a função objetiva S a ser minimizada é dada por:

$$S = \sum_{i=1}^{N=792} \left(1 - \frac{y_{i,calc}}{y_{i,exp}} \right)^2 \quad (4.4)$$

A minimização foi conduzida através do método do gradiente reduzido generalizado (GRG) de Lasdon et al, (1978),

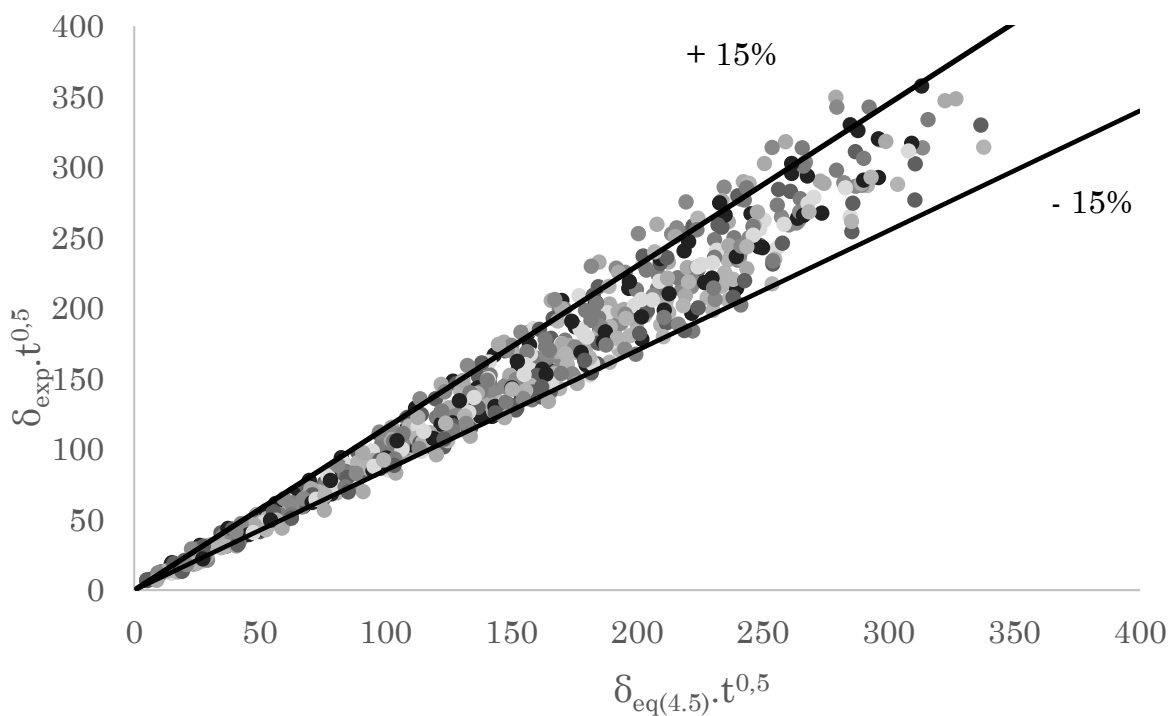
Primeiramente, a regressão numérica da equação (4.4) foi realizada para cada uma das quatro superfícies individualmente, de tal maneira que como não há variação no ângulo de contato da superfície (θ), o termo $e^{k\theta}$ é considerado constante ($k=0,023$), adicionalmente, o termo $\text{Pr}^{1/3}$ foi incorporado pelo parâmetro c_1 , logo, o numerador do segundo termo da equação é dado somente por $c_2/\sqrt{t}$.

Optou-se então pelo ajuste simultâneo de todo conjunto de dados usando a forma completa da eq, (4.4), que assumiu a seguinte forma após o ajuste:

$$\delta(t) = 5,73 \cdot 10^6 \left(\frac{\rho_a}{\rho_i} \right) \left(\frac{D_a \Delta \omega}{L} \right) \text{Re}^{0,134} \lambda^{1,155} \sqrt{t} - \frac{4,95 e^{0,023 \cdot \theta}}{\sqrt{t}} \quad (4.5)$$

cujos resultados são mostrados na Figura 41, que compara os valores calculados de $\delta_f \sqrt{t}$ com os experimentais, Verifica-se que a ampla maioria dos pontos experimentais se situa na banda de erro de $\pm 15\%$, com apenas 131 pontos de 792 (17%) fora dessa faixa,

FIGURA 41 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CALCULADOS ATRAVÉS DA EQ. (4.5) – MODELO COM 5 COEFICIENTES



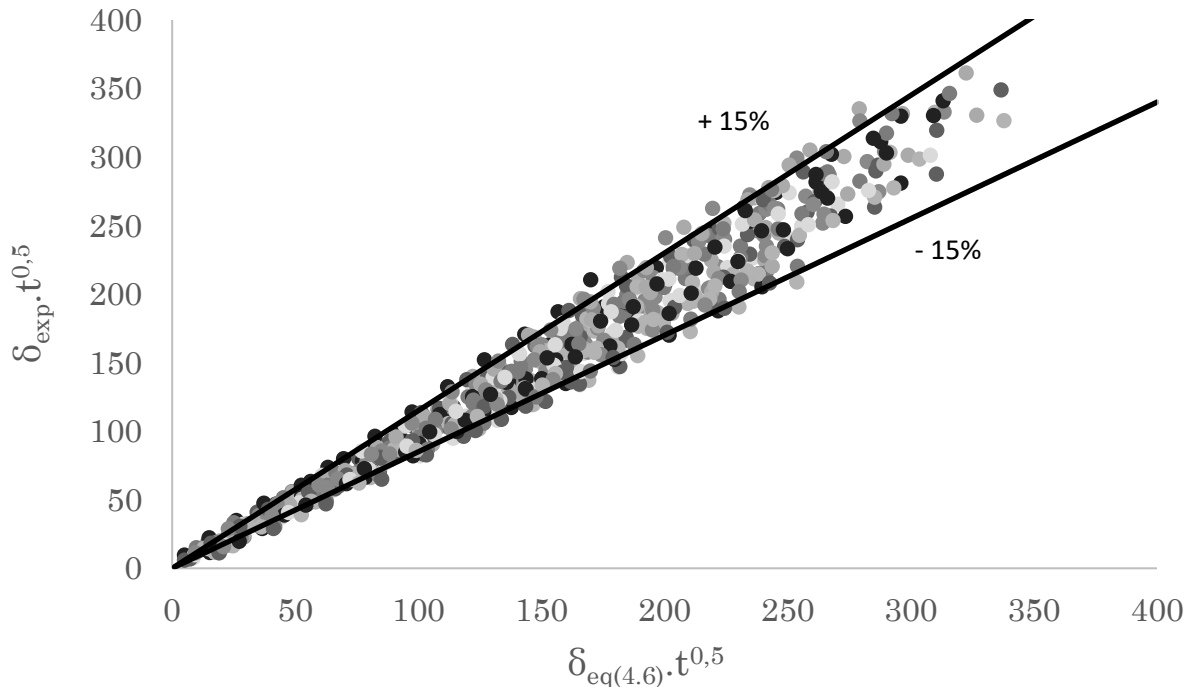
Após o processo de minimização, obteve-se $S=8,351$, enquanto os coeficientes podem ser vistos na eq. (4.5) acima, Verifica-se que, entre os testes, valores iniciais de velocidade do escoamento do ar variaram entre 1 a 2 m/s, o que representa números de Reynolds para placa plana entre 10000 e 20000, que categorizam o escoamento como laminar, Contudo, obteve-se $m = 0,134 \ll 0,5$, que seria esperado para um escoamento laminar, Dada a estreita faixa de velocidades testadas, optou-se por remover o número de Reynolds do ajuste,

Observa-se ainda um valor muito baixo para o coeficiente do ângulo de contato (0,0023), sugerindo que $e^{k\theta} \approx k\theta$, Em adição, dada a fraca variação do termo $D_a(\rho_a/\rho_i)$ nas temperaturas testadas, optou-se por embutir este termo no coeficiente $c1$ juntamente com o termo L^{-1} , já que apenas uma geometria de placa foi avaliada, Assim, apenas 3 coeficientes

necessitam de ajuste: n , c_1 e c_2 (resultados apresentados na Figura 42), Após o ajuste que retornou $S=10,308$, o novo modelo assumiu a seguinte forma,

$$\delta(t) = 4,65\Delta\omega\lambda^{1,14}\sqrt{t} - \frac{2,73 \cdot \theta}{\sqrt{t}} \quad (4.6)$$

FIGURA 42 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CALCULADOS ATRAVÉS DA EQ. (4.6) – MODELO COM 3 COEFICIENTES



Embora ambos os modelos com 3 e 5 coeficientes tenham apresentado resultados satisfatórios em termos de previsão dos dados experimentais, verifica-se que nenhum deles é capaz de captar a mudança de sinal no 2º termo do lado direito da equação (coeficiente b), Assim, para este propósito, fez-se uso da variação do coeficiente b com o grau de supersaturação mostrada na Fig, 44, de tal forma que o coeficiente c_2 foi substituído por uma função linear de ΔT , Em adição, verifica-se nas eqs, (4.5 e 4.6) que os expoentes obtidos para os números de Jakob são pequenos, da ordem da unidade (1,155 para o modelo de 5 coeficientes e 1,14 para o de 3 coeficientes), Note que,

$$\Delta\omega\lambda^n = \Delta\omega \left(\frac{c_p}{i_{sv}} \frac{\Delta T}{\Delta\omega} \right)^n = \left(\frac{c_p}{i_{sv}} \right)^n \frac{\Delta T^n}{\Delta\omega^{n-1}} \Rightarrow \lim_{n \rightarrow 1} \Delta\omega\lambda^n = c\Delta T^n \quad (4.7)$$

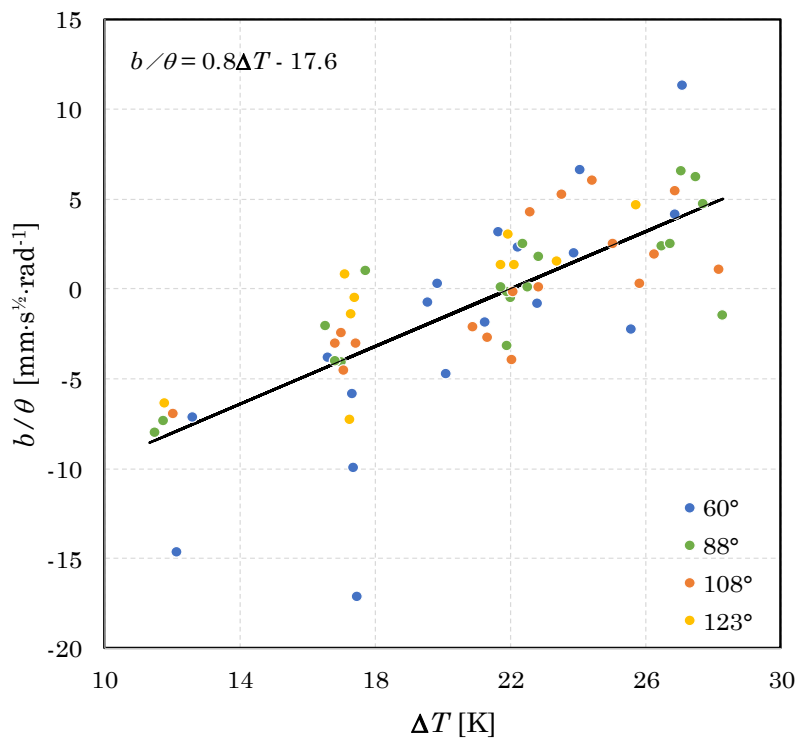
Assim, o novo modelo assumiu a seguinte forma,

$$\delta(t) = c_1 \Delta T^n \sqrt{t} + \frac{(c_3 + c_4 \Delta T) \theta}{\sqrt{t}} \quad (4.8)$$

onde apenas 4 parâmetros necessitam de ajuste: n , c_1 , c_3 e c_4 . Repare que o 1º termo do lado direito da equação representa o comportamento descrito para o coeficiente a na Figura 36, enquanto o 2º termo reflete o comportamento do coeficiente b descrito na Figura 39, reajustando os dados da tabela 10 para b/θ , obtém-se a curva representada na Figura 43. A inspeção das Figura 36 e Figura 43 sugere os seguintes valores: $n=0,6285$, $c_1=0,0053$, $c_3=-17,6$ e $c_4=0,8$, que retornam $S=13,653$ para a função objetiva, valor significativamente superior aos obtidos anteriormente. Um novo ajuste da eq. (4.8) fornece $S=8,933$ para $n=5/6$, $c_1=0,00285$, $c_3=-8,5$ e $c_4=1/3$, sendo este o ajuste semi-empírico que melhor representou os dados experimentais. O modelo, em sua forma final, é dado por:

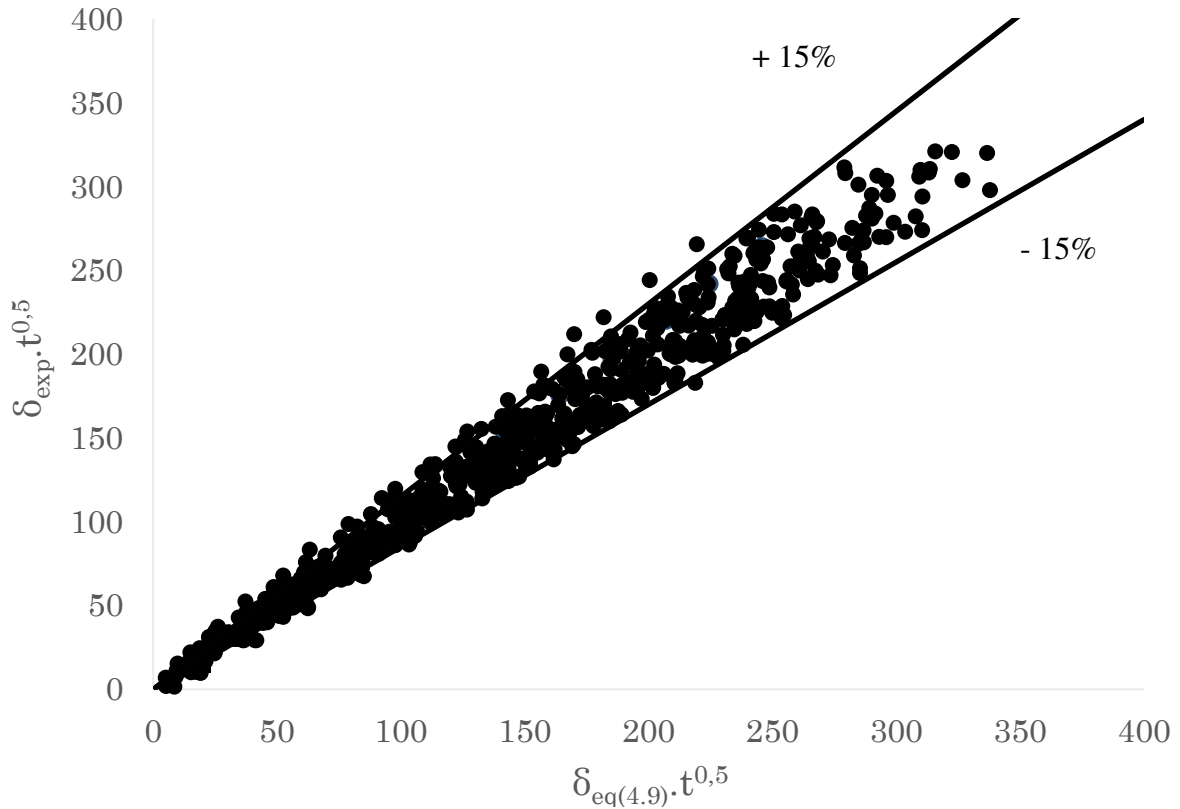
$$\delta(t) = 0,00285 \Delta T^{5/6} \sqrt{t} - \frac{(8,5 - \Delta T/3) \theta}{\sqrt{t}} \quad (4.9)$$

FIGURA 43 – VARIAÇÃO DE b/θ COM O GRAU DE SUPER-AQUECIMENTO



A Figura 44 compara os resultados do modelo com os dados experimentais, onde se pode observar uma boa concordância, com 694 de 792 pontos (88%) dentro da banda de $\pm 15\%$,

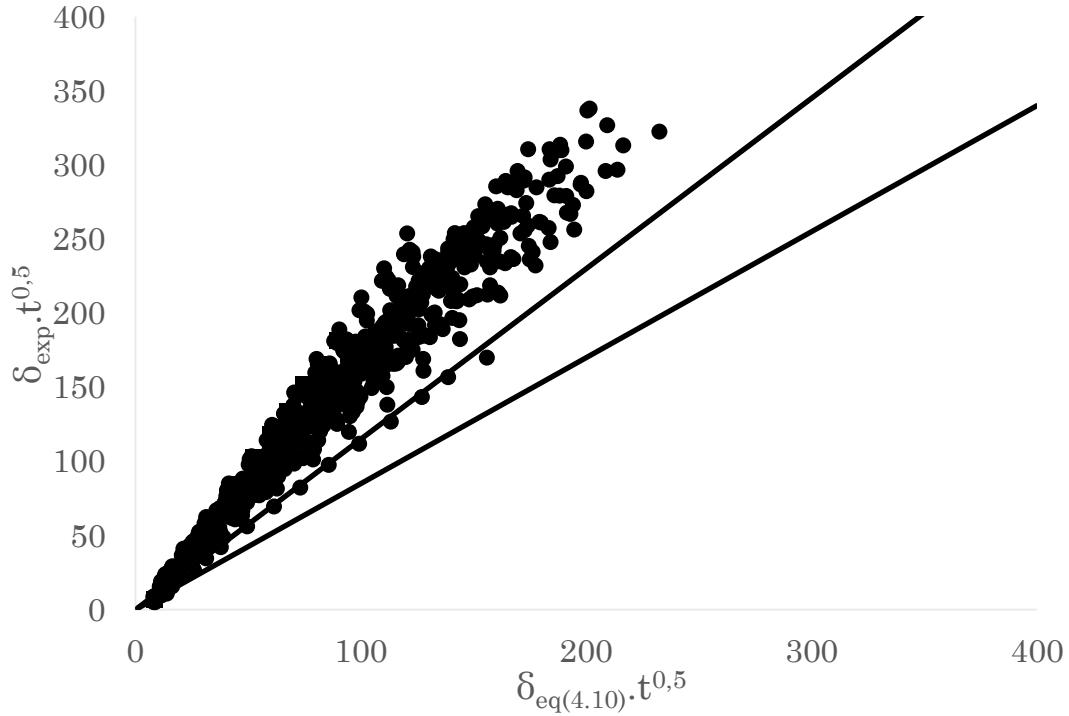
FIGURA 44 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CALCULADOS ATRAVÉS DA EQ. (4.9) – MODELO COM 4 COEFICIENTES



Como esperado, a Figura 45 demonstra que o crescimento da geada em convecção forçada é maior quando comparado ao modelo proposto por (HERMES et al 2017) eq (4.10) avaliado em convecção natural, o que valida o esforço em obter um modelo adequado para condição de convecção forçada.

$$\delta(t) = 1,26 \times 10^4 \left(\frac{D_f \Delta \omega}{L} \right) \lambda^{3/2} \sqrt{t} - \frac{0,53 e^{\theta/2}}{\sqrt{t}} \quad (4.10)$$

FIGURA 45 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E CALCULADOS ATRAVÉS DA EQ. (4.10) – MODELO DE CONVECÇÃO NATURAL



4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O modelo semi-empírico proposto nesta tese, dado pela eq. (4.9), aplica-se a uma faixa de graus de super-resfriamento variando de 12 a 28K e ângulos de contato de 60 a 123°, Comparando-se a eq. (4.8) e a eq. (4.9), verifica-se que $a = c_1 \Delta T^n$ e $b = (c_3 + c_4 \Delta T)\theta$, Assim, $b < 0$ para $\Delta T < -c_3/c_4$, tal que há atraso na nucleação, Neste caso, o processo de crescimento ocorre quando $\delta(t) = 0$, ou seja,

$$\delta(t) = 0,00285 \Delta T^{5/6} \sqrt{t} - \frac{(8,5 - \Delta T/3)\theta}{\sqrt{t}} \quad (4.11)$$

A equação anterior pode ser reescrita da seguinte forma para determinar o tempo de atraso da nucleação em função do ângulo de contato e do grau de super-resfriamento,

$$t_{b<0} = \frac{(c_4 \Delta T + c_3)\theta}{c_1 \Delta T^n} \quad (4.12)$$

onde $n=5/6$, $c_1=0,00285$, $c_3=-8,5$ e $c_4=1/3$, Por outro lado, nos casos em que $b > 0$ e a nucleação ocorre precocemente no experimento, antes da remoção do filme plástico, tem-se que $\Delta T > -c_3/c_4$, Neste caso, o modelo é válido para $t > t_{b>0}$, já que, para tempos menores, o contínuo ainda não se estabeleceu (Hermes et al., 2017), O tempo $t_{b>0}$ é obtido no ponto de mínimo da curva (Hermes et al., 2017) fazendo-se $\partial\delta/\partial t = 0$, tal que

$$\frac{\partial\delta}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{c_1 \Delta T^n}{t^{1/2}} - \frac{1}{2} \frac{(c_3 + c_4 \Delta T)\theta}{t^{3/2}} = 0 \quad (4.13)$$

