

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DE
GEADA EM REFRIGERADORES DOMÉSTICOS***

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROBSON OLÍMPIO PIUCCO

Florianópolis, Outubro de 2008.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

***ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA FORMAÇÃO DE
GEADA EM REFRIGERADORES DOMÉSTICOS***

ROBSON OLÍMPIO PIUCCO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA,

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA,

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Cláudio Melo, Ph. D. - Orientador

Dr. Christian Johann Losso Hermes, Dr. Eng. - Co-Orientador

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D. Sc. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr. Eng. - Presidente

Prof. Amir Antônio Martins Oliveira Jr., Ph. D.

Prof. Jader Riso Barbosa Jr., Ph. D.

***“Ambição é o caminho para o sucesso.
Persistência é o veículo no qual se chega lá.”***

Bill Eardley

Aos meus pais, **Alfair e Helena**,
e à minha irmã, **Elaine**,
pela presença em todos os momentos e
pelos incentivos e ensinamentos.

À **Cláudia**, pelo
carinho e paciência demonstrados.

AGRADECIMENTOS

Ao grupo Whirlpool S.A., pelo suporte financeiro;

Ao Prof. Cláudio Melo e ao Dr. Christian J. L. Hermes, pessoas a quem devo os maiores agradecimentos, pela competente orientação e dedicação, cuja contribuição com certeza transcende este trabalho;

Aos membros da Banca Examinadora, pela disposição em avaliar este trabalho;

Aos grandes amigos e companheiros durante o período de disciplinas do mestrado Luiz Gustavo, Paulo, Rovansir, André, João, Guilherme e Thiago, pelos ensinamentos, amizade e grandes momentos de alegria;

Aos colegas do POLO Joel, Rodrigues e Luis Torquato, pela amizade, discussões e conhecimentos compartilhados;

Aos alunos de graduação Rafael e Lincoln, e aos técnicos Fabiano e Taffarel, pela contribuição direta na realização deste trabalho;

Aos demais professores e integrantes do POLO, pela companhia;

Aos engenheiros Públio O. O. Duarte e Marco E. Marques, da Whirlpool S.A, pelas discussões e conhecimentos compartilhados ao longo deste trabalho;

A todos aqueles que de alguma forma ajudaram na motivação, discussões e entusiasmo ao longo desta importante fase de minha vida.

LISTA DE SÍMBOLOS	<i>viii</i>
RESUMO	<i>xii</i>
ABSTRACT	<i>xiii</i>
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
<hr/>	
1.1. Contexto histórico.....	1
1.2. Objetivos e metodologia.....	7
1.3. Literatura	7
1.4. Estrutura da dissertação	12
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS	13
<hr/>	
2.1. Aspectos gerais sobre o processo de mudança de fase do vapor d'água.....	13
2.2. Nucleação	15
2.2.1. Nucleação homogênea.....	17
2.2.2. Nucleação heterogênea.....	18
2.3. Crescimento.....	22
2.4. Adensamento	23
2.5. Morfologia.....	24
2.6. Síntese do capítulo.....	25
CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO	27
<hr/>	
3.1. Aspectos gerais.....	27
3.2. Formulação matemática.....	28
3.3. Equações de fechamento	33
3.4. Metodologia de solução do modelo.....	36
3.5. Síntese do capítulo.....	38

CAPÍTULO 4 - EXPERIMENTOS FUNDAMENTAIS	39
<hr/>	
4.1. Aparato experimental	39
4.2. Procedimentos experimentais	42
4.2.1. Tratamento das amostras	43
4.2.2. Medição do ângulo de contato	43
4.2.3. Medição da rugosidade	43
4.2.4. Medição da espessura da geada	43
4.2.5. Medição da massa da geada	43
4.2.6. Procedimento de ensaio	43
4.3. Resultados	43
4.3.1. Ensaio para estudo da nucleação	43
4.3.2. Ensaio para medição da densidade da geada	43
4.3.3. Ensaio para avaliação do crescimento e do adensamento da geada	43
4.4. Síntese do capítulo	43
CAPÍTULO 5 - EXPERIMENTOS APLICADOS	43
<hr/>	
5.1. Aparato experimental	43
5.2. Resultados	43
5.2.1. Ângulo de contato	43
5.2.2. Velocidade	43
5.2.3. Grau de super-resfriamento – portas fechadas	43
5.2.4. Grau de super-resfriamento – abertura das portas	43
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS	43
<hr/>	
6.1. Nucleação	43
6.2. Crescimento e adensamento	43
6.2.1. Validação do modelo	43
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	43
<hr/>	
7.1. Conclusões finais	43
7.2. Sugestão para trabalhos futuros	43