Logo,

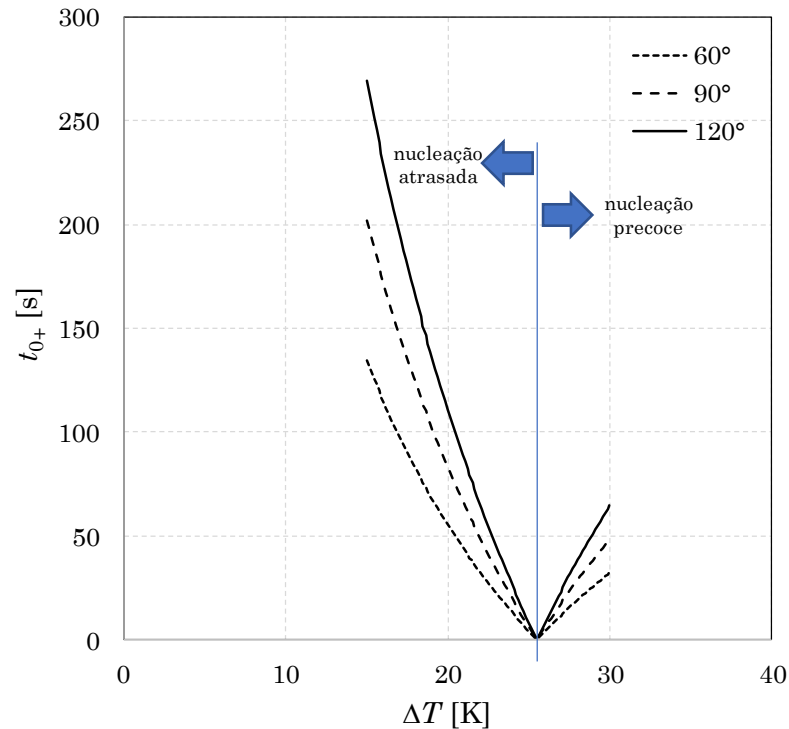
$$t_{b>0} = \frac{(c_4 \Delta T + c_3)\theta}{c_1 \Delta T^n} \quad (4.14)$$

Comparando-se as expressões, verifica-se que $|t_{b<0}| = |t_{b>0}| = t_{0+}$, tal que o modelo só apresenta resultados válidos para $t \geq t_{0+}$, Assim, usando os valores dos coeficientes, $n=5/6$, $c_1=0,00285$, $c_3=-8,5$ e $c_4=1/3$, a condição inicial do modelo é dada por:

$$t_{0+} = \frac{|\Delta T/3 - 8,5|\theta}{0,00285 \Delta T^{5/6}} \quad (4.15)$$

A Fig, 46 apresenta a sensibilidade de t_{0+} com o ângulo de contato (variando de 60 a 120°) e com o grau de super-resfriamento (variando de 10 a 30K), Para graus de super-resfriamento menores que 25,5K, observa-se um crescimento no atraso do início da nucleação à medida que o grau de super-resfriamento diminui, uma vez que não se dispõe capacidade de remover energia suficiente para romper a barreira da nucleação, um alto grau de super-resfriamento tende a atrasar menos o início da nucleação que um grau de super-resfriamento baixo, Para valores de super-resfriamento acima de 25,5K, observa-se o aumento do tempo de nucleação precoce, ou seja, antes de iniciar a cronometragem do experimento, quando o filme plástico é removido, Uma vez superada a barreira mínima de energia necessária para deflagrar o processo de nucleação, quanto maior o grau de supersaturação, maior a probabilidade de iniciar a nucleação, que ocorre bem antes de iniciar o experimento,

FIGURA 46 – SENSIBILIDADE DO TEMPO INICIAL EM RELAÇÃO AO ÂNGULO DE CONTATO E AO GRAU DE SUPER-RESFRIAMENTO



O modelo, descrito pela equação (4.9), apontou a barreira de nucleação para um super-resfriamento de 25,5K, enquanto a análise dos dados experimentais apontou para um limite em torno de 22K, Tal discrepância se deve ao fato do modelo ter sido ajustado para espessuras da camada de geada uma ampla faixa de tempos de operação, desde condições próximas da nucleação (instantes iniciais) até tempos muito elevados, nos quais os fenômenos macroscópicos predominam, Obviamente, pelo fato do coeficiente b levar em conta os fenômenos microscópicos que ocorrem no início da formação da camada de geada, faz mais sentido adotar o valor de 22K como limite de nucleação, Um fato importante consiste na independência entre o limite de nucleação e o ângulo de contato, o que se deve (i) ao fato das superfícies serem rugosas, tal que o efeito da rugosidade sobrepuja o do ângulo de contato, ou (ii) à possibilidade da superfície ter retornado à sua condição original após o tratamento superficial, Enquanto medições do ângulo de contato antes e depois dos testes, contudo, refutam a segunda hipótese, não se dispõe de medições de rugosidade para confirmar a primeira.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Foi apresentado um estudo experimental sobre formação de geada sobre placa horizontal isotérmica em escoamento forçado, Para tanto;

Foi desenvolvido um aparato experimental, que consiste em um túnel de vento fechado, capaz de controlar a velocidade e condições psicrométricas do ar e a temperatura da superfície isotérmica, Um sistema de aquisição de imagens foi utilizado para medir a espessura da geada ao longo dos testes,

Foram obtidas diferentes superfícies de teste com uma faixa significativa de medida de ângulo de contato,

A partir do aparato experimental, foram realizados 69 ensaios que forneceram 828 pontos experimentais, variando temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do ar, temperatura de superfície e ângulo de contato de superfície, a fim de avaliar os efeitos individuais dos parâmetros governantes do processo de crescimento da geada,

Um estudo teórico foi também apresentado com o intuito de identificar os fatores influentes sobre o crescimento da geada, Através da análise teórica de ordem de grandeza das equações governantes, observou-se que a espessura da geada varia com a raiz quadrada do tempo $\delta \sim \sqrt{t}$,

Um modelo semi-empírico para o crescimento da geada foi proposto baseado no artigo de Hermes et al., (2017b), foi realizada uma análise do crescimento da geada sobre a escala de tempo, com validade a partir de um tempo mínimo, o modelo possui um coeficiente angular “a” que indica a taxa de crescimento da geada, e contempla um coeficiente linear “b” associado a condição inicial do processo

A análise dos dados presentes na tabela (11) foi realizada com base nos coeficientes a e b da equação (47), $\delta\sqrt{t} = at + b$,

O comportamento do coeficiente a na figura (34) mostrou pouca influência do ângulo de contato e da velocidade na taxa de crescimento, enquanto a umidade do ar e a temperatura do substrato promoveram diferenças significativas 10-20%, Através de uma análise de sensibilidade, considerando efeitos de 1º ordem verificou-se na Figura 35 uma grande influência do grau de super-resfriamento, seguido da influência moderada da temperatura da superfície e do grau de super-saturação,

O coeficiente b foi analisado na figura (37), novamente foi percebido pouca influência do ângulo de contato e da velocidade, com perceptível influência da umidade do ar e da temperatura do substrato, cujas variações afetaram o sinal do coeficiente b , Tais resultados foram confirmados na análise de sensibilidade, foram avaliados como fatores influentes supersaturação, temperatura de superfície e super-resfriamento, com pouca influência do ângulo de contato, da velocidade e temperatura do ar,

Verificou-se, tanto valores positivos como negativos para o coeficiente b , Os primeiros podem ser associados a uma nucleação precoce, antes do início da contagem do tempo de teste, que ocorre pela presença de ar úmido entre a superfície resfriada e o filme plásticos que é removido no tempo $t = 0$, por outro lado, verificou-se uma nucleação tardia (ou um atraso no processo de nucleação), para grau de super-resfriamento menor que 22 K, Não foi observada uma esperada influência do ângulo de contato sobre o tempo de início de nucleação, uma possível explicação está associada a rugosidade da superfície, onde superfícies rugosas geram sítios propícios a nucleação, sobressaindo-se ao efeito do ângulo de contato,

O modelo proposto e validado por Hermes et al, (2017) para crescimento da geada em condições de convecção natural foi empregado e ajustado com dados experimentais para condição de convecção forçada, os modelos e os coeficientes propostos são expressos na Tabela 13,

A equação (4.3) traz a forma original do modelo com 5 coeficientes de ajuste, os coeficientes foram ajustados para cada superfície, S1, S2, S3 e S4, onde foi obtido uma variação significativa dos parâmetros, na sequência optou-se por um ajuste simultâneo de todo o conjunto de dados, onde 83% dos pontos ficaram situados numa banda de erro de 15%, observou-se nesse ajuste um coeficiente de ângulo de contato baixo, sugerindo que $e^{k\theta} \approx k\theta$, e uma fraca variação do termo $D_a(\rho_a/\rho_i)$, A partir de tais observações um modelo com 3 coeficientes foi proposto e apresentou resultados satisfatórios em termos de previsão dos dados experimentais, porém nenhum dos dois modelos anteriores foi capaz de captar a mudança de sinal no 2º termo do lado direito da equação (coeficiente b). Assim, para este propósito, fez-se uso da variação do coeficiente b com o grau de supersaturação mostrada na Fig, 44, de tal forma que o coeficiente c_2 foi substituído por uma função linear de ΔT , por fim um novo modelo com 4 parâmetros foi ajustado, em que o 1º termo do lado direito da equação representa o comportamento descrito para o coeficiente a na Figura 36, enquanto o 2º termo reflete o comportamento do coeficiente b descrito na Figura 39, o modelo com 4 coeficientes se mostrou o mais eficiente, com 88% dos dados presentes numa banda de erros de 15%.

Um resumo dos modelos e os coeficientes associados são expressos na Tabela 12.

Tabela 12 – MODELOS E COEFICIENTE AJUSTADOS,

Modelo de Crescimento $\delta(t)$	c_1	c_2	m	n	k
$c_1 \left(\frac{\rho_a}{\rho_i} \right) \left(\frac{D_a \Delta \omega}{L} \right) \text{Re}^m \text{Pr}^{1/3} \lambda^n \sqrt{t} + \frac{c_2 e^{k\theta}}{\sqrt{t}}$	5,73,10 ⁶	-4,95	0,134	1,155	0,023
$c_1 \Delta \omega \lambda^n \sqrt{t} + \frac{c_2 \cdot \theta}{\sqrt{t}}$	4,65	-2,73	-	1,14	-
Modelo de Crescimento $\delta(t)$	c_1	c_3	c_4	n	
$\delta(t) = c_1 \Delta T^n \sqrt{t} + \frac{(c_3 + c_4 \Delta T) \theta}{\sqrt{t}}$	0,0028	8,5	3	5/6	

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de avançar sobre o conhecimento existente acerca do processo de crescimento da geada, as seguintes linhas de investigação são sugeridas para trabalhos futuros,

- Estudo do processo de nucleação, a fim de entender melhor as propriedades (incluindo rugosidade e energia de superfície) que afetam os estágios iniciais do crescimento da geada e que influenciam no atraso da formação de geada, expresso no parâmetro b da equação (4.1),
- Desenvolvimento de superfícies estáveis super-hidrofílicas e super-hidrofóbicas, afim de serem estudadas e aplicadas comercialmente,
- Estudos sobre a adesão da geada formada sobre superfícies hidrofóbicas e hidrofílicas, de modo a prever situações em que a remoção da geada seja mais propícia,

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONINI, C, et al, Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems, **Cold Regions Science and Technology**, v, 67, n, 1-2, p, 58-67, jun, 2011,
- ASHRAE STANDART, **51, Laboratory methods of testing fans for aerodynamic performance rating**, Atlanta, GA, USA, 1999,
- AURACHER, H, **Effective Thermal Conductivity of Frost**, International Symposium on Heat and Mass Transfer in Refrigeration and Cryogenics, Dubrovnik, Iugoslavia: Begel House Inc, 1986, p, 285-302,
- BECKER, R.; DÖRING, W, Kinetische behandlung der keimbildung in übersättigten dämpfen, **Annalen der Physik**, v, 416, n, 8, p, 719-752, 1935,
- BIGURIA, G.; WENZEL, L, A, Measurement and Correlation of Water Frost Thermal Conductivity and Density, **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v, 9, n, 1, p, 129-138, fev, 1970,
- BOINOVICH, L, B.; EMELYANENKO, A, M, Anti-icing potential of superhydrophobic coatings, **Mendelevov Communications**, v, 23, n, 1, p, 3-10, 2013,
- BORGES, B, N.; MELO, C.; HERMES, C, J, L, **International Refrigeration and Air Conditioning**, International Refrigeration and Air Conditioning Conference, West Lafayette, Indiana, EUA: Purdue University, 2014, p, 1362 (1-9),
- BRIAN, P, L, T.; REID, R, C.; BRAZINSKY, I, Cryogenic frost properties, **Cryogenic Technology**, v, 5, n, 5, p, 205-212, 1969,
- CHAPMAN, B, N, **Glow discharge processes: sputtering and plasma etching**, 1^a, ed, New York: Wiley, 1980, 406 p, ISBN 047107828X,
- CHAUDHARY, G.; LI, R, Freezing of water droplets on solid surfaces: An experimental and numerical study, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v, 57, p, 86-93, set, 2014,
- CHENG, C, H.; CHENG, Y, C, Predictions of frost growth on a cold plate in atmospheric air, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v, 28, n, 7, p, 953-962, out, 2001,
- CHENG, C, H.; SHIU, C, C, Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 45, n, 21, p, 4289-4303, out, 2002,
- CHENG, C, H.; WU, K, H, Observations of Early-Stage Frost Formation on a Cold Plate in Atmospheric Air Flow, **Journal of Heat Transfer**, v, 125, n, 1, p, 95-102, 1 fev, 2003,
- COX, G, **Optical imaging techniques in cell biology**, 2^a, ed, Boca Raton: CRC Press, 2012, 316 p, ISBN 1439848254,

- CUI, J, et al, A new time- and space-dependent model for predicting frost formation, **Applied Thermal Engineering**, v, 31, n, 4, p, 447-457, mar, 2011,
- DIETENBERGER, M, A, Generalized correlation of the water frost thermal conductivity, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 26, n, 4, p, 607-619, abr, 1983,
- EL CHEIKH, A,; JACOBI, A, A mathematical model for frost growth and densification on flat surfaces, **A mathematical model for frost growth and densification on flat surfaces**, v, 77, p, 604-611, out, 2014,
- ELETROBRAS, **Avaliação dos Resultados do PROCEL 2009**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009,
- FARHADI, S,; FARZANEH, M,; KULINICH, S, A, Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces, **Applied Surface Science**, v, 257, n, 14, p, 6264-6269, maio 2011,
- FLETCHER, N, H, **The chemical physics of ice**, 1ª, ed, Cambridge: Cambridge University Press, 1970, 288 p, ISBN 0521112303,
- HAYASHI, Y, et al, Study of Frost Properties Correlating With Frost Formation Types, **Journal of Heat Transfer**, v, 99, n, 2, p, 239-245, maio 1977,
- HERMES, C, J, L, An analytical solution to the problem of frost growth and densification on flat surfaces, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 55, n, 23-24, p, 7346-7351, nov, 2012,
- HERMES, C, J, L, et al, A study of frost growth and densification on flat surfaces, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v, 33, n, 2, p, 371-379, jan, 2009,
- HERMES, C, J, L,; LOYOLA, F, R,; NASCIMENTO JR, V, S, A semi-empirical correlation for the frost density, **International Journal of Refrigeration**, v, 46, p, 100-104, out, 2014,
- HUANG, L, et al, Preparation and anti-frosting performance of super-hydrophobic surface, **International Journal of Thermal Sciences**, v, 50, n, 4, p, 432-439, abr, 2011,
- HUANG, L, et al, Effect of contact angle on water droplet freezing process on a cold flat surface, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v, 40, p, 74-80, jul, 2012,
- IBGE, **Censo demográfico do Brasil de 2010**, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010,
- INCROPERA, FRANK P,; DEWITT, DAVID P,; Fundamentos de Transferência de, Calor e Massa, 7ª Edição, LTC Editora, 2014,
- INDEXMUNDI, Electricity - consumption by year chart, **IndexMundi**, 2017, Disponível em: <http://www.indexmundi.com/world/electricity_consumption.html>, Acesso em: 19 set, 2017,
- JING, T, et al, Frosting and defrosting on rigid superhydrophobic surface, **Applied Surface Science**, v, 276, p, 37-42, jul, 2013,

- KANDULA, M, Effective thermal conductivity of frost considering mass diffusion and eddy convection, **Special Topics & Reviews in Porous Media - An International Journal**, v, 1, n, 4, p, 321-336, 2010,
- KANDULA, M, Frost growth and densification in laminar flow over flat surfaces, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 54, n, 15-16, p, 3719-3731, jun, 2011,
- KANDULA, M, Correlation of water frost porosity in laminar flow over flat surfaces, **Special Topics & Reviews in Porous Media - An International Journal**, v, 3, n, 1, p, 79-87, 2012,
- KIM, K.; LEE, K.-S, Frosting and defrosting characteristics of a fin according to surface contact angle, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 54, n, 13-14, p, 2758-2764, jun, 2011,
- KNABBEN, F, T, **Um Estudo in-situ da formação de geada em evaporadores No-Frost**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, p, 126, 2010,
- KNABBEN, F, T.; HERMES, C, J, L.; MELO, C, In-situ study of frosting and defrosting processes in tube-fin evaporators of household refrigerating appliances, **International Journal of Refrigeration**, v, 34, n, 8, p, 2031-2041, dez, 2011,
- KOBAYASHI, T, On the Habit of Snow Crystals Artificially Produced, **Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser, II**, v, 36, n, 5, p, 193-208, 1958,
- LASDON, L, S.; WARREN, A, D.; JAIN, A; RATNER, M, Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming, **ACM Transactions of Mathematical Software New York**, v,4, n, 1, p, 34-50, 1978
- LE GALL, R.; GRILLOT, J, M.; JALLUT, C, Modelling of frost growth and densification, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 40, n, 13, p, 3177-3187, set, 1997,
- LEE, H, et al, Frost formation on a plate with different surface hydrophilicity, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 47, n, 22, p, 4881-4893, out, 2004,
- LEE, J, S, et al, **Frost Formation on Thermally Conductive Plastic Plain Plate**, Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, Hokoben, NJ, USA: ECI Symposium Series, 2005, p, 370-375,
- LEE, K, S.; KIM, W, S.; LEE, T, H, A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 40, n, 18, p, 4359-4365, nov, 1997,
- LEE, K, S.; LEE, T, H.; KIM, W, S, Heat and mass transfer of parallel plate heat exchanger under frosting condition, **Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering**, v, 6, n, 2, p, 155-165, maio 1994,
- LIU, Z, et al, An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint, Part I, Anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface, **International Journal of Refrigeration**, v, 29, n, 2, p, 229-236, mar, 2006a,
- LIU, Z, et al, An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint, Part II, Long-term

performance, frost layer observation and mechanism analysis, **International Journal of Refrigeration**, v, 29, n, 2, p, 237-242, mar, 2006b,

LIU, Z, et al, Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v, 31, n, 7, p, 789-794, jul, 2007,

LOYOLA, F, R, **Modelo generalizado para formação de geada em placas planas e canais de placas paralelas**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, p, 130, 2013,

LOYOLA, F, R,; NASCIMENTO JR, V, S,; HERMES, C, 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, dez, 2014,

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

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

MELO, C,; SILVA, L, W, **A perspective on the energy savings in household**, Sustainable refrigeration and heat pump technology conference, Estocolmo, Suécia: KTH Royal Institute of Technology, 2010,

MONTGOMERY, D, C, **Design and Analysis of Experiments**, 8^a, ed, Hoboken: John Wiley & Sons, 2012, 752 p, ISBN 1118146921,

MOTIC CHINA GROUP CO, LTD, **Motic Images Plus 2,0 ML**, [S,1,], 2013,

MONTGOMERY, DOUGLAS C,; RUNGER, GEORGE C. **Estatística Aplicada para engenheiros**, 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009

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

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

NASCIMENTO JR, V, S, **Uma correlação semi-empírica para a densidade da geada**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, p, 102, 2013,

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

NATIONAL INSTRUMENTS, **Labview Professional Development System**, Austin, 2011,

NEGRELLI, S, **Estudo teórico experimental sobre a condutividade térmica da geada formada em canais de placas paralelas**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, p, 99, 2016,

NEGRELLI, S.; NASCIMENTO JR, V, S.; HERMES, C, 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, nov, 2016,

OBERLI, L, et al, Condensation and freezing of droplets on superhydrophobic surfaces, **Advances in Colloid and Interface Science**, v, 210, p, 47-57, ago, 2014,

O'NEAL, D, L, **The effects of frost formation on the performance of a parallel plate heat exchanger**, Purdue University, West Lafayette, IN, EUA, p, 169, 1982,

O'NEAL, D, L.; TREE, D, R, A review of frost formation in simple geometry, **ASHRAE Transactions**, v, 91, n, 2, p, 267-281, jun, 1985,

ÖSTIN, R.; ANDERSSON, S, Frost growth parameters in a forced air stream, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 34, n, 4-5, p, 1009-1017, abr, 1991,

PITMAN, D.; ZUCKERMAN, B, Effective Thermal Conductivity of Snow at -88° , -27° , and -5°C , **Journal of Applied Physics**, v, 38, n, 6, p, 2698-2699, maio 1967,

PIUCCO, R, O, **Análise teórico-experimental da formação de geada em refrigeradores domésticos**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, p, 110, 2008,

PIUCCO, R, O, et al, A study of frost nucleation on flat surfaces, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v, 32, n, 8, p, 1710-1715, set, 2008,

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

RADERMACHER, R.; KIM, K, Domestic refrigerators: recent developments, **International Journal of Refrigeration**, v, 19, n, 1, p, 61-69, jan, 1996,

RAHIMI, M, et al, The effect of surface modification on initial ice formation on aluminum surfaces, **Applied Surface Science**, v, 355, p, 327-333, nov, 2015,

RAHMAN, M, A.; JACOBI, A, M, Experimental study on frosting/defrosting characteristics of microgrooved metal surfaces, **International Journal of Refrigeration**, v, 50, p, 44-56, fev, 2015,

RIBEIRO, R, S.; HERMES, C, J, L, Algebraic modeling and thermodynamic design of fan-supplied tube-fin evaporators running under frosting conditions, **Applied Thermal Engineering**, v, 70, n, 1, p, 552-559, set, 2014,

ŞAHİN, A, Z, Effective thermal conductivity of frost during the crystal growth period, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v, 43, n, 4, p, 539-553, fev, 2000,

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

SANDERS, C, T, **Frost formation: the influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers**, TU Delft (Delft University of Technology), Delft, Holanda, p, 181, 1974,

- SEKI, N, et al, An analysis of incipient frost formation, **Wärme- und Stoffübertragung**, v, 19, n, 1, p, 9-18, mar, 1985,
- SILVA, D, L, **Análise da formação de gelo e geada e seu efeito no desempenho termo-hidráulico de evaporadores do tipo tubo aletado**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, p, 174, 2012,
- SILVA, D, L.; HERMES, C, J, L.; MELO, C, Experimental study of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators, **Applied Thermal Engineering**, v, 31, n, 6-7, p, 1013-1020, maio 2011a,
- SILVA, D, L.; HERMES, C, J, L.; MELO, C, First-principles modeling of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators, **Applied Thermal Engineering**, v, 31, n, 14-15, p, 2616-2621, out, 2011b,
- SOMMERS, A, D, et al, Densification of frost on hydrophilic and hydrophobic substrates – Examining the effect of surface wettability, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v, 75, p, 25-34, jul, 2016,
- SOMMERS, A, 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, fev, 2017,
- 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, out, 1999,
- STURM, M, et al, The thermal conductivity of seasonal snow, **Journal of Glaciology**, v, 43, n, 143, p, 26-41, jan, 1997,
- TAO, Y, X.; BESANT, R, W.; MAO, Y, Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period, **ASHRAE Transactions A**, v, 99, n, 1, p, 746-753, 1993,
- VALIPOUR, M, N.; BIRJANDI, F, C.; SARGOLZAEI, J, Super-non-wettable surfaces: A review, **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v, 448, p, 93-106, abr, 2014,
- VOLMER, M.; FLOOD, H, Tröpfchenbildung in Dämpfen, **Zeitschrift für Physikalische Chemie**, v, 170A, n, 1, p, 275-285, ago, 1934,
- WANG, W, et al, A generalized simple model for predicting frost growth on cold flat plate, **International Journal of Refrigeration**, v, 35, n, 2, p, 475-486, mar, 2012,
- WANG, Z, J, et al, Frost formation and anti-icing performance of a hydrophobic coating on aluminum, **Experimental Thermal and Fluid Science**, v, 60, p, 132-137, jan, 2015,
- WHITE, J, E.; CREMERS, C, J, Prediction of Growth Parameters of Frost Deposits in Forced Convection, **Journal of Heat Transfer**, v, 103, n, 1, p, 3-6, fev, 1981,
- WU, X, et al, Visual and Theoretical Analyses of the Early Stage of Frost Formation on Cold Surfaces, **Journal of Enhanced Heat Transfer**, v, 14, n, 3, p, 257-268, 2007,

YANG, D, K,; LEE, K, S, Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate, **International Journal of Refrigeration**, v, 27, n, 1, p, 89-96, jan, 2004,

YONKO, J, D,; SEPSY, C, F, An Investigation of the Thermal Conductivity of Frost while Forming on a Flat Horizontal Plate, **ASHRAE Transactions**, v, 73, n, 2, p, 1,1-1,11, 1967,

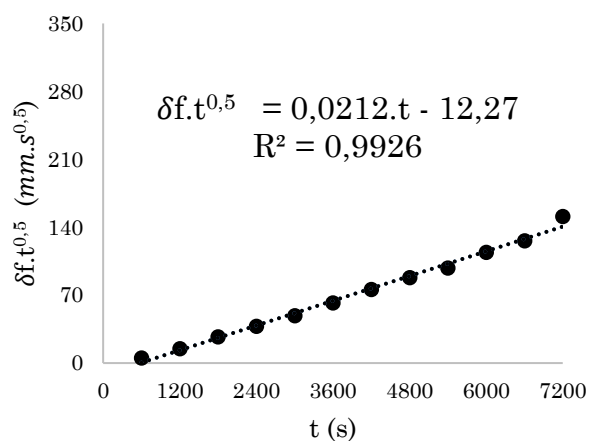
ZHANG, X, J, et al, Analysis of the nucleation of nanofluids in the ice formation process, **Energy Conversion and Management**, v, 51, n, 1, p, 130-134, jan, 2010,

APÊNDICE A – CONDIÇÕES DE TESTE E MEDIDAS DE CRESCIMENTO

TABELA 13 – CONDIÇÕES DE TESTE E EVOLUÇÃO DO CRESCIMENTO DA GEADA

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,04	0,00482	4,95	-9,67	0,211
1200	1,03	0,00481	5,00	-9,65	0,422
1800	1,02	0,00482	5,00	-9,62	0,633
2400	1,01	0,00482	4,99	-9,58	0,769
3000	1,00	0,00482	5,02	-9,63	0,889
3600	0,99	0,00482	4,99	-9,63	1,029
4200	0,97	0,00481	5,00	-9,63	1,169
4800	0,96	0,00481	5,01	-9,54	1,269
5400	0,94	0,00482	5,01	-9,55	1,33
6000	0,92	0,00482	4,99	-9,58	1,47
6600	0,90	0,00482	5,02	-9,54	1,55
7200	0,88	0,00482	5,01	-9,54	1,777

Teste # 1



t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,08	0,00481	4,92	-14,90	0,623
1200	1,08	0,00481	4,99	-14,94	1,003
1800	1,08	0,00481	4,98	-14,94	1,229
2400	1,08	0,00482	4,99	-14,93	1,47
3000	1,07	0,00482	4,99	-14,96	1,695
3600	1,07	0,00481	5,00	-14,90	1,903
4200	1,07	0,00482	5,00	-14,95	2,059
4800	1,07	0,00482	5,02	-14,92	2,249
5400	1,07	0,00482	5,01	-14,94	2,37
6000	1,06	0,00481	5,00	-14,92	2,491
6600	1,06	0,00482	4,99	-14,93	2,578
7200	1,05	0,00482	5,00	-14,94	2,785

Teste # 2

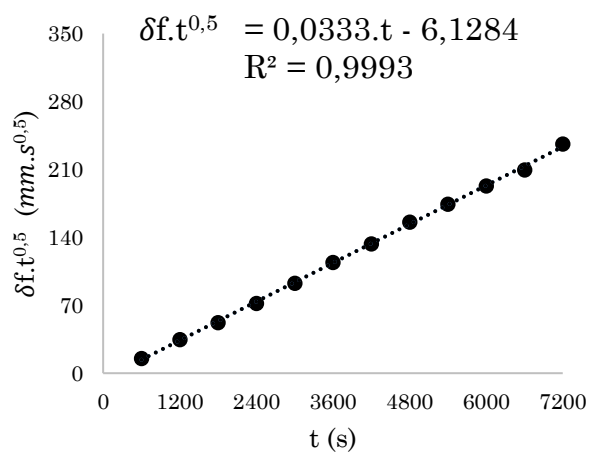


Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,02	0,00480	4,99	-20,68	0,862
1200	1,02	0,00480	4,99	-20,58	1,418
1800	1,02	0,00480	4,99	-20,74	1,707
2400	1,02	0,00480	5,01	-20,88	2,026
3000	1,01	0,00480	5,00	-21,08	2,271
3600	1,01	0,00480	5,00	-21,09	2,392
4200	1,01	0,00480	5,01	-21,11	2,582
4800	1,01	0,00480	5,01	-21,10	2,771
5400	1,00	0,00480	5,00	-21,13	2,875
6000	0,99	0,00480	5,00	-21,18	3,069
6600	0,99	0,00480	4,99	-21,21	3,168
7200	0,99	0,00480	5,01	-21,20	3,327

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	0,89	0,00678	9,91	-9,63	0,411
1200	0,89	0,00680	10,00	-9,71	0,802
1800	0,89	0,00680	10,02	-9,67	1,118
2400	0,88	0,00679	10,01	-9,67	1,376
3000	0,88	0,00679	9,99	-9,67	1,595
3600	0,88	0,00680	9,97	-9,69	1,729
4200	0,87	0,00680	10,00	-9,65	1,91
4800	0,86	0,00679	10,01	-9,68	2,054
5400	0,86	0,00680	9,99	-9,70	2,092
6000	0,84	0,00680	9,96	-9,71	2,14
6600	0,83	0,00680	10,02	-10,12	2,293
7200	0,82	0,00680	10,00	-10,27	2,36

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,08	0,00678	9,98	-15,14	0,705
1200	1,08	0,00680	9,99	-15,12	1,152
1800	1,08	0,00680	9,99	-15,14	1,582
2400	1,07	0,00680	10,00	-15,13	1,891
3000	1,07	0,00679	10,00	-15,15	2,184
3600	1,07	0,00680	10,01	-15,16	2,356
4200	1,07	0,00680	10,00	-15,12	2,579
4800	1,07	0,00680	10,00	-15,16	2,734
5400	1,06	0,00679	10,00	-15,16	2,889
6000	1,06	0,00680	10,01	-15,15	3,043
6600	1,05	0,00680	10,00	-15,17	3,147
7200	1,04	0,00680	10,00	-15,19	3,356

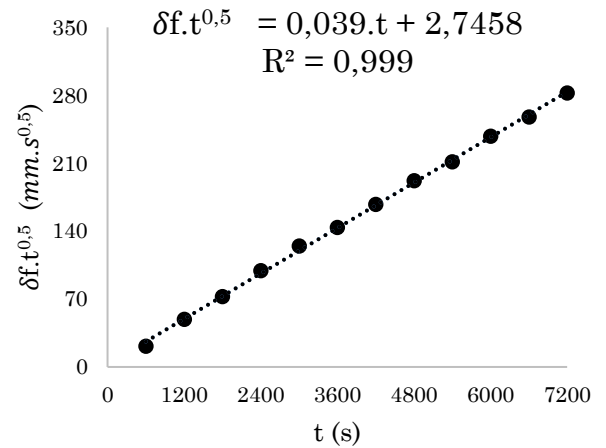
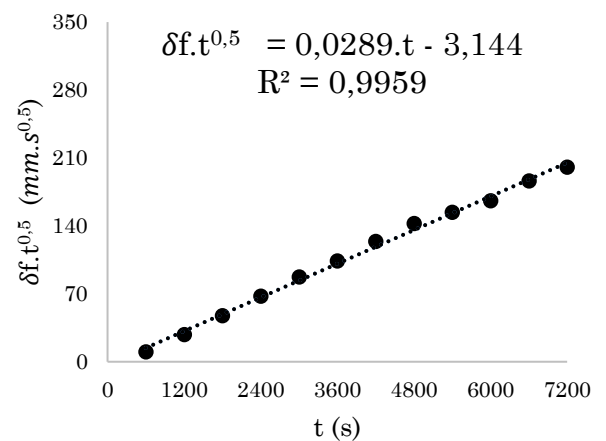
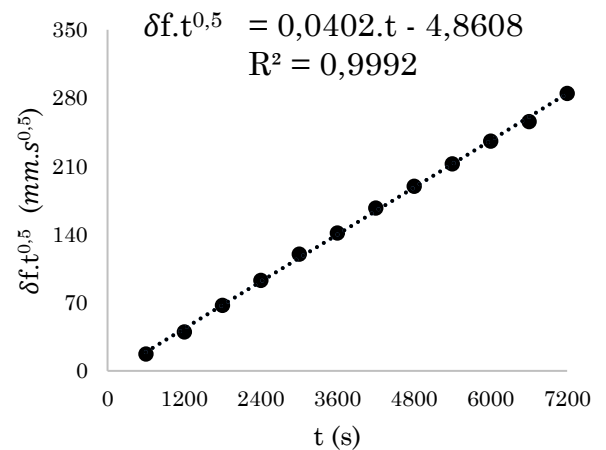
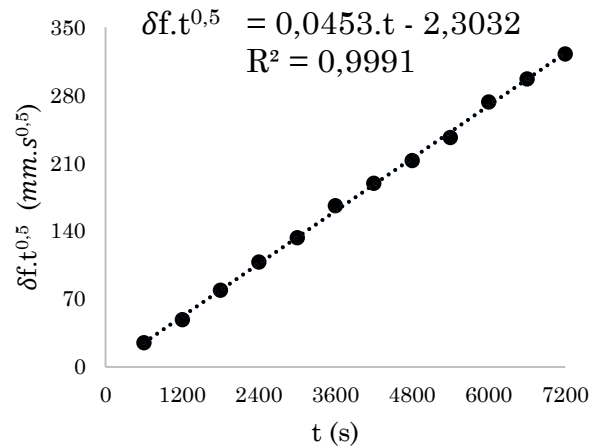
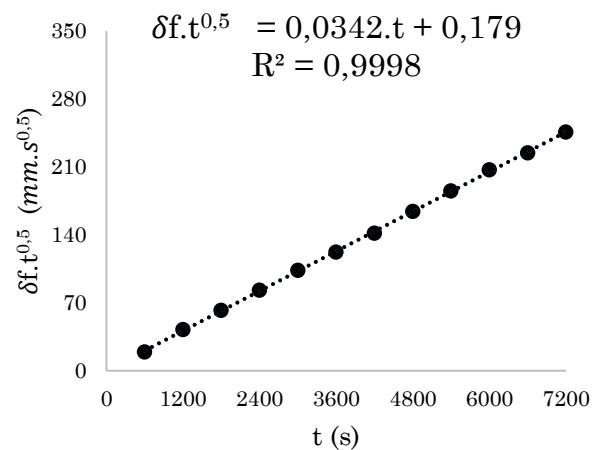
Teste # 3**Teste # 4****Teste # 5**

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,01	0,00680	10,00	-21,36	1,012
1200	1,01	0,00680	10,01	-21,28	1,409
1800	1,00	0,00679	10,01	-21,29	1,866
2400	1,00	0,00680	10,01	-21,33	2,203
3000	1,00	0,00680	10,00	-21,40	2,432
3600	0,99	0,00680	10,00	-21,48	2,769
4200	0,98	0,00680	10,00	-21,70	2,918
4800	0,97	0,00680	10,01	-21,76	3,067
5400	0,96	0,00679	9,99	-21,69	3,216
6000	0,94	0,00680	10,00	-21,67	3,523
6600	0,93	0,00680	10,01	-21,71	3,652
7200	0,91	0,00680	10,00	-21,66	3,801

Teste # 6

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,03	0,01007	16,01	-9,03	0,785
1200	1,03	0,01008	16,02	-9,12	1,222
1800	1,03	0,01008	16,01	-9,22	1,464
2400	1,02	0,01008	16,00	-9,25	1,69
3000	1,02	0,01008	16,00	-9,23	1,887
3600	1,01	0,01008	16,01	-9,22	2,037
4200	1,01	0,01008	16,00	-9,18	2,188
4800	1,00	0,01008	16,00	-9,16	2,369
5400	0,99	0,01008	16,00	-9,16	2,52
6000	0,98	0,01008	16,00	-9,23	2,674
6600	0,97	0,01008	16,02	-9,20	2,762
7200	0,96	0,01008	16,00	-9,21	2,898

Teste # 7

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,01	0,01012	16,01	-14,59	1,148
1200	1,00	0,01013	15,98	-14,37	1,691
1800	1,00	0,01012	16,01	-14,35	2,084
2400	0,97	0,01012	15,99	-14,29	2,512
3000	0,95	0,01013	15,99	-14,49	2,777
3600	0,94	0,01013	15,97	-15,07	3,011
4200	0,93	0,01013	16,00	-15,46	3,267
4800	0,92	0,01013	16,00	-15,52	3,386
5400	0,91	0,01013	16,02	-15,66	3,509
6000	0,90	0,01013	16,01	-15,72	3,69
6600	0,90	0,01013	16,01	-15,74	3,823
7200	0,89	0,01012	16,02	-15,75	3,968

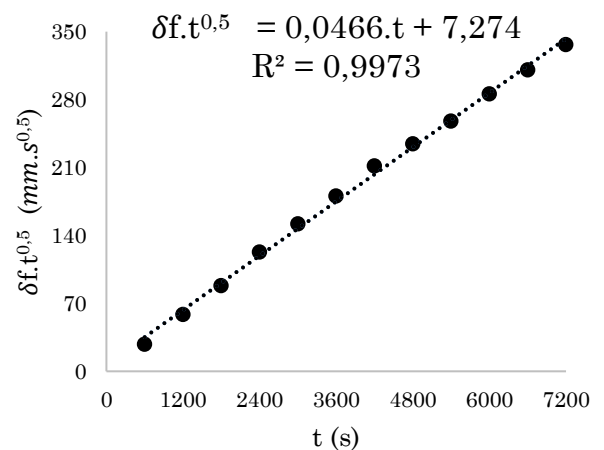
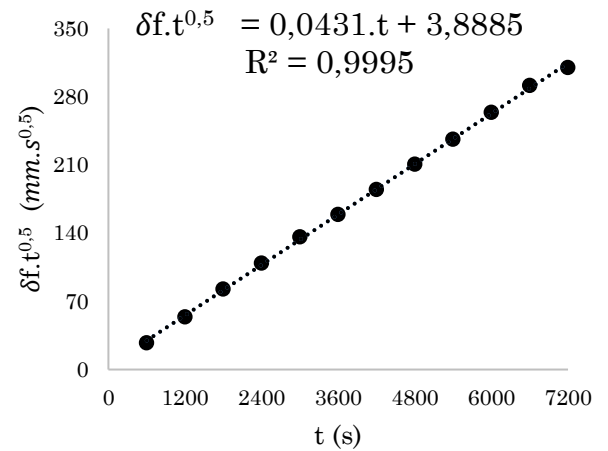
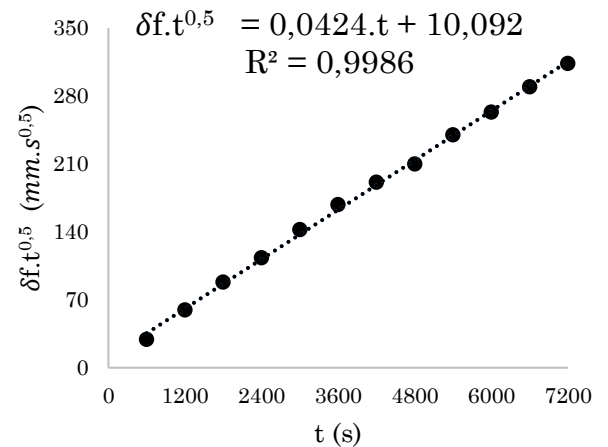
Teste # 8

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	0,94	0,01012	15,98	-13,56	1,121
1200	0,93	0,01011	15,99	-13,66	1,558
1800	0,93	0,01011	16,00	-13,82	1,942
2400	0,93	0,01012	16,00	-13,93	2,229
3000	0,93	0,01012	16,00	-14,05	2,481
3600	0,93	0,01012	16,00	-14,17	2,653
4200	0,92	0,01011	16,00	-14,27	2,847
4800	0,92	0,01011	16,00	-14,39	3,041
5400	0,92	0,01011	16,00	-14,45	3,214
6000	0,91	0,01012	16,01	-14,45	3,408
6600	0,91	0,01011	15,99	-14,45	3,589
7200	0,90	0,01013	16,00	-14,50	3,651