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
APÊNDICE I - INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	43

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Gerais

Símbolo	Descrição	Unidades
a	Coefficiente da correlação empírica para densidade da geada	[adimensional]
A_{ag}	Área da interface embrião-meio envolvente	[m ²]
A_{gp}	Área da interface embrião-substrato	[m ²]
b	Coefficiente da correlação empírica para densidade da geada	[adimensional]
c	Coefficiente da correlação empírica para densidade da geada	[adimensional]
c_p	Calor específico a pressão constante	[J/kgK]
$c_{p,as}$	Calor específico do ar seco a pressão constante	[J/kgK]
$c_{p,m}$	Calor específico da mistura a pressão constante	[J/kgK]
$c_{p,v}$	Calor específico do vapor d'água a pressão constante	[J/kgK]
D	Difusividade do vapor d'água no ar	[m ² /s]
D_{ef}	Difusividade efetiva do vapor d'água na geada	[m ² /s]
G	Energia livre de Gibbs	[J]
h	Altura de um embrião	[m]
H	Entalpia	[J]
Ha	Número de Hatta	[adimensional]
I	Taxa de formação de embriões	[1/m ² s]
I_0	Constante cinética de formação de embriões	[1/m ² s]
I_o	Incerteza operacional	[kg/m ³ , mm]
I_x	Incerteza de medição da espessura da geada	[% , mm]
I_ρ	Incerteza de medição da densidade da geada	[% , kg/m ³]

h_{sv}	Entalpia de dessublimação da água	[J/kg]
k	Constante de Boltzmann	[J/K]
k_g	Condutividade térmica da geada	[W/mK]
L	Comprimento do substrato	[m]
M	Massa molar da água	[kg/mol]
m	Massa da geada	[g]
m''	Fluxo de massa	[kg/m ² s]
m''_{tot}	Fluxo de massa total de vapor	[kg/m ² s]
m''_a	Fluxo de massa de vapor responsável pelo adensamento da geada	[kg/m ² s]
m''_c	Fluxo de massa de vapor responsável pelo crescimento da geada	[kg/m ² s]
n	Número de moléculas	[moléculas]
Nu_L	Número de Nusselt	[adimensional]
P	Pressão	[Pa]
P_∞	Pressão parcial do vapor	[Pa]
$P_{sat,e}$	Pressão parcial do vapor correspondente á temperatura de saturação do embrião	[Pa]
Pr	Número de Prandtl	[Adimensional]
q''	Fluxo de calor	[W/m ²]
r	Raio do embrião	[□]
r^*	Raio crítico do embrião	[□]
R	Constante dos gases ideais	[J/molK]
Ra	Rugosidade média	[µm]
Re_L	Número de Reynolds	[Adimensional]
S	Entropia	[J/K]
t	Tempo	[s]
t_D	Tempo característico de difusão	[s]
t_C	Tempo característico de dessublimação	[s]
T	Temperatura	[K]
T_e	Temperatura do embrião	[K]

T_p	Temperatura do substrato	[K]
T_s	Temperatura da superfície da geada	[K]
T_∞	Temperatura da corrente de ar	[K]
U	Energia interna	[J]
V	Volume	[m ³]
V_∞	Velocidade do ar	[m/s]
x	Direção perpendicular ao substrato	[m]
x_s	Espessura da geada	[m]
z	Altura de uma ilha de nucleação	[m]