Teste # 9

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	0,96	0,01021	16,02	-13,91	1,192
1200	0,96	0,01030	16,00	-14,10	1,722
1800	0,95	0,01021	16,00	-14,25	2,075
2400	0,95	0,01024	16,01	-14,32	2,309
3000	0,94	0,01025	16,00	-14,32	2,596
3600	0,94	0,01026	16,01	-14,28	2,799
4200	0,93	0,01026	15,99	-14,25	2,949
4800	0,92	0,01026	16,01	-14,27	3,028
5400	0,91	0,01025	16,00	-14,28	3,267
6000	0,90	0,01027	16,01	-14,27	3,399
6600	0,90	0,01027	15,99	-14,31	3,562
7200	0,88	0,01024	16,02	-14,39	3,695

Teste # 10

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	0,93	0,00303	4,93	-19,87	0,437
1200	0,93	0,00302	5,01	-19,53	0,773
1800	0,93	0,00304	5,00	-19,32	0,993
2400	0,93	0,00303	5,00	-19,20	1,148
3000	0,93	0,00303	5,01	-19,15	1,271
3600	0,93	0,00303	5,01	-19,06	1,373
4200	0,91	0,00303	4,96	-19,16	1,505
4800	0,92	0,00302	5,04	-19,35	1,616
5400	0,92	0,00304	4,98	-19,52	1,726
6000	0,92	0,00303	5,01	-19,68	1,85
6600	0,91	0,00302	4,99	-19,61	1,929
7200	0,91	0,00305	5,00	-19,94	2,004

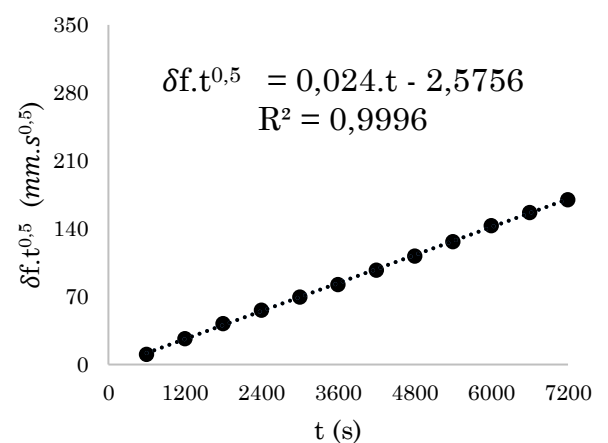
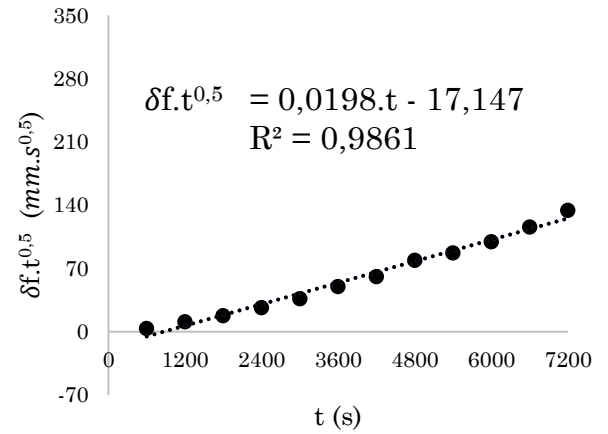
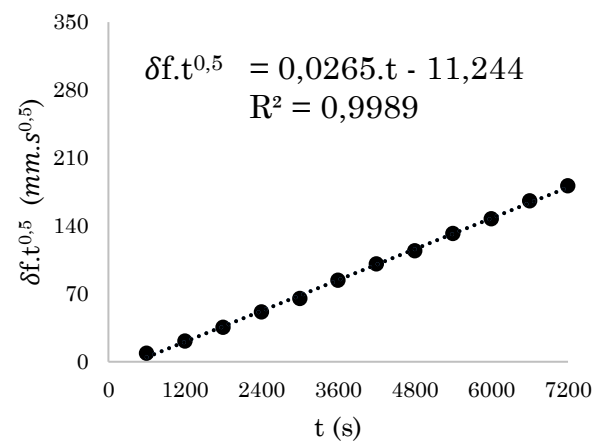
Teste # 11

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	0,92	0,00300	4,94	-20,92	0,145
1200	0,97	0,00304	5,00	-20,69	0,312
1800	0,89	0,00304	5,00	-20,51	0,412
2400	0,91	0,00303	5,01	-20,35	0,541
3000	0,92	0,00304	5,00	-20,23	0,665
3600	0,92	0,00303	5,00	-20,12	0,831
4200	0,92	0,00304	5,00	-20,04	0,94
4800	0,92	0,00303	4,99	-19,93	1,139
5400	0,92	0,00304	5,00	-19,81	1,185
6000	0,92	0,00304	5,00	-19,72	1,285
6600	0,92	0,00303	5,00	-19,65	1,426
7200	0,92	0,00304	4,99	-19,60	1,582

Teste # 12

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,84	0,00480	5,09	-9,57	0,349
1200	1,83	0,00482	4,95	-9,58	0,609
1800	1,83	0,00482	4,84	-9,69	0,832
2400	1,83	0,00481	4,73	-9,75	1,047
3000	1,83	0,00482	4,63	-9,79	1,189
3600	1,82	0,00481	4,89	-9,84	1,396
4200	1,82	0,00482	5,03	-9,89	1,555
4800	1,82	0,00482	5,00	-9,90	1,648
5400	1,81	0,00482	4,99	-9,99	1,798
6000	1,81	0,00480	4,98	-9,98	1,9
6600	1,81	0,00482	4,98	-10,07	2,038
7200	1,81	0,00482	4,99	-10,08	2,135

Teste # 13

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,82	0,00481	4,91	-15,57	0,768
1200	1,82	0,00481	5,00	-15,68	1,128
1800	1,82	0,00481	4,99	-15,75	1,45
2400	1,82	0,00482	5,00	-15,80	1,688
3000	1,81	0,00482	5,00	-15,84	1,931
3600	1,81	0,00481	5,00	-15,85	2,07
4200	1,80	0,00482	5,01	-15,87	2,179
4800	1,80	0,00482	5,01	-15,88	2,348
5400	1,79	0,00481	5,00	-15,87	2,439
6000	1,78	0,00481	5,00	-15,88	2,621
6600	1,77	0,00481	5,00	-15,89	2,691
7200	1,77	0,00482	5,00	-15,93	2,838

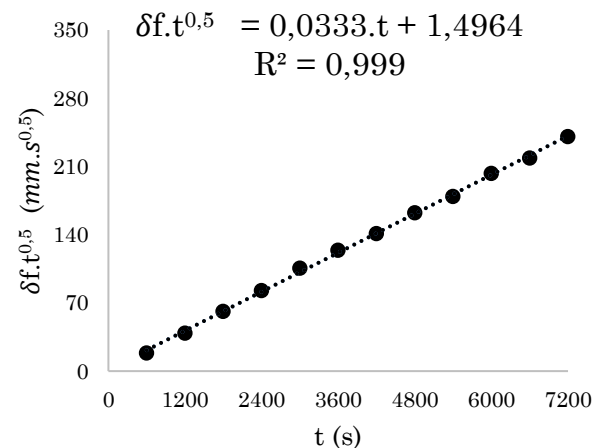
Teste # 14

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T_{ar} (°C)	T_w (°C)	δ_f (mm)
600	1,87	0,00481	4,95	-19,76	0,859
1200	1,87	0,00482	4,99	-20,00	1,327
1800	1,86	0,00481	4,99	-20,08	1,679
2400	1,86	0,00482	4,98	-20,14	1,9
3000	1,86	0,00482	5,00	-20,16	2,056
3600	1,85	0,00482	5,02	-20,15	2,356
4200	1,84	0,00481	4,99	-20,15	2,525
4800	1,84	0,00481	5,02	-20,16	2,655
5400	1,83	0,00482	4,98	-20,19	2,837
6000	1,82	0,00482	5,01	-20,17	2,98
6600	1,80	0,00481	5,01	-20,14	3,149
7200	1,79	0,00481	5,00	-20,14	3,292

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T_{ar} (°C)	T_w (°C)	δ_f (mm)
600	1,85	0,00481	5,00	-19,92	1
1200	1,85	0,00482	4,97	-20,09	1,44
1800	1,84	0,00481	4,99	-20,19	1,732
2400	1,84	0,00481	5,01	-20,49	1,928
3000	1,84	0,00482	4,97	-20,58	2,086
3600	1,84	0,00481	5,02	-20,75	2,281
4200	1,83	0,00482	4,99	-20,85	2,558
4800	1,83	0,00482	5,00	-20,78	2,652
5400	1,82	0,00481	5,03	-20,92	2,847
6000	1,82	0,00482	4,97	-20,88	3,018
6600	1,81	0,00481	5,04	-20,84	3,213
7200	1,81	0,00482	4,97	-20,96	3,38

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T_{ar} (°C)	T_w (°C)	δ_f (mm)
600	1,88	0,00676	9,91	-10,13	0,64
1200	1,88	0,00679	9,99	-10,15	1,032
1800	1,88	0,00679	9,98	-10,21	1,371
2400	1,87	0,00680	9,99	-10,24	1,646
3000	1,87	0,00680	9,99	-10,28	1,855
3600	1,87	0,00680	9,99	-10,27	2,077
4200	1,86	0,00680	10,00	-10,27	2,26
4800	1,86	0,00680	10,00	-10,29	2,442
5400	1,85	0,00680	9,99	-10,29	2,573
6000	1,84	0,00680	10,00	-10,29	2,717
6600	1,83	0,00680	10,00	-10,31	2,834
7200	1,82	0,00680	9,99	-10,34	2,991

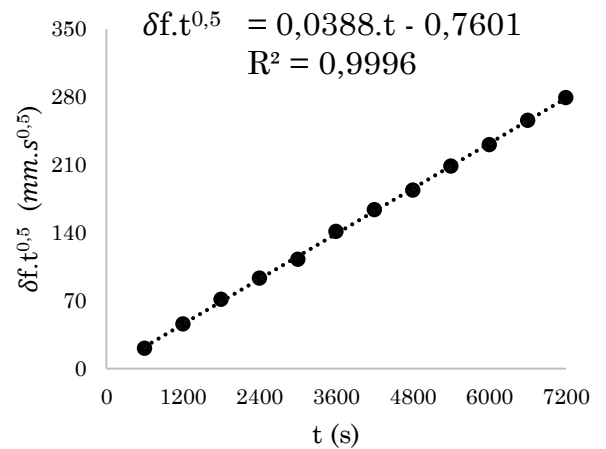
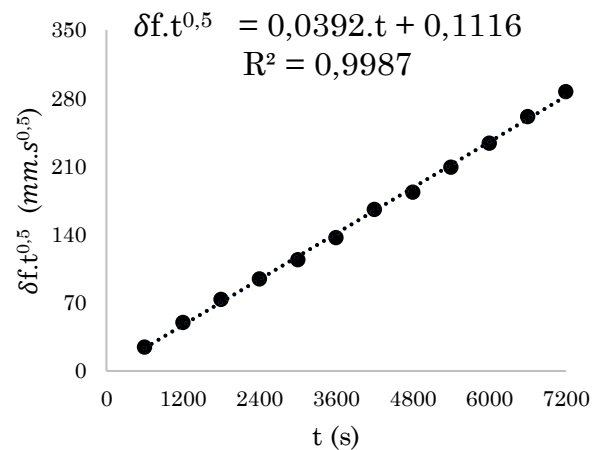
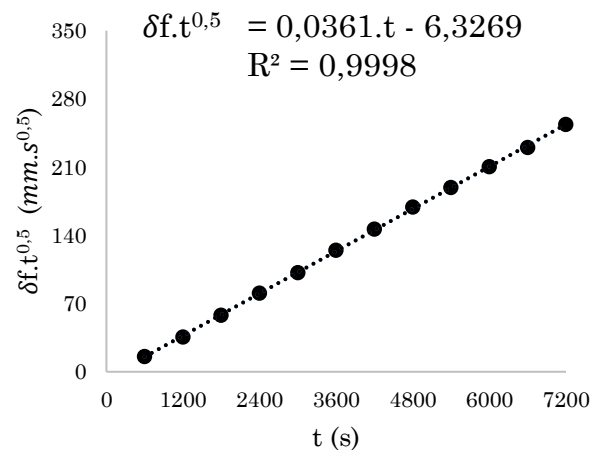
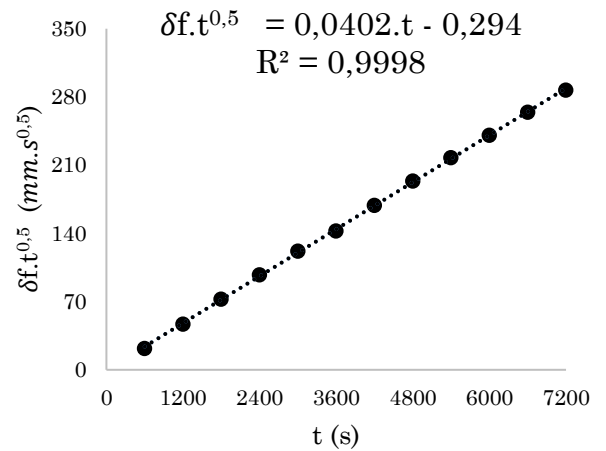
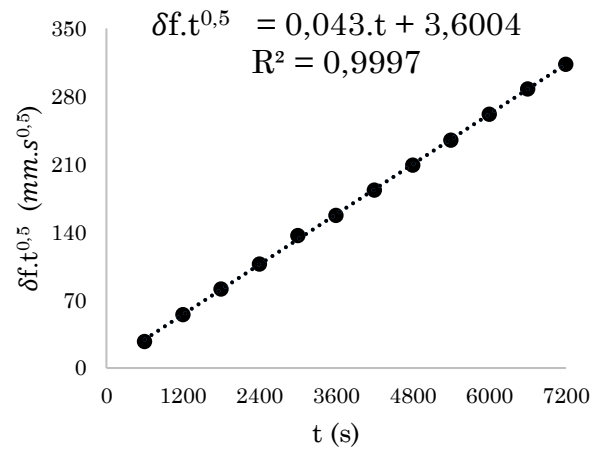
Teste # 15**Teste # 16****Teste # 17**

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,83	0,00680	9,94	-14,62	0,897
1200	1,83	0,00680	10,02	-14,85	1,355
1800	1,83	0,00679	10,00	-14,98	1,713
2400	1,84	0,00680	10,01	-15,11	1,989
3000	1,84	0,00680	10,00	-15,15	2,226
3600	1,83	0,00680	10,00	-15,19	2,377
4200	1,82	0,00680	10,00	-15,24	2,606
4800	1,81	0,00679	10,02	-15,25	2,796
5400	1,80	0,00680	9,99	-15,24	2,964
6000	1,78	0,00680	9,99	-15,30	3,11
6600	1,76	0,00680	10,01	-15,34	3,253
7200	1,76	0,00680	10,00	-15,30	3,382

Teste # 18

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,84	0,00680	9,98	-19,17	1,122
1200	1,84	0,00679	10,01	-19,19	1,594
1800	1,84	0,00679	10,01	-19,30	1,919
2400	1,83	0,00680	10,01	-19,45	2,192
3000	1,83	0,00680	9,99	-19,60	2,495
3600	1,82	0,00680	10,00	-19,72	2,621
4200	1,81	0,00680	9,99	-19,82	2,831
4800	1,80	0,00680	10,00	-19,95	3,02
5400	1,79	0,00680	10,00	-20,03	3,198
6000	1,77	0,00679	10,00	-20,04	3,376
6600	1,76	0,00680	10,01	-20,10	3,543
7200	1,76	0,00680	9,99	-20,18	3,691

Teste # 19

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,85	0,01009	16,04	-9,50	0,924
1200	1,85	0,01008	16,00	-9,81	1,268
1800	1,85	0,01008	16,01	-9,92	1,486
2400	1,84	0,01008	16,00	-9,94	1,699
3000	1,84	0,01008	16,00	-9,95	1,878
3600	1,84	0,01008	16,01	-9,93	2,03
4200	1,83	0,01008	16,00	-9,91	2,178
4800	1,83	0,01008	16,01	-9,89	2,292
5400	1,83	0,01008	16,00	-9,86	2,409
6000	1,82	0,01008	16,02	-9,76	2,61
6600	1,81	0,01008	15,98	-9,73	2,732
7200	1,81	0,01008	16,00	-9,75	2,823

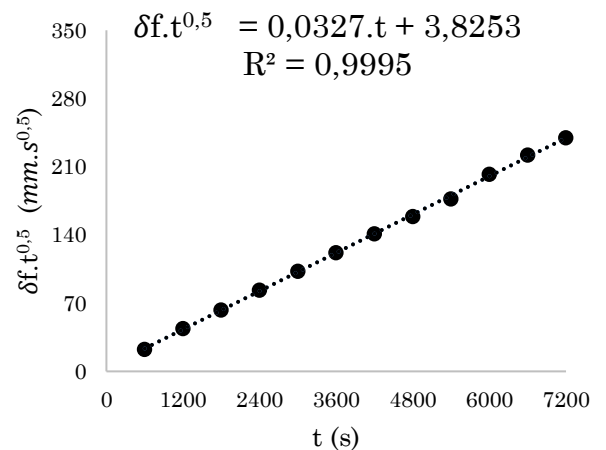
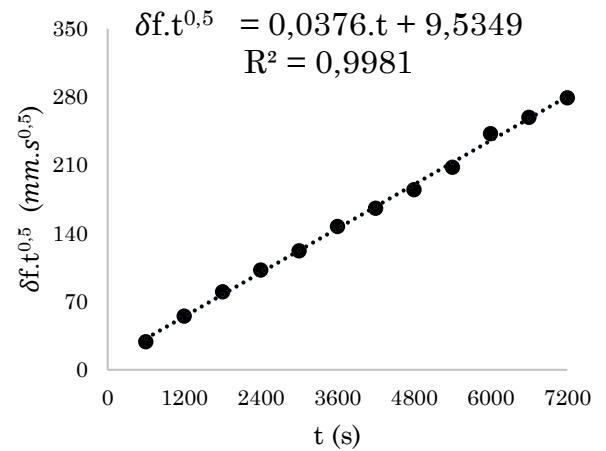
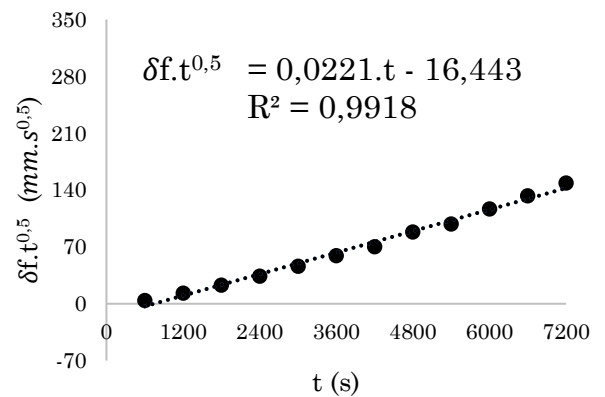
Teste # 20

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,87	0,01008	16,08	-14,68	1,18
1200	1,86	0,01008	15,97	-14,81	1,592
1800	1,86	0,01009	15,97	-14,93	1,892
2400	1,86	0,01008	16,01	-15,23	2,091
3000	1,86	0,01008	16,01	-15,30	2,23
3600	1,86	0,01008	16,01	-15,26	2,451
4200	1,85	0,01008	16,00	-15,17	2,56
4800	1,85	0,01007	16,03	-14,91	2,668
5400	1,85	0,01008	16,00	-14,63	2,829
6000	1,85	0,01008	16,00	-14,70	3,128
6600	1,84	0,01008	16,02	-14,62	3,189
7200	1,84	0,01008	15,97	-14,76	3,289

Teste # 21

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,03	0,00481	4,57	-10,97	0,168
1200	1,03	0,00485	4,73	-10,92	0,384
1800	1,04	0,00477	5,12	-10,90	0,538
2400	1,04	0,00483	4,96	-10,88	0,691
3000	1,04	0,00481	4,98	-10,85	0,845
3600	1,04	0,00482	4,98	-10,84	0,984
4200	1,04	0,00481	5,00	-10,83	1,085
4800	1,04	0,00482	4,99	-10,83	1,277
5400	1,04	0,00481	5,01	-10,85	1,339
6000	1,04	0,00482	5,00	-10,84	1,507
6600	1,03	0,00481	5,00	-10,84	1,637
7200	1,03	0,00482	5,00	-10,83	1,752

Teste # 22

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,07	0,00477	6,48	-15,40	0,443
1200	1,07	0,00485	4,51	-15,42	0,824
1800	1,06	0,00485	4,75	-15,50	1,223
2400	1,06	0,00479	5,03	-15,52	1,296
3000	1,06	0,00482	5,00	-15,53	1,499
3600	1,06	0,00482	4,98	-15,54	1,643
4200	1,06	0,00482	5,00	-15,54	1,855
4800	1,05	0,00482	5,00	-15,55	1,99
5400	1,05	0,00482	5,00	-15,54	2,154
6000	1,05	0,00481	5,00	-15,56	2,212
6600	1,05	0,00482	5,00	-15,57	2,279
7200	1,04	0,00481	5,01	-15,59	2,453

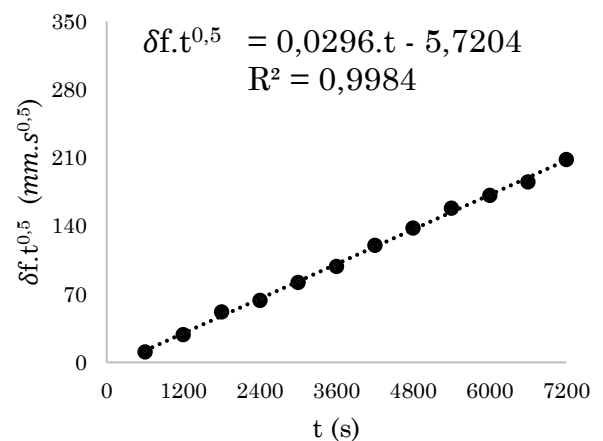
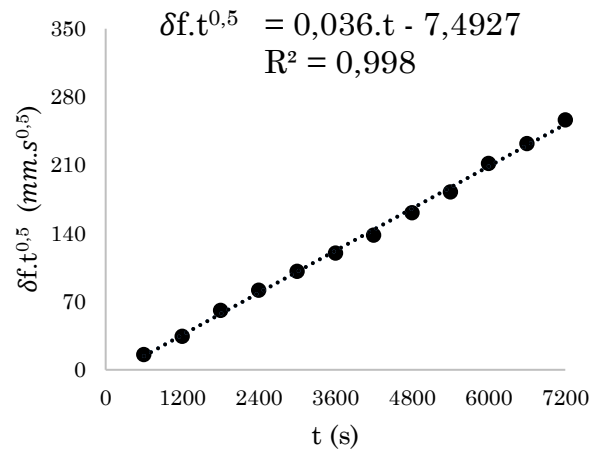
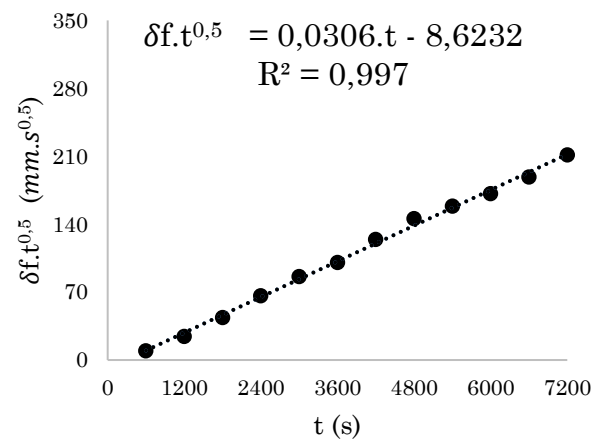
Teste # 23

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,06	0,00482	4,87	-19,54	0,646
1200	1,05	0,00481	4,98	-19,56	0,998
1800	1,05	0,00481	5,01	-19,66	1,439
2400	1,05	0,00482	5,02	-19,88	1,666
3000	1,05	0,00482	4,93	-20,02	1,848
3600	1,05	0,00480	5,00	-20,12	1,996
4200	1,05	0,00482	5,04	-20,33	2,134
4800	1,04	0,00482	4,96	-20,36	2,326
5400	1,04	0,00481	5,02	-20,43	2,484
6000	1,04	0,00482	5,01	-20,63	2,735
6600	1,03	0,00482	4,96	-20,60	2,859
7200	1,03	0,00481	5,05	-20,70	3,021

Teste # 24

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,09	0,00679	9,90	-10,21	0,387
1200	1,09	0,00679	10,02	-10,18	0,703
1800	1,09	0,00679	10,01	-10,23	1,032
2400	1,08	0,00680	10,01	-10,28	1,353
3000	1,08	0,00680	10,00	-10,28	1,573
3600	1,08	0,00680	9,98	-10,32	1,674
4200	1,07	0,00680	10,01	-10,37	1,917
4800	1,07	0,00680	10,00	-10,39	2,104
5400	1,06	0,00680	10,00	-10,41	2,157
6000	1,05	0,00680	10,01	-10,42	2,214
6600	1,04	0,00680	10,00	-10,42	2,324
7200	1,03	0,00680	10,00	-10,39	2,491

Teste # 25

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,09	0,00678	9,99	-14,31	0,664
1200	1,09	0,00679	9,97	-14,25	1,02
1800	1,10	0,00679	9,99	-14,38	1,496
2400	1,10	0,00680	10,00	-14,46	1,794
3000	1,10	0,00680	10,00	-14,50	2,006
3600	1,10	0,00679	10,01	-14,62	2,114
4200	1,09	0,00680	10,00	-14,66	2,337
4800	1,09	0,00679	10,01	-14,71	2,496
5400	1,08	0,00680	10,01	-14,70	2,669
6000	1,08	0,00679	10,00	-14,69	2,862
6600	1,07	0,00680	10,00	-14,70	2,958
7200	1,06	0,00680	10,00	-14,69	3,069

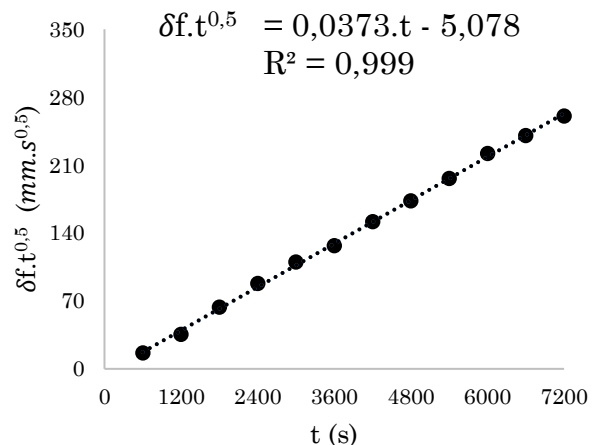
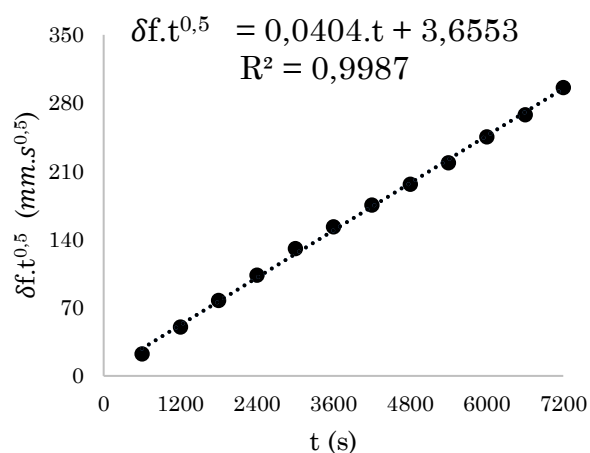
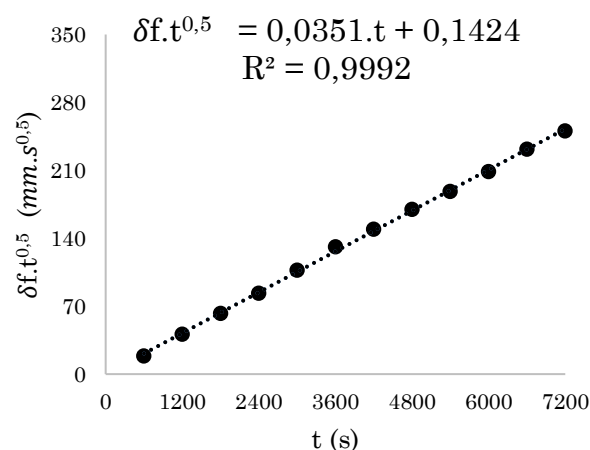
Teste # 26

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,04	0,00679	10,02	-19,55	0,918
1200	1,04	0,00681	9,98	-19,45	1,449
1800	1,04	0,00680	9,97	-19,48	1,822
2400	1,03	0,00679	10,01	-19,50	2,107
3000	1,03	0,00680	10,03	-19,52	2,387
3600	1,03	0,00680	10,01	-19,54	2,549
4200	1,03	0,00680	9,98	-19,55	2,707
4800	1,02	0,00680	10,01	-19,58	2,839
5400	1,01	0,00680	10,00	-19,51	2,977
6000	1,00	0,00679	10,01	-19,48	3,168
6600	0,99	0,00680	10,00	-19,44	3,296
7200	0,98	0,00680	9,98	-19,42	3,488

Teste # 27

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,08	0,01009	16,02	-10,51	0,766
1200	1,08	0,01008	16,01	-10,42	1,19
1800	1,08	0,01008	16,00	-10,34	1,479
2400	1,07	0,01008	16,02	-10,25	1,7
3000	1,07	0,01008	16,00	-10,14	1,956
3600	1,06	0,01008	16,00	-10,17	2,187
4200	1,05	0,01008	16,01	-10,23	2,307
4800	1,05	0,01008	16,00	-10,25	2,452
5400	1,04	0,01008	16,01	-10,24	2,563
6000	1,03	0,01008	15,99	-10,25	2,697
6600	1,02	0,01008	16,00	-10,23	2,852
7200	1,01	0,01008	16,00	-10,19	2,953

Teste # 28

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,16	0,01008	15,98	-12,70	1,013
1200	1,18	0,01008	16,03	-12,64	1,472
1800	1,18	0,01008	16,00	-12,64	1,823
2400	1,19	0,01008	16,01	-12,73	2,1
3000	1,19	0,01008	16,01	-12,77	2,265
3600	1,18	0,01008	15,99	-12,77	2,485
4200	1,16	0,01008	16,01	-12,73	2,671
4800	1,16	0,01008	16,02	-12,54	2,803
5400	1,16	0,01007	16,00	-12,33	2,981
6000	1,15	0,01008	16,00	-12,12	3,113
6600	1,16	0,01008	16,01	-11,94	3,266
7200	1,16	0,01009	16,00	-11,77	3,407

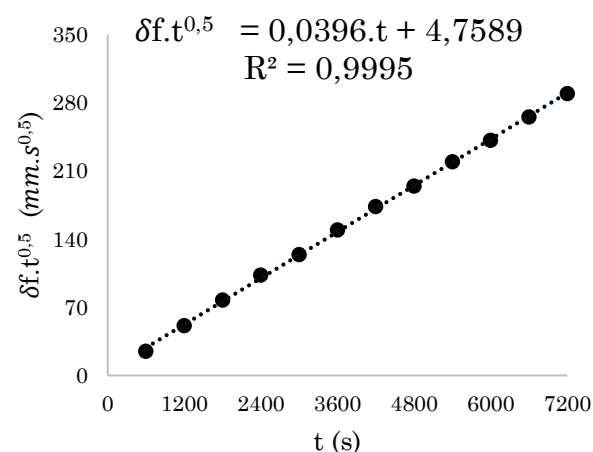
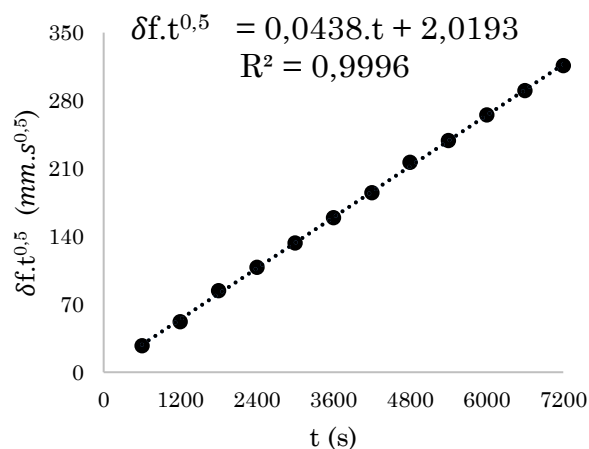
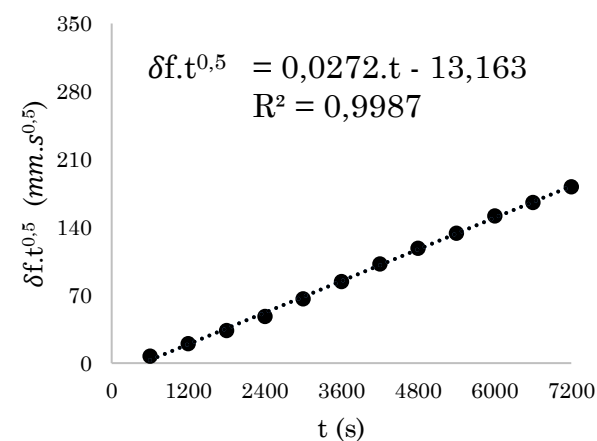
Teste # 29

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,05	0,01009	16,09	-15,42	1,108
1200	1,04	0,01009	16,02	-15,48	1,5
1800	1,04	0,01009	16,02	-15,58	1,979
2400	1,04	0,01008	16,00	-15,60	2,202
3000	1,04	0,01009	15,99	-15,61	2,429
3600	1,04	0,01008	15,99	-15,65	2,652
4200	1,03	0,01008	15,99	-15,66	2,85
4800	1,02	0,01008	16,01	-15,68	3,121
5400	1,02	0,01008	15,99	-15,72	3,247
6000	1,01	0,01008	16,00	-15,68	3,421
6600	1,01	0,01009	16,00	-15,70	3,571
7200	1,00	0,01008	15,99	-15,70	3,721

Teste # 30

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,87	0,00477	4,97	-10,01	0,294
1200	1,87	0,00482	5,00	-9,96	0,577
1800	1,86	0,00482	4,95	-10,09	0,793
2400	1,86	0,00481	4,98	-10,20	0,981
3000	1,86	0,00481	5,00	-10,21	1,211
3600	1,86	0,00481	5,00	-10,17	1,403
4200	1,85	0,00483	5,00	-10,14	1,579
4800	1,85	0,00482	4,96	-10,20	1,709
5400	1,84	0,00481	5,00	-10,20	1,82
6000	1,84	0,00482	4,99	-10,20	1,959
6600	1,83	0,00481	5,01	-10,20	2,037
7200	1,82	0,00482	4,99	-10,20	2,143

Teste # 31

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,88	0,00481	4,85	-14,95	0,659
1200	1,87	0,00481	5,05	-15,07	1,044
1800	1,87	0,00482	4,97	-15,07	1,25
2400	1,87	0,00482	4,98	-15,05	1,444
3000	1,87	0,00482	4,98	-15,05	1,711
3600	1,87	0,00481	5,00	-15,21	1,93
4200	1,86	0,00481	5,01	-15,15	2,144
4800	1,86	0,00482	5,02	-15,14	2,294
5400	1,85	0,00482	4,98	-15,22	2,391
6000	1,85	0,00481	5,01	-15,15	2,444
6600	1,84	0,00481	4,99	-15,15	2,606
7200	1,83	0,00481	5,00	-15,18	2,768

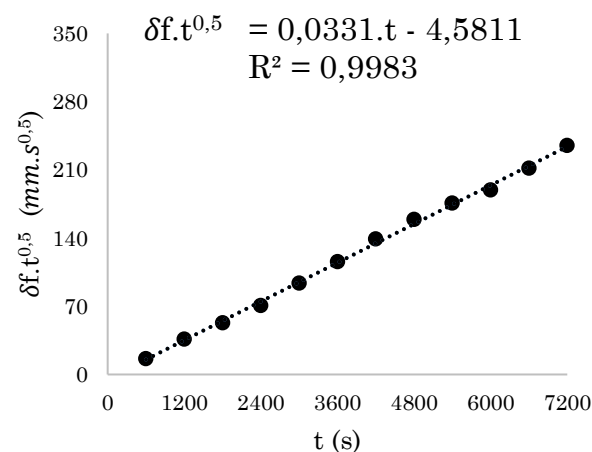
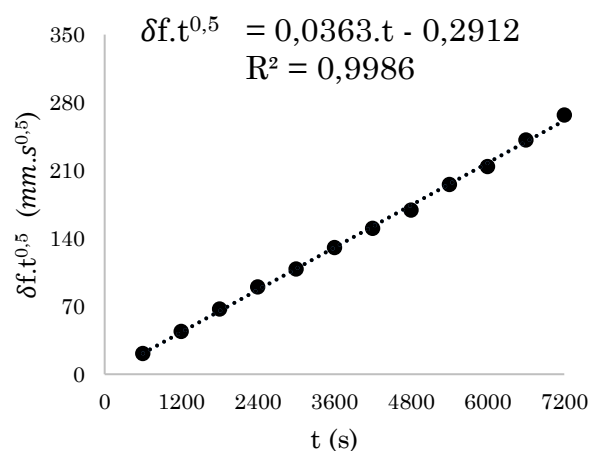
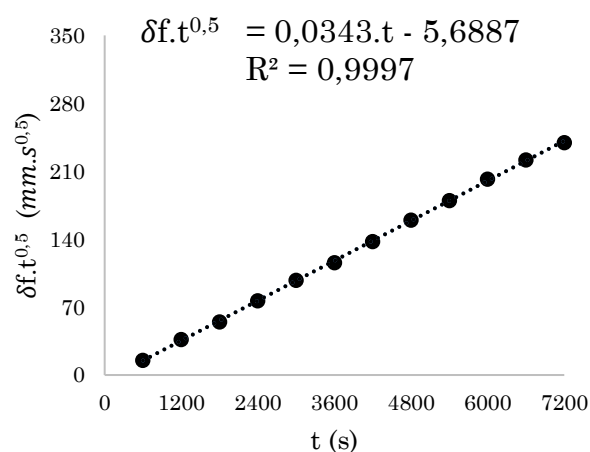
Teste # 32

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,86	0,00482	4,96	-19,67	0,869
1200	1,86	0,00482	4,98	-19,77	1,267
1800	1,86	0,00481	5,02	-19,91	1,579
2400	1,86	0,00482	4,99	-20,03	1,833
3000	1,85	0,00482	5,00	-20,12	1,977
3600	1,85	0,00481	5,01	-20,20	2,174
4200	1,84	0,00482	5,00	-20,28	2,317
4800	1,83	0,00482	5,00	-20,35	2,44
5400	1,82	0,00481	5,02	-20,39	2,658
6000	1,81	0,00482	4,98	-20,52	2,76
6600	1,79	0,00482	4,99	-20,47	2,97
7200	1,78	0,00481	5,02	-20,55	3,146

Teste # 33

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,88	0,00680	9,90	-9,71	0,624
1200	1,88	0,00680	10,00	-9,91	1,059
1800	1,88	0,00679	10,00	-10,05	1,293
2400	1,87	0,00680	10,01	-10,08	1,56
3000	1,87	0,00680	10,00	-10,10	1,786
3600	1,87	0,00680	10,00	-10,13	1,929
4200	1,86	0,00680	10,00	-10,13	2,126
4800	1,85	0,00680	10,01	-10,14	2,307
5400	1,85	0,00680	10,00	-10,14	2,446
6000	1,83	0,00680	10,00	-10,14	2,607
6600	1,82	0,00680	10,00	-10,15	2,73
7200	1,81	0,00680	10,00	-10,14	2,824

Teste # 34

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,88	0,00679	9,90	-13,57	0,855
1200	1,88	0,00681	9,97	-13,50	1,28
1800	1,87	0,00679	9,99	-13,65	1,485
2400	1,87	0,00680	9,98	-13,80	1,728
3000	1,87	0,00679	10,00	-13,98	1,968
3600	1,87	0,00680	10,01	-14,06	2,227
4200	1,86	0,00680	9,99	-14,15	2,432
4800	1,86	0,00680	10,01	-14,29	2,583
5400	1,85	0,00680	9,99	-14,44	2,753
6000	1,84	0,00680	10,02	-14,62	2,912
6600	1,83	0,00680	9,99	-14,74	3,062
7200	1,81	0,00679	10,01	-14,70	3,186

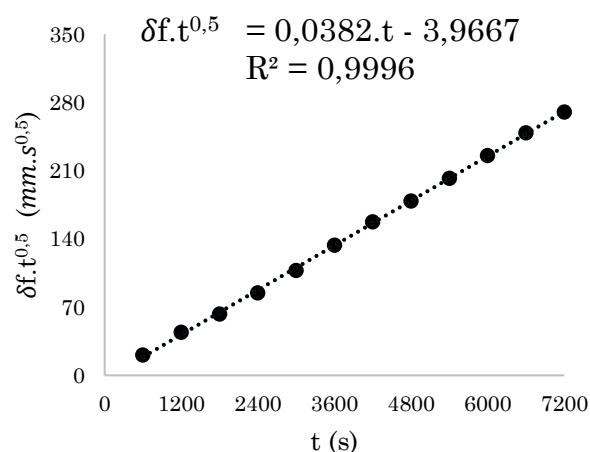
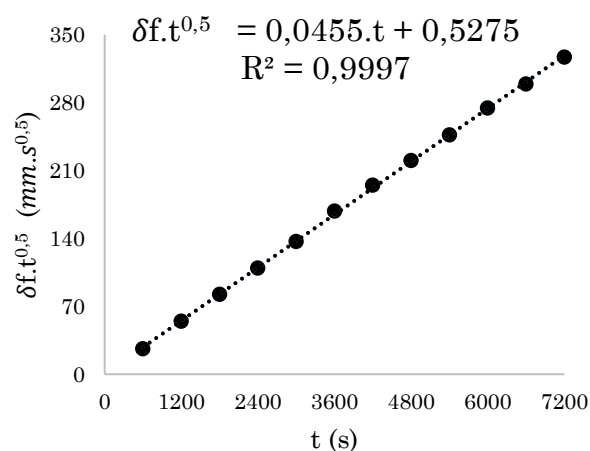
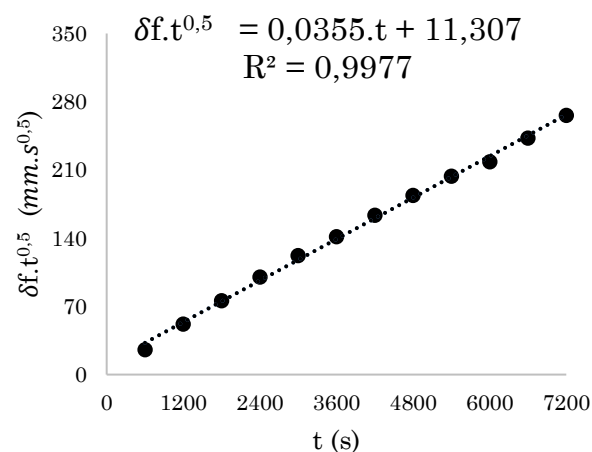
Teste # 35

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,89	0,00679	9,96	-18,78	1,065
1200	1,88	0,00680	9,98	-18,63	1,574
1800	1,88	0,00680	10,01	-18,75	1,938
2400	1,88	0,00680	9,99	-18,85	2,228
3000	1,88	0,00680	10,01	-18,95	2,493
3600	1,87	0,00679	10,02	-19,06	2,802
4200	1,87	0,00680	9,99	-19,14	3,005
4800	1,86	0,00680	10,01	-19,22	3,176
5400	1,84	0,00680	10,00	-19,30	3,354
6000	1,83	0,00680	10,00	-19,35	3,542
6600	1,81	0,00680	10,00	-19,41	3,68
7200	1,80	0,00679	9,99	-19,49	3,851

Teste # 36

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,87	0,01008	16,09	-12,31	1,05
1200	1,87	0,01008	16,02	-12,20	1,493
1800	1,87	0,01008	16,00	-12,09	1,786
2400	1,87	0,01008	16,01	-12,05	2,047
3000	1,86	0,01008	16,00	-12,01	2,23
3600	1,86	0,01008	16,01	-11,95	2,36
4200	1,86	0,01008	16,01	-11,87	2,523
4800	1,85	0,01008	16,00	-11,77	2,653
5400	1,85	0,01008	16,00	-11,68	2,771
6000	1,84	0,01008	16,01	-11,58	2,82
6600	1,83	0,01008	16,00	-11,45	2,987
7200	1,82	0,01008	16,00	-11,35	3,137

Teste # 37

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,90	0,01009	15,99	-12,27	1,005
1200	1,90	0,01008	16,02	-11,91	1,393
1800	1,91	0,01008	16,00	-11,67	1,617
2400	1,91	0,01008	16,00	-11,45	1,813
3000	1,90	0,01008	16,01	-11,26	1,985
3600	1,89	0,01008	16,00	-11,04	2,136
4200	1,89	0,01008	16,01	-10,82	2,275
4800	1,88	0,01008	16,00	-10,60	2,405
5400	1,87	0,01008	16,01	-10,40	2,512
6000	1,86	0,01008	16,01	-10,19	2,614
6600	1,85	0,01008	16,00	-9,98	2,736
7200	1,84	0,01008	16,00	-9,81	2,83

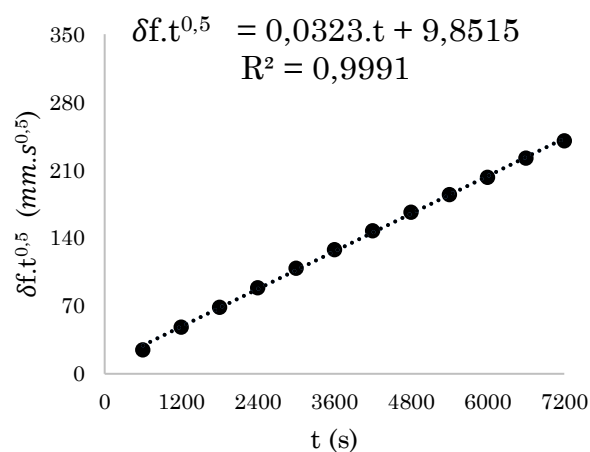
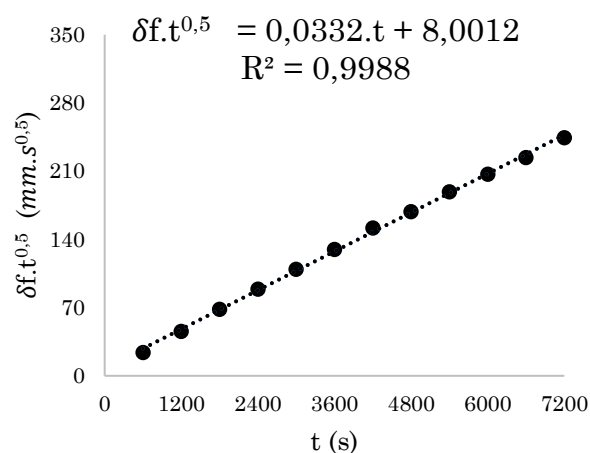
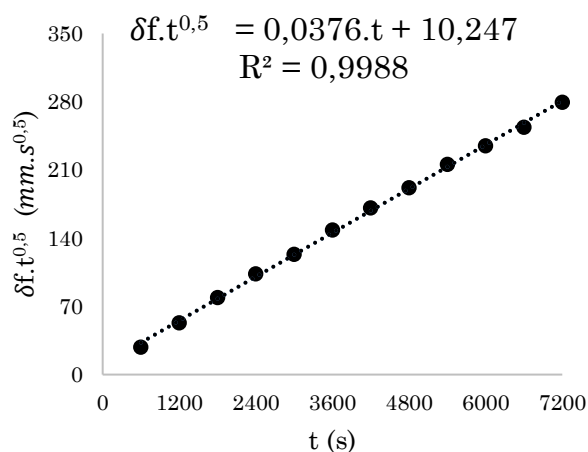
Teste # 38

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,95	0,01008	15,97	-9,26	0,973
1200	1,94	0,01009	15,99	-9,58	1,322
1800	1,94	0,01008	16,00	-9,59	1,614
2400	1,94	0,01008	15,97	-9,79	1,815
3000	1,95	0,01008	16,02	-10,10	1,996
3600	1,94	0,01008	16,01	-10,22	2,164
4200	1,94	0,01009	15,98	-10,33	2,344
4800	1,94	0,01008	16,01	-10,33	2,431
5400	1,94	0,01008	16,01	-10,33	2,57
6000	1,93	0,01008	16,01	-10,34	2,673
6600	1,93	0,01008	16,00	-10,29	2,759
7200	1,93	0,01008	15,99	-10,32	2,882

Teste # 39

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,87	0,01009	16,05	-14,33	1,145
1200	1,87	0,01008	16,01	-14,26	1,535
1800	1,88	0,01008	16,02	-14,29	1,864
2400	1,89	0,01009	16,02	-14,32	2,11
3000	1,89	0,01008	16,00	-14,37	2,254
3600	1,89	0,01008	16,00	-14,39	2,472
4200	1,89	0,01008	16,01	-14,39	2,64
4800	1,90	0,01008	16,01	-14,36	2,767
5400	1,90	0,01008	16,01	-14,31	2,936
6000	1,89	0,01008	16,01	-14,29	3,03
6600	1,89	0,01008	16,01	-14,22	3,124
7200	1,90	0,01008	16,00	-14,18	3,293

Teste # 40

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	0,98	0,00481	4,88	-10,23	0,208
1200	0,98	0,00481	5,01	-10,17	0,435
1800	0,98	0,00482	5,01	-10,16	0,616
2400	0,97	0,00481	5,00	-10,17	0,762
3000	0,97	0,00481	4,99	-10,23	0,958
3600	0,97	0,00482	5,00	-10,24	1,055
4200	0,97	0,00481	5,04	-10,24	1,218
4800	0,97	0,00482	5,00	-10,28	1,332
5400	0,96	0,00481	4,97	-10,30	1,479
6000	0,96	0,00482	5,00	-10,30	1,576
6600	0,95	0,00482	5,02	-10,31	1,769
7200	0,95	0,00482	4,95	-10,39	1,837

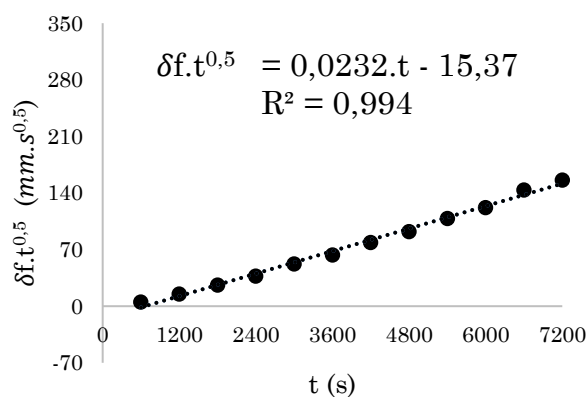
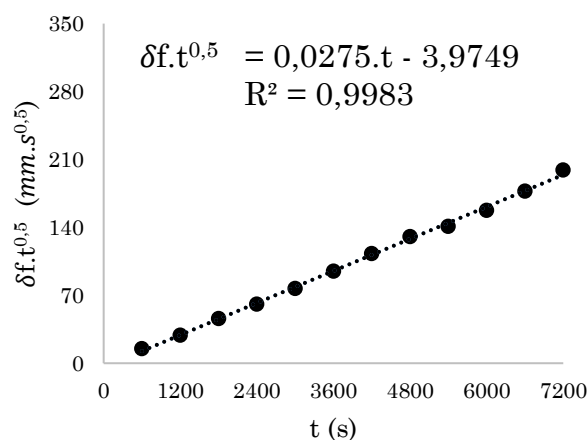
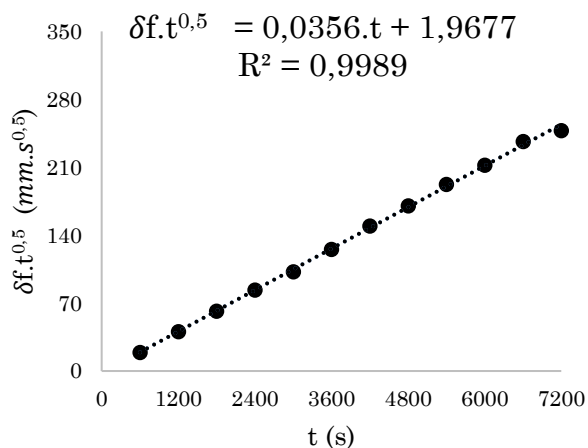
Teste # 41

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,01	0,00481	4,87	-14,55	0,604
1200	1,01	0,00481	5,02	-14,61	0,833
1800	1,01	0,00482	4,96	-14,66	1,081
2400	1,01	0,00481	4,99	-14,71	1,243
3000	1,01	0,00481	4,99	-14,72	1,406
3600	1,00	0,00482	4,99	-14,78	1,58
4200	1,00	0,00482	4,99	-14,78	1,743
4800	1,00	0,00482	5,02	-14,76	1,882
5400	1,00	0,00481	5,00	-14,76	1,917
6000	1,00	0,00482	4,99	-14,77	2,035
6600	1,00	0,00482	4,99	-14,80	2,183
7200	0,99	0,00482	5,01	-14,78	2,345

Teste # 42

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,01	0,00481	4,97	-19,41	0,789
1200	1,03	0,00482	5,01	-19,16	1,172
1800	1,03	0,00482	5,00	-19,13	1,452
2400	1,02	0,00482	5,01	-19,11	1,704
3000	1,02	0,00481	5,01	-19,19	1,866
3600	1,01	0,00482	5,00	-19,26	2,088
4200	1,01	0,00482	5,00	-19,33	2,306
4800	1,00	0,00481	5,01	-19,38	2,459
5400	0,99	0,00482	5,00	-19,44	2,62
6000	0,97	0,00482	4,99	-19,57	2,738
6600	0,95	0,00482	5,00	-19,69	2,912
7200	0,94	0,00481	5,00	-19,80	2,921

Teste # 43

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	0,91	0,00689	9,91	-10,49	0,402
1200	0,87	0,00692	10,02	-10,46	0,725
1800	0,84	0,00693	10,02	-10,49	1,066
2400	0,83	0,00691	10,02	-10,50	1,358
3000	1,09	0,00693	9,98	-10,43	1,608
3600	1,12	0,00691	10,02	-10,43	1,809
4200	1,07	0,00692	10,02	-10,43	1,974
4800	1,02	0,00692	10,01	-10,45	2,284
5400	0,98	0,00692	10,03	-10,44	2,381
6000	0,92	0,00693	10,02	-10,44	2,576
6600	0,89	0,00690	9,97	-10,45	2,735
7200	0,90	0,00695	10,06	-10,45	2,844

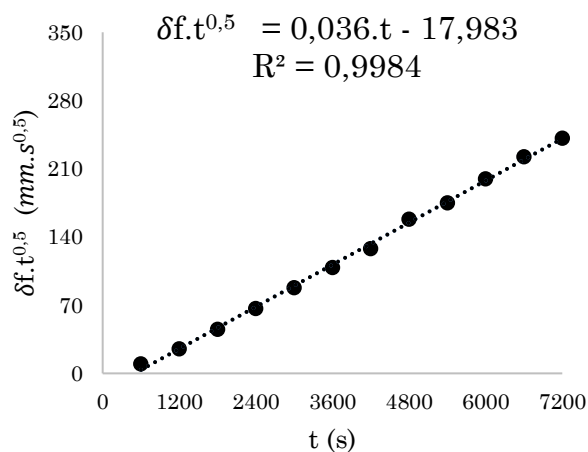
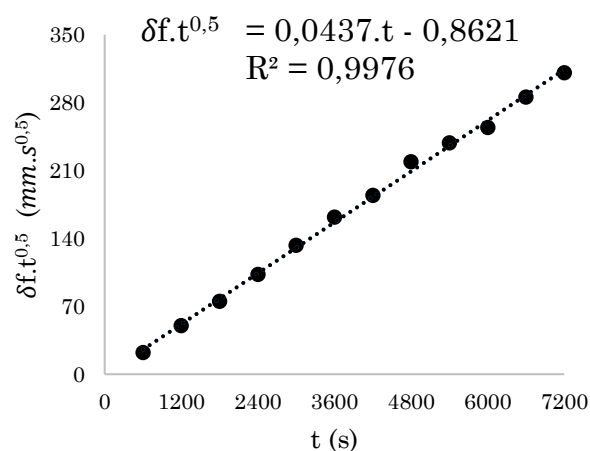
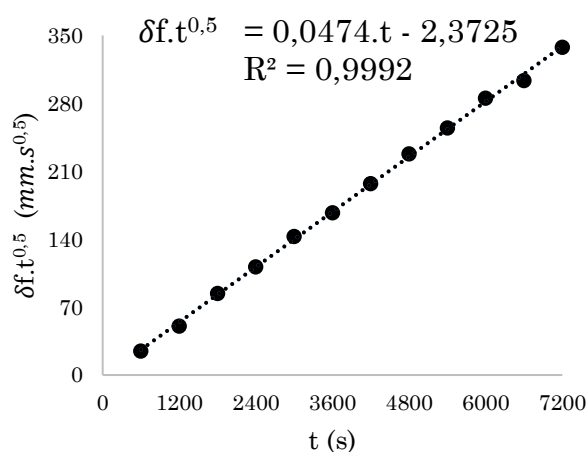
Teste # 44

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,08	0,00680	9,95	-15,84	0,9034
1200	1,08	0,00680	9,97	-15,74	1,44
1800	1,07	0,00679	10,01	-15,72	1,77
2400	1,07	0,00680	10,01	-15,82	2,096
3000	1,07	0,00679	9,99	-16,00	2,426
3600	1,07	0,00680	9,99	-16,13	2,696
4200	1,07	0,00679	10,00	-16,14	2,843
4800	1,06	0,00679	10,00	-16,16	3,159
5400	1,05	0,00680	9,99	-16,17	3,242
6000	1,04	0,00680	9,99	-16,19	3,279
6600	1,03	0,00680	10,00	-16,17	3,513
7200	1,01	0,00680	10,00	-16,15	3,659

Teste # 45

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,10	0,00704	10,02	-18,39	1,01
1200	1,10	0,00705	9,99	-18,13	1,462
1800	1,09	0,00704	10,00	-18,02	1,986
2400	1,08	0,00704	10,00	-18,05	2,28
3000	1,08	0,00704	10,01	-18,12	2,611
3600	1,07	0,00704	10,01	-18,16	2,789
4200	1,06	0,00704	10,01	-18,24	3,044
4800	1,05	0,00704	10,01	-18,35	3,29
5400	1,04	0,00704	9,99	-18,46	3,467
6000	1,03	0,00704	9,99	-18,52	3,684
6600	1,01	0,00704	9,99	-18,54	3,737
7200	0,98	0,00704	10,02	-18,60	3,982

Teste # 46

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,08	0,01007	16,01	-8,80	0,736
1200	1,08	0,01009	15,97	-8,90	1,238
1800	1,08	0,01007	16,02	-9,09	1,576
2400	1,08	0,01008	16,00	-9,15	1,736
3000	1,07	0,01008	16,00	-9,13	1,956
3600	1,07	0,01008	16,00	-9,19	2,124
4200	1,06	0,01008	16,00	-9,16	2,271
4800	1,06	0,01009	15,99	-9,19	2,367
5400	1,05	0,01007	16,00	-9,15	2,527
6000	1,05	0,01008	16,01	-9,22	2,664
6600	1,03	0,01009	16,00	-9,14	2,755
7200	1,02	0,01009	15,99	-9,14	2,883

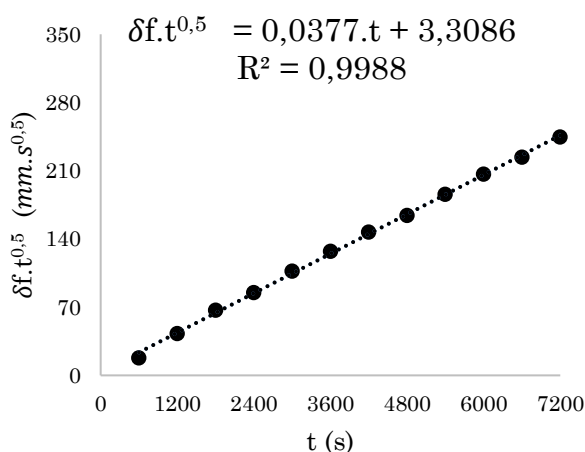
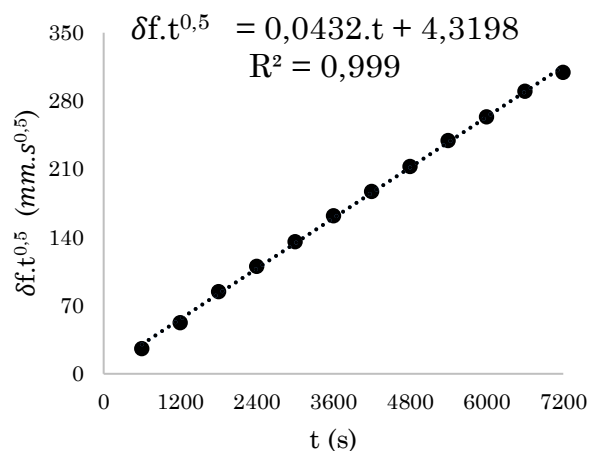
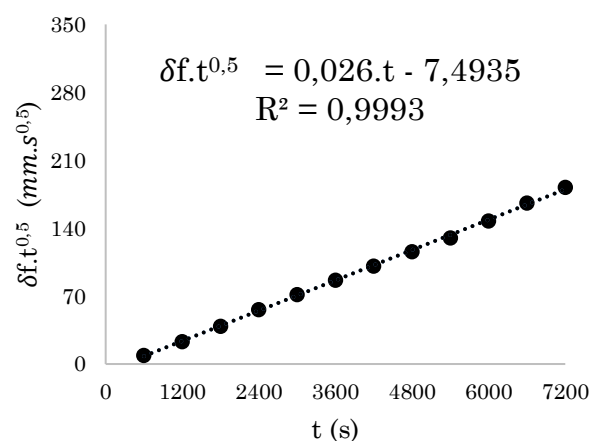
Teste # 47

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,09	0,01009	16,02	-14,71	1,055
1200	1,09	0,01008	16,00	-14,43	1,518
1800	1,09	0,01008	16,00	-14,32	1,986
2400	1,09	0,01008	16,03	-14,26	2,252
3000	1,09	0,01008	16,00	-14,24	2,479
3600	1,08	0,01008	16,00	-14,24	2,706
4200	1,07	0,01008	15,99	-14,24	2,891
4800	1,07	0,01008	16,00	-14,25	3,071
5400	1,06	0,01008	16,00	-14,23	3,259
6000	1,05	0,01009	15,99	-14,27	3,405
6600	1,04	0,01008	16,00	-14,34	3,572
7200	1,03	0,01008	15,99	-14,30	3,645

Teste # 48

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,76	0,00480	4,96	-10,55	0,37
1200	1,76	0,00482	4,98	-10,52	0,67
1800	1,75	0,00482	4,97	-10,67	0,922
2400	1,75	0,00481	5,00	-10,71	1,144
3000	1,75	0,00481	4,99	-10,73	1,305
3600	1,75	0,00481	4,98	-10,75	1,444
4200	1,74	0,00482	4,99	-10,76	1,561
4800	1,74	0,00482	5,00	-10,81	1,674
5400	1,74	0,00482	4,99	-10,82	1,77
6000	1,74	0,00481	5,04	-10,78	1,905
6600	1,74	0,00481	4,99	-10,76	2,044
7200	1,73	0,00482	5,01	-10,74	2,148

Teste # 49

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,76	0,00481	4,88	-15,23	0,613
1200	1,76	0,00481	4,98	-15,28	0,975
1800	1,76	0,00482	4,98	-15,36	1,318
2400	1,76	0,00481	4,97	-15,43	1,597
3000	1,75	0,00481	5,00	-15,44	1,736
3600	1,75	0,00482	5,00	-15,46	1,958
4200	1,74	0,00482	4,99	-15,48	2,201
4800	1,74	0,00481	4,99	-15,52	2,306
5400	1,74	0,00481	5,01	-15,51	2,441
6000	1,73	0,00482	5,00	-15,49	2,58
6600	1,72	0,00482	5,01	-15,50	2,698
7200	1,71	0,00481	4,98	-15,52	2,872

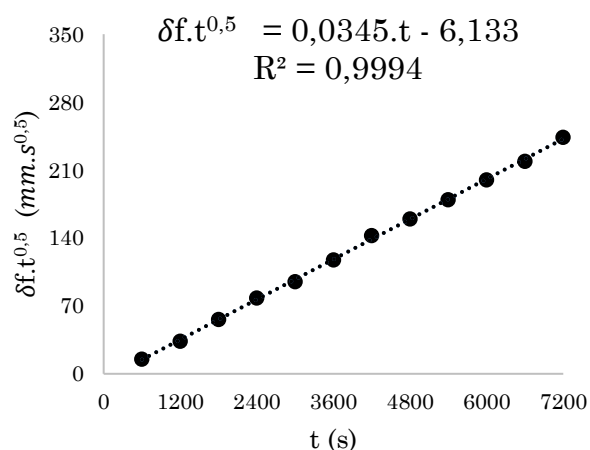
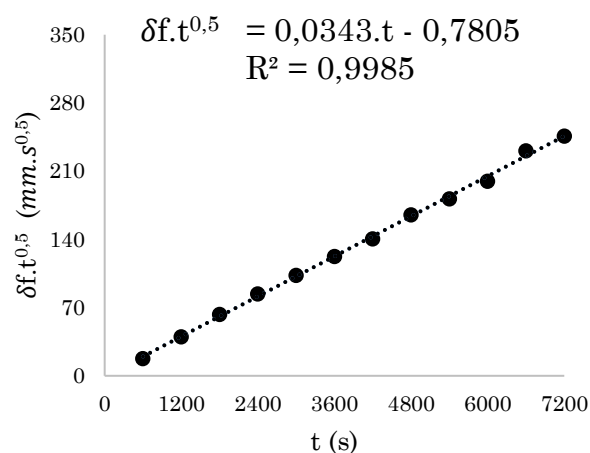
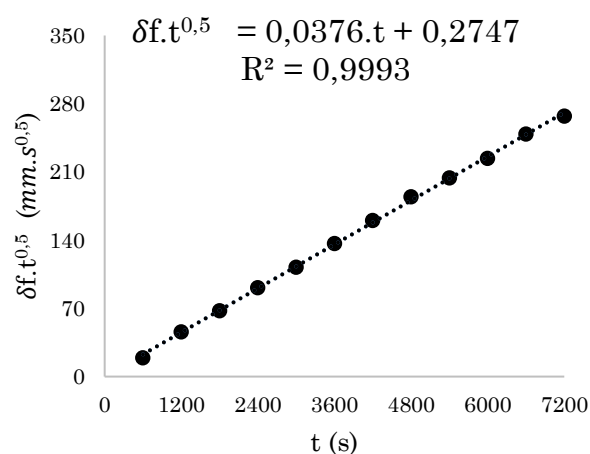
Teste # 50

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,77	0,00478	5,98	-18,30	0,721
1200	1,77	0,00486	4,69	-17,90	1,154
1800	1,77	0,00480	5,00	-17,81	1,485
2400	1,76	0,00482	4,99	-17,78	1,718
3000	1,76	0,00481	5,02	-17,65	1,883
3600	1,76	0,00481	4,98	-17,58	2,04
4200	1,76	0,00482	4,98	-17,54	2,168
4800	1,76	0,00481	5,01	-17,48	2,384
5400	1,76	0,00482	5,01	-17,41	2,473
6000	1,75	0,00481	5,00	-17,43	2,579
6600	1,75	0,00482	4,98	-17,49	2,842
7200	1,75	0,00481	5,01	-17,51	2,901

Teste # 51

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,78	0,00476	6,00	-18,15	0,795
1200	1,78	0,00489	4,74	-17,80	1,329
1800	1,78	0,00479	4,96	-17,73	1,597
2400	1,78	0,00482	5,00	-17,79	1,861
3000	1,77	0,00482	4,99	-17,77	2,053
3600	1,77	0,00482	4,99	-17,89	2,279
4200	1,77	0,00481	5,00	-17,93	2,471
4800	1,76	0,00482	5,00	-17,98	2,662
5400	1,76	0,00481	5,00	-18,04	2,777
6000	1,75	0,00481	5,02	-18,09	2,892
6600	1,74	0,00481	4,99	-18,16	3,063
7200	1,73	0,00481	5,02	-18,20	3,152

Teste # 52

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,78	0,00680	9,95	-10,32	0,529
1200	1,78	0,00680	10,02	-10,44	0,88
1800	1,78	0,00679	10,02	-10,48	1,246
2400	1,78	0,00679	9,98	-10,53	1,501
3000	1,77	0,00681	9,94	-10,56	1,648
3600	1,77	0,00680	10,02	-10,63	1,871
4200	1,77	0,00679	10,03	-10,65	2,027
4800	1,76	0,00679	9,99	-10,66	2,274
5400	1,76	0,00680	9,97	-10,69	2,465
6000	1,75	0,00680	10,02	-10,67	2,576
6600	1,74	0,00679	10,03	-10,69	2,688
7200	1,73	0,00679	9,99	-10,69	2,807

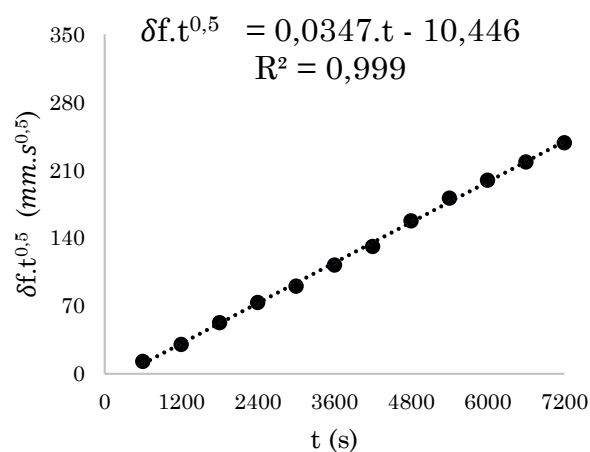
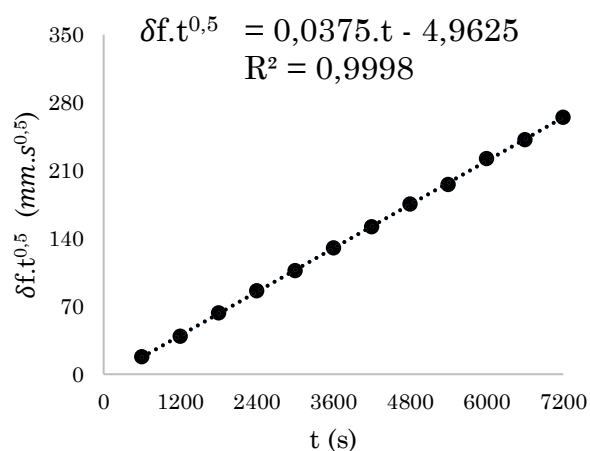
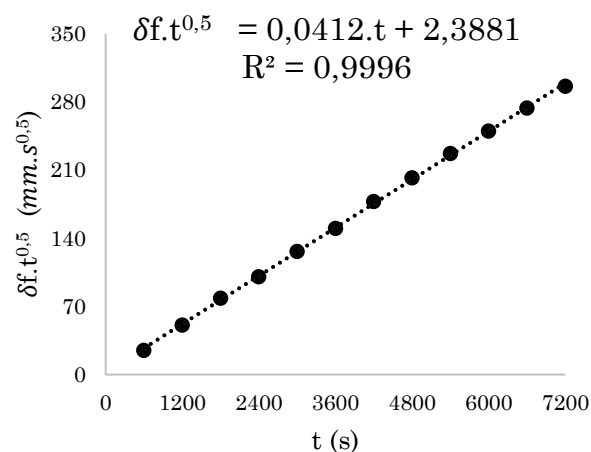
Teste # 53

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,87	0,00677	9,96	-13,20	0,728
1200	1,87	0,00679	9,99	-12,89	1,126
1800	1,87	0,00681	9,99	-12,88	1,484
2400	1,86	0,00680	9,99	-12,95	1,75
3000	1,86	0,00679	10,00	-13,04	1,95
3600	1,85	0,00679	10,00	-13,17	2,169
4200	1,85	0,00680	9,99	-13,29	2,343
4800	1,84	0,00680	10,00	-13,43	2,531
5400	1,83	0,00679	10,01	-13,56	2,657
6000	1,82	0,00679	10,00	-13,69	2,867
6600	1,81	0,00680	9,99	-13,85	2,972
7200	1,79	0,00680	9,99	-13,98	3,12

Teste # 54

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,87	0,00679	9,97	-15,11	1,016
1200	1,86	0,00679	10,00	-15,02	1,469
1800	1,86	0,00679	9,99	-15,25	1,849
2400	1,86	0,00680	9,99	-15,49	2,049
3000	1,86	0,00679	9,99	-15,53	2,311
3600	1,86	0,00680	10,01	-15,57	2,503
4200	1,85	0,00679	10,01	-15,60	2,743
4800	1,85	0,00680	9,99	-15,62	2,913
5400	1,84	0,00680	9,99	-15,60	3,087
6000	1,83	0,00679	10,01	-15,64	3,227
6600	1,82	0,00679	10,01	-15,63	3,366
7200	1,81	0,00680	10,00	-15,66	3,488

Teste # 55

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,74	0,00679	10,01	-17,57	1,024
1200	1,73	0,00680	9,98	-17,20	1,492
1800	1,73	0,00680	9,98	-17,02	1,882
2400	1,74	0,00680	10,00	-16,96	2,175
3000	1,74	0,00679	10,01	-16,98	2,429
3600	1,74	0,00679	10,01	-17,02	2,585
4200	1,74	0,00679	10,00	-17,06	2,78
4800	1,73	0,00680	10,01	-17,08	2,975
5400	1,72	0,00680	10,00	-17,09	3,131
6000	1,71	0,00680	10,00	-17,17	3,336
6600	1,70	0,00680	9,99	-17,15	3,482
7200	1,68	0,00680	9,99	-17,16	3,629

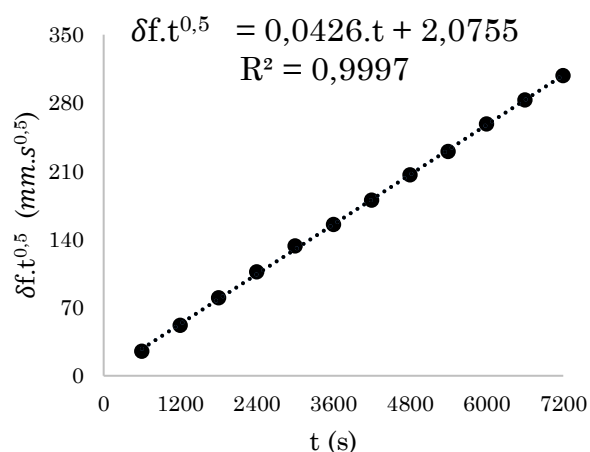
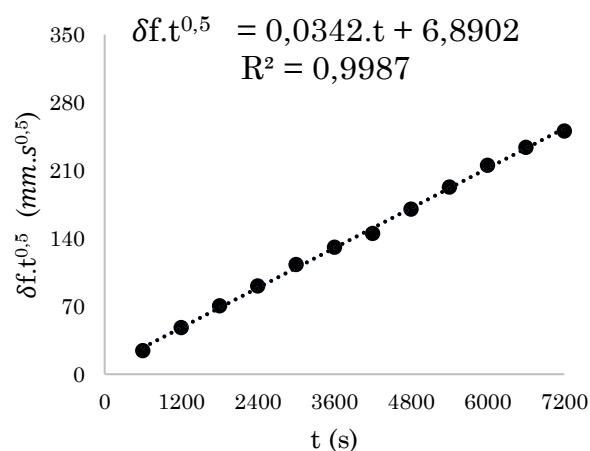
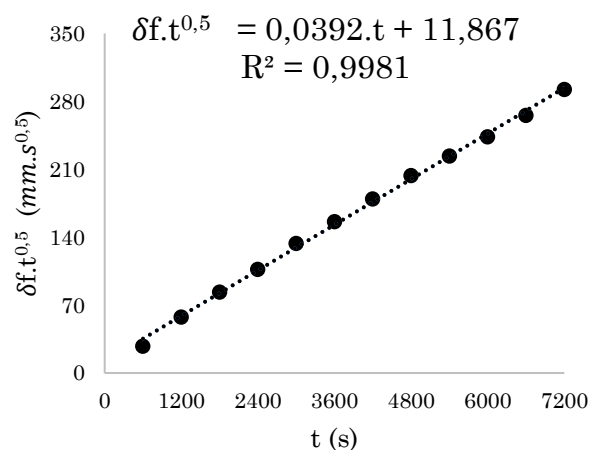
Teste # 56

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,79	0,01010	16,40	-11,37	0,994
1200	1,79	0,01009	15,95	-11,49	1,381
1800	1,79	0,01008	16,01	-11,54	1,656
2400	1,78	0,01008	16,06	-11,50	1,856
3000	1,78	0,01008	15,97	-11,45	2,06
3600	1,78	0,01009	15,97	-11,51	2,179
4200	1,78	0,01008	16,03	-11,52	2,235
4800	1,78	0,01008	16,01	-11,48	2,455
5400	1,78	0,01008	16,03	-11,50	2,622
6000	1,78	0,01009	15,95	-11,50	2,778
6600	1,77	0,01009	16,00	-11,49	2,878
7200	1,77	0,01008	16,05	-11,55	2,954

Teste # 57

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,79	0,01009	16,06	-15,21	1,139
1200	1,79	0,01008	15,99	-14,74	1,665
1800	1,79	0,01009	15,97	-14,52	1,971
2400	1,79	0,01009	15,98	-14,42	2,184
3000	1,79	0,01007	16,02	-14,43	2,439
3600	1,79	0,01008	16,02	-14,41	2,604
4200	1,79	0,01008	15,98	-14,44	2,77
4800	1,79	0,01009	15,97	-14,40	2,94
5400	1,78	0,01008	16,00	-14,37	3,046
6000	1,78	0,01007	16,04	-14,46	3,1438
6600	1,78	0,01008	15,98	-14,42	3,271
7200	1,78	0,01009	15,98	-14,38	3,445

Teste # 58

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,13	0,00479	4,81	-9,86	0,206
1200	1,13	0,00481	5,00	-9,83	0,457
1800	1,13	0,00482	4,99	-9,85	0,649
2400	1,13	0,00482	4,98	-9,88	0,799
3000	1,13	0,00482	4,99	-9,91	1,012
3600	1,12	0,00481	4,99	-9,92	1,183
4200	1,12	0,00482	4,99	-9,93	1,307
4800	1,12	0,00482	4,98	-9,93	1,41
5400	1,12	0,00481	5,01	-9,95	1,547
6000	1,13	0,00482	5,01	-9,94	1,636
6600	1,12	0,00481	5,01	-9,93	1,773
7200	1,11	0,00482	5,00	-9,94	1,867

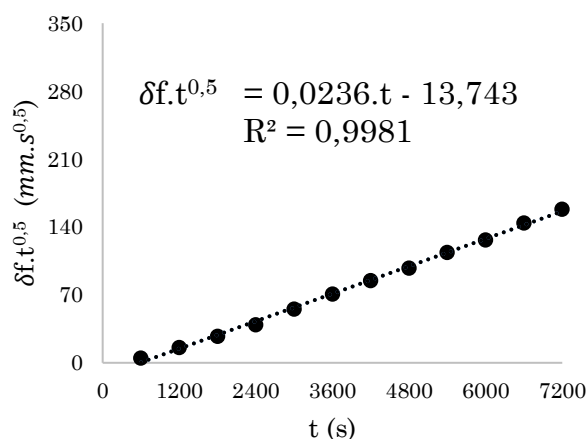
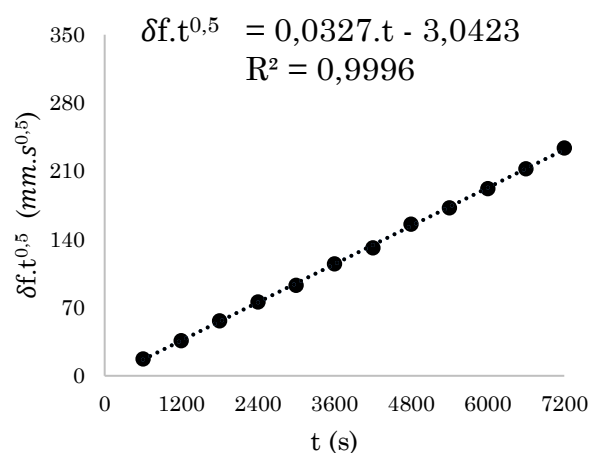
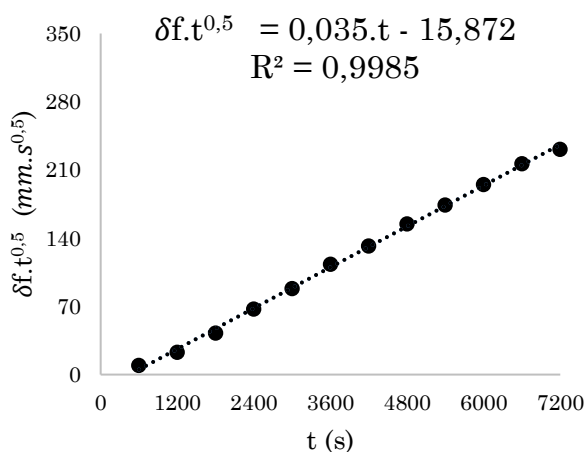
Teste # 59

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,17	0,00481	4,88	-15,16	0,707
1200	1,17	0,00480	5,02	-15,23	1,047
1800	1,17	0,00482	4,98	-15,30	1,332
2400	1,17	0,00482	4,99	-15,37	1,549
3000	1,16	0,00482	4,99	-15,40	1,698
3600	1,16	0,00482	4,99	-15,43	1,915
4200	1,16	0,00481	4,98	-15,46	2,03
4800	1,16	0,00482	4,99	-15,44	2,247
5400	1,15	0,00481	5,01	-15,45	2,345
6000	1,15	0,00482	5,00	-15,46	2,481
6600	1,15	0,00481	5,00	-15,48	2,617
7200	1,15	0,00482	4,98	-15,48	2,755

Teste # 60

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,14	0,00678	9,72	-10,26	0,384
1200	1,13	0,00677	10,02	-10,23	0,658
1800	1,14	0,00680	9,99	-10,35	1,003
2400	1,13	0,00680	10,00	-10,47	1,375
3000	1,14	0,00680	10,01	-10,53	1,614
3600	1,14	0,00679	10,00	-10,55	1,888
4200	1,14	0,00680	10,01	-10,55	2,037
4800	1,14	0,00680	10,00	-10,55	2,232
5400	1,13	0,00679	10,01	-10,57	2,37
6000	1,13	0,00679	10,00	-10,56	2,519
6600	1,12	0,00680	10,01	-10,57	2,664
7200	1,11	0,00679	9,99	-10,58	2,724

Teste # 61

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,16	0,00680	9,96	-14,58	0,747
1200	1,15	0,00680	9,97	-14,73	1,315
1800	1,16	0,00679	10,00	-14,84	1,669
2400	1,16	0,00680	10,01	-14,90	1,938
3000	1,15	0,00679	10,02	-14,94	2,173
3600	1,15	0,00680	10,02	-14,99	2,391
4200	1,15	0,00680	9,98	-15,01	2,528
4800	1,15	0,00679	10,02	-15,06	2,694
5400	1,14	0,00680	9,99	-15,06	2,869
6000	1,13	0,00680	10,00	-15,09	2,967
6600	1,12	0,00680	10,00	-15,08	3,057
7200	1,11	0,00680	10,00	-15,09	3,138

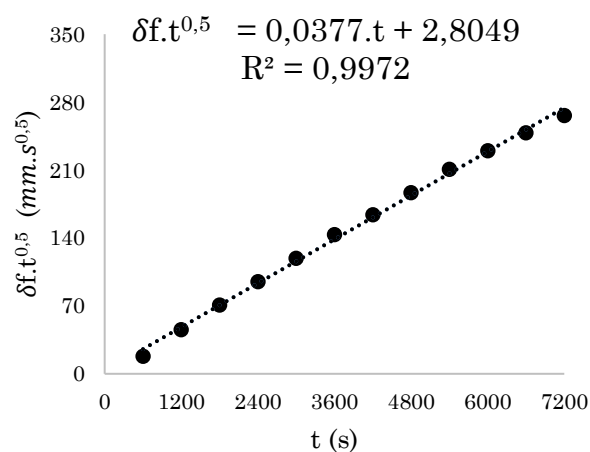
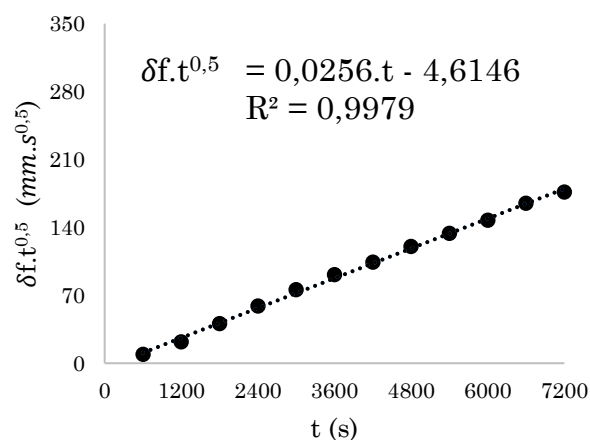
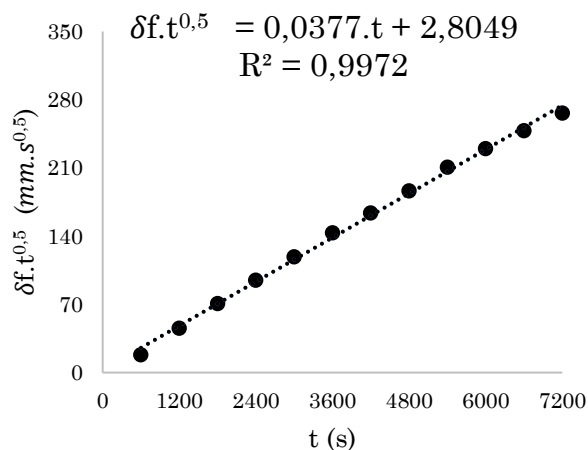
Teste # 62

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,89	0,00481	4,92	-9,04	0,363
1200	1,89	0,00482	4,97	-9,00	0,632
1800	1,89	0,00481	4,98	-9,13	0,957
2400	1,88	0,00481	4,99	-9,28	1,2
3000	1,88	0,00481	4,99	-9,36	1,38
3600	1,87	0,00482	4,99	-9,49	1,517
4200	1,87	0,00482	5,00	-9,58	1,606
4800	1,87	0,00482	5,01	-9,61	1,734
5400	1,86	0,00482	4,98	-9,66	1,82
6000	1,85	0,00482	5,00	-9,72	1,901
6600	1,84	0,00481	5,02	-9,66	2,028
7200	1,83	0,00481	4,99	-9,66	2,076

Teste # 63

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,16	0,00680	9,96	-14,58	0,747
1200	1,15	0,00680	9,97	-14,73	1,315
1800	1,16	0,00679	10,00	-14,84	1,669
2400	1,16	0,00680	10,01	-14,90	1,938
3000	1,15	0,00679	10,02	-14,94	2,173
3600	1,15	0,00680	10,02	-14,99	2,391
4200	1,15	0,00680	9,98	-15,01	2,528
4800	1,15	0,00679	10,02	-15,06	2,694
5400	1,14	0,00680	9,99	-15,06	2,869
6000	1,13	0,00680	10,00	-15,09	2,967
6600	1,12	0,00680	10,00	-15,08	3,057
7200	1,11	0,00680	10,00	-15,09	3,138

Teste # 64

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,89	0,00481	4,95	-14,93	0,785
1200	1,88	0,00482	4,95	-15,19	1,203
1800	1,88	0,00482	5,01	-15,36	1,475
2400	1,88	0,00482	4,98	-15,43	1,714
3000	1,88	0,00481	4,99	-15,51	1,893
3600	1,87	0,00482	4,99	-15,56	2,111
4200	1,87	0,00482	5,00	-15,63	2,281
4800	1,87	0,00481	5,00	-15,68	2,452
5400	1,86	0,00482	5,00	-15,71	2,554
6000	1,86	0,00481	5,00	-15,69	2,721
6600	1,85	0,00482	4,98	-15,77	2,836
7200	1,84	0,00481	5,01	-15,75	2,994

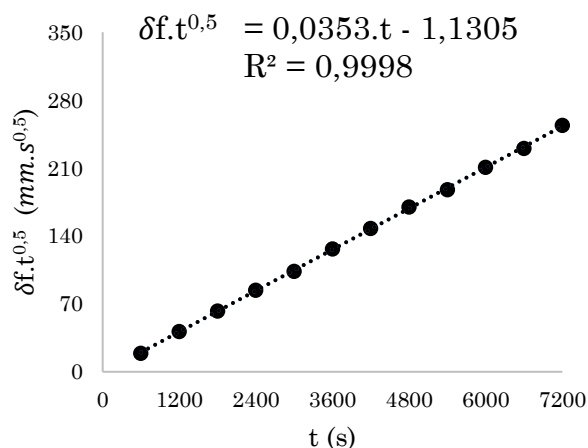
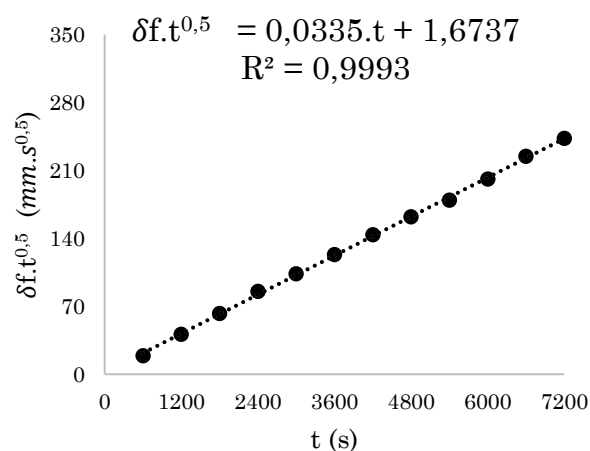
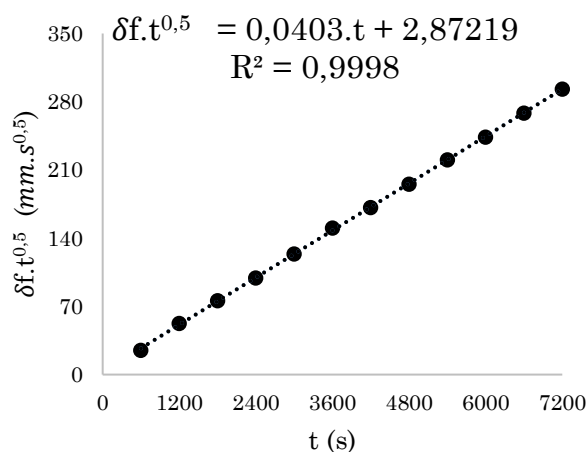
Teste # 65

Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,94	0,00677	9,94	-10,18	0,777
1200	1,93	0,00679	9,99	-10,28	1,187
1800	1,93	0,00679	9,99	-10,35	1,473
2400	1,93	0,00680	10,00	-10,38	1,738
3000	1,92	0,00679	10,00	-10,40	1,887
3600	1,92	0,00680	10,00	-10,38	2,0537
4200	1,92	0,00680	10,00	-10,37	2,217
4800	1,92	0,00679	10,00	-10,36	2,34
5400	1,91	0,00680	10,00	-10,35	2,438
6000	1,90	0,00681	10,00	-10,40	2,596
6600	1,89	0,00679	9,96	-10,39	2,762
7200	1,88	0,00680	10,00	-10,42	2,861

Teste # 66

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,92	0,00681	9,99	-14,89	1,012
1200	1,92	0,00680	9,96	-14,84	1,516
1800	1,92	0,00679	10,01	-14,95	1,789
2400	1,92	0,00679	10,01	-15,18	2,024
3000	1,91	0,00680	9,98	-15,42	2,263
3600	1,91	0,00681	10,00	-15,34	2,506
4200	1,90	0,00680	9,98	-15,42	2,647
4800	1,89	0,00679	10,01	-15,52	2,822
5400	1,88	0,00678	10,02	-15,62	3,001
6000	1,86	0,00681	9,99	-15,62	3,146
6600	1,85	0,00680	9,99	-15,63	3,304
7200	1,83	0,00680	9,98	-15,64	3,454

Teste # 67

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,93	0,01007	16,00	-9,13	0,8539
1200	1,93	0,01009	15,99	-9,23	1,17
1800	1,93	0,01008	16,00	-9,32	1,405
2400	1,93	0,01008	16,00	-9,37	1,652
3000	1,93	0,01008	16,00	-9,43	1,78
3600	1,93	0,01008	16,00	-9,46	1,896
4200	1,93	0,01008	16,01	-9,46	2,045
4800	1,93	0,01008	16,00	-9,48	2,22
5400	1,92	0,01008	16,00	-9,47	2,277
6000	1,92	0,01008	16,00	-9,48	2,348
6600	1,92	0,01008	16,00	-9,45	2,468
7200	1,91	0,01008	16,02	-9,38	2,587

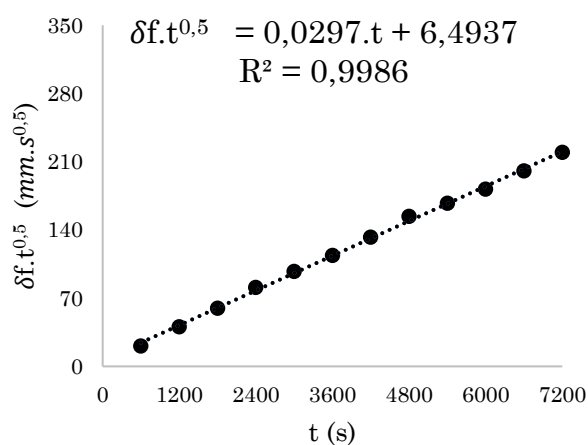
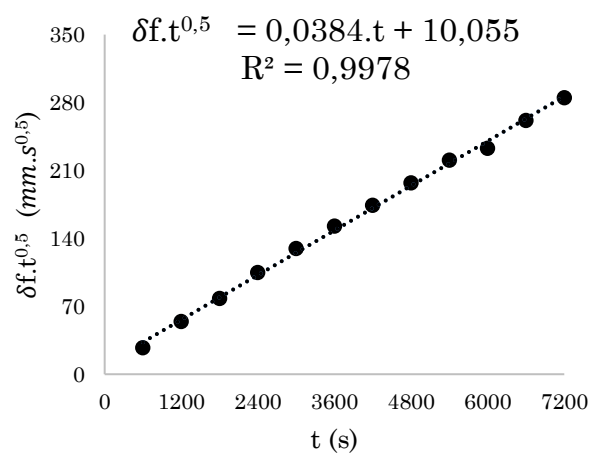
Teste # 68

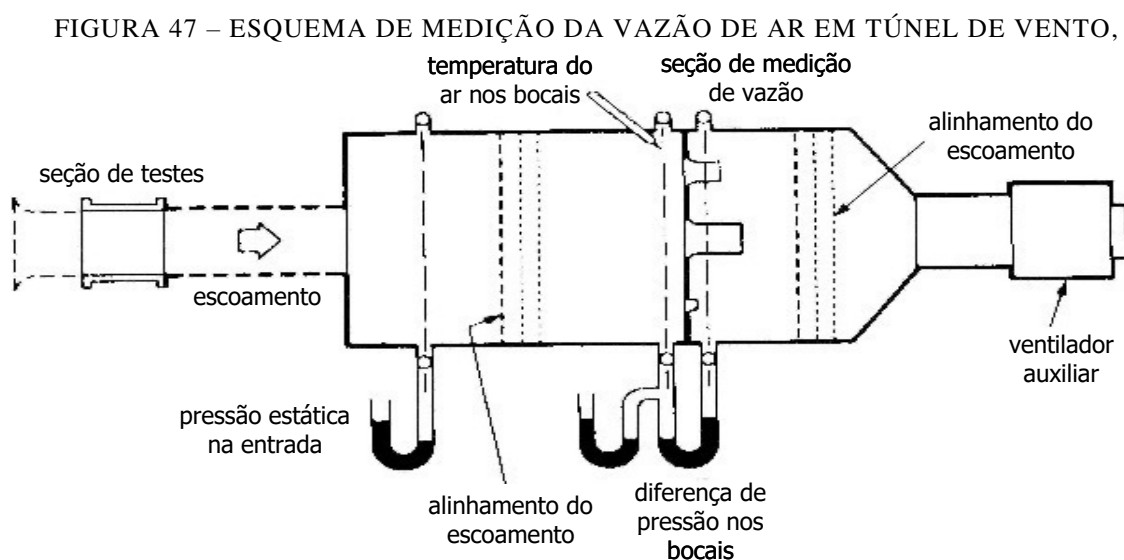
Tabela 13 – Condições de teste e evolução do crescimento da geada - Continuação

t (s)	v (m/s)	ω_{ar} (kg _{água} /kg _{ar})	T _{ar} (°C)	T _w (°C)	δ_f (mm)
600	1,92	0,01009	16,05	-12,74	1,114
1200	1,92	0,01008	16,00	-12,85	1,567
1800	1,92	0,01009	15,99	-13,01	1,84
2400	1,92	0,01008	15,99	-13,13	2,135
3000	1,92	0,01008	16,01	-13,23	2,361
3600	1,92	0,01008	15,99	-13,26	2,54
4200	1,92	0,01008	16,00	-13,30	2,685
4800	1,92	0,01008	16,01	-13,34	2,843
5400	1,92	0,01008	16,02	-13,35	3,001
6000	1,92	0,01008	16,01	-13,33	3,006
6600	1,92	0,01008	16,00	-13,31	3,219
7200	1,91	0,01008	16,00	-13,29	3,356

Teste # 69

APÊNDICE B – SISTEMA DE MEDIÇÃO DE AR

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



FONTE: ASHRAE 51 (1999),

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

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

onde:

$$\beta_b = \frac{d}{D_h} \quad (\text{A.2})$$

$$C_d = 0,9986 - \frac{7,006}{\sqrt{Re}} + \frac{134,6}{Re} \quad (\text{A.3})$$

$$Y = 1 - (0,548 - 0,71\beta_b^4)(1 - \alpha_p) \quad (\text{A.4})$$

$$Re = \frac{1097}{60\mu_a} C_d d Y \sqrt{\rho_a \Delta p} \quad (\text{A.5})$$

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

TABELA 14 – PARÂMETROS REGREDIDOS PARA CADA SUPERFÍCIE COMPARATIVO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA DOIS TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Vazões [m ³ /h]	Δp (Pa)	Incerteza %		Bocal
		124 Pa	249 Pa	
1,372	17,016	0,554	2,151	¼ polegada
2,743	66,931	0,195	0,561	
3,429	104,147	0,164	0,375	
5,486	23,710	0,392	1,536	½ polegada
6,858	36,889	0,260	0,988	
10,973	20,991	0,437	1,732	
13,716	32,678	0,285	1,112	1 polegada
21,946	83,130	0,126	0,440	

APÊNDICE C – CÁLCULO DE INCERTEZAS

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

$$u_t = \sqrt{u_{sm}^2 + u_{ob}^2} \quad (B.1)$$

- TEMPERATURA

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

- UMIDADE RELATIVA

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

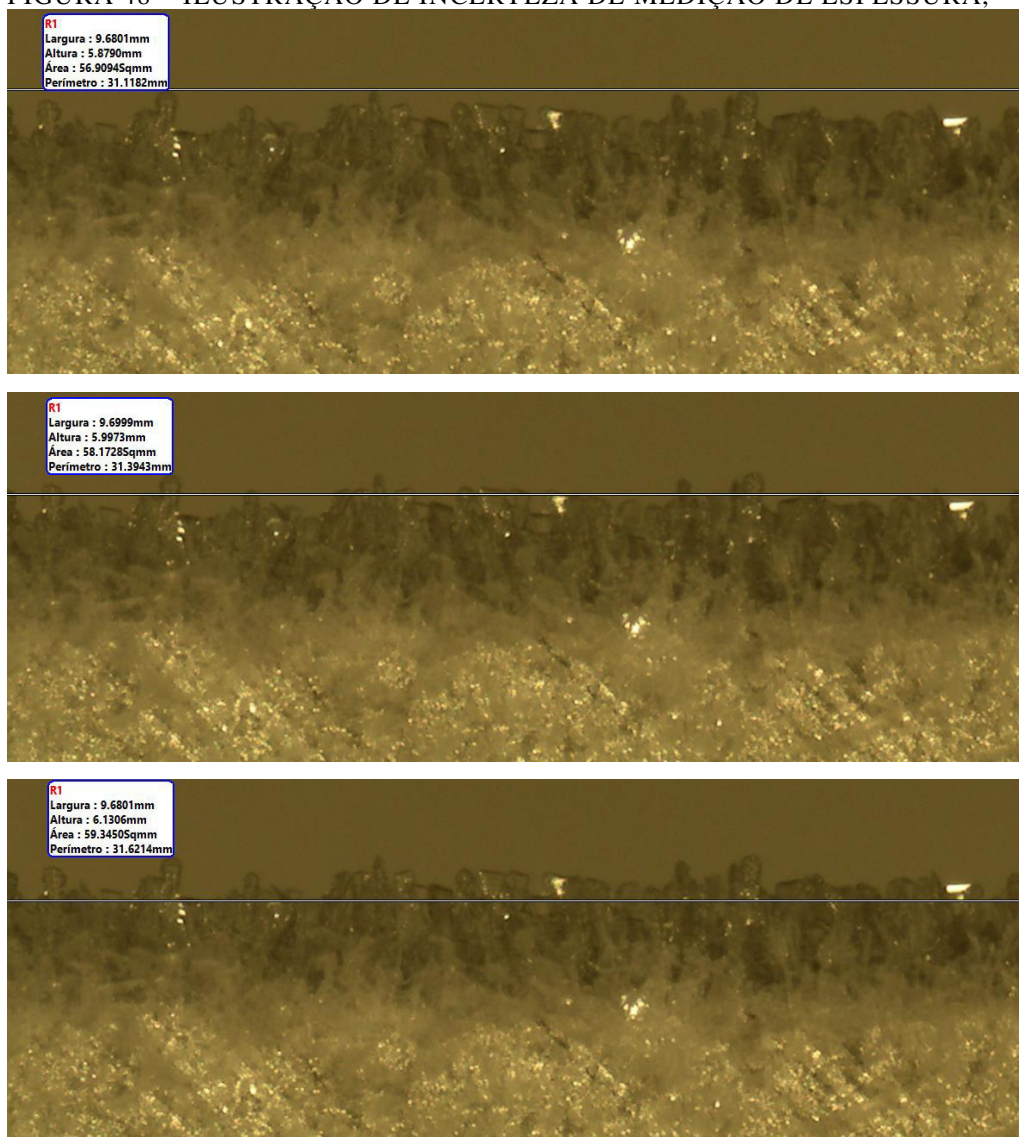
- DIFERENCIAL DE PRESSÃO

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

- ESPESSURA

A incerteza do microscópio, tipo B, é 0,05 mm e segue uma distribuição retangular (divisor $\sqrt{3}$), de modo que $u_m = 0,029$ mm, A incerteza tipo A é $u_{ob} = 0,2$ mm, e é predominante pois depende muito do critério de medição da espessura, podendo ser considerada, uma medida a partir do topo do maior cristal, da região mais densa, ou mesmo de uma média, que foi a utilizada no estudo, conforme a figura 48

FIGURA 48 – ILUSTRAÇÃO DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE ESPESSURA,



A incerteza combinada é predominantemente de medição $u_m \sim 0,2$ mm,