Símbolos Gregos

Símbolo	Descrição	Unidades
α	Coeficiente de dessublimação	[1/s]
γ_{ag}	Tensão superficial na interface embrião-meio envolvente	[J/m ²]
γ_{gp}	Tensão superficial na interface embrião-substrato	[J/m ²]
γ_{ap}	Tensão superficial na interface substrato-meio envolvente	[J/m ²]
γ_{ij}	Tensão superficial na interface embrião-geada	[J/m ²]
ΔA	Incerteza de medição da área da amostra	[mm ²]
ΔG_{lat}	Energia livre de Gibbs latente	[J]
ΔG_{sen}	Energia livre de Gibbs sensível	[J]
ΔG_{tot}	Energia livre de Gibbs total	[J]
ΔG_{tot}^*	Energia livre de Gibbs total crítica	[J]
Δm	Incerteza de medição da massa de geada	[g]
ΔT_∞	Incerteza de medição da temperatura do ar	[°C]
ΔT_p	Incerteza de medição da temperatura do substrato	[°C]
ΔT_s	Incerteza de medição da temperatura superficial da geada	[°C]
ΔT_{sup}	Grau de super-resfriamento da superfície	[°C]
ΔV_∞	Incerteza de medição da velocidade do ar	[m/s]

$\Delta\theta$	Incerteza de medição da umidade relativa do ar	[%]
$\Delta\omega_{sup}$	Grau de supersaturação da superfície	[kg/kg]
ε	Porosidade	[adimensional]
ε_r	Emissividade da geada	[adimensional]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
ρ_a	Densidade do ar seco	[kg/m ³]
ρ_g	Densidade da geada	[kg/m ³]
ρ_i	Densidade do gelo	[kg/m ³]
$\rho_{sat,p}$	Densidade do vapor na temperatura de saturação do substrato	[kg/m ³]
ρ_v	Densidade do vapor	[kg/m ³]
ρ_∞	Densidade do ar úmido	[kg/m ³]
σ_r	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² K ⁴]
λ_c	Coefficiente de transferência de calor	[W/m ² K]
λ_m	Coefficiente de transferência de massa	[kg/m ² s]
τ	Fator de tortuosidade	[adimensional]
θ	Ângulo de contato	[graus]
ω	Umidade absoluta	[kg/kg]
$\dot{\omega}$	Taxa de dessublimação	[m ² /s]
ω_∞	Umidade absoluta da corrente de ar	[kg/kg]
$\omega_{sat,e}$	Umidade absoluta na temperatura de saturação do embrião	[kg/kg]
$\omega_{sat,p}$	Umidade absoluta na temperatura de saturação do substrato	[kg/kg]
$\omega_{sat,s}$	Umidade absoluta na temperatura de saturação da superfície	[kg/kg]

Para que um refrigerador seja classificado como *frost-free*, a geada deve se formar apenas sobre o evaporador, de onde esta é periodicamente removida por resistências elétricas. No entanto, existem situações onde as condições ambientais e de operação provocam o aparecimento de geada sobre as superfícies internas de gabinetes refrigerados, o que exige a intervenção do usuário para a sua remoção. Em face deste problema, empresas do setor têm recebido um número significativo de chamadas de assistência técnica e, em situações extremas, de devoluções de produto. Os custos dessas operações geram um grande prejuízo para os fabricantes, que, por sua vez, procuram desenvolver produtos cada vez mais robustos à formação de geada, geralmente elevando o custo e penalizando a eficiência energética do equipamento. Apesar do grande número de trabalhos existentes na literatura com foco nos fenômenos físico-químicos associados com o processo de formação da geada, nenhum deles se concentrou nas condições psicrométricas e de superfície tipicamente observadas em refrigeradores domésticos. Com o objetivo de preencher essa lacuna, este trabalho se propõe a estabelecer uma metodologia para analisar o processo de formação de geada em gabinetes refrigerados com base nas condições de operação e nas características das superfícies. Neste contexto, as condições de operação de um refrigerador típico foram avaliadas em uma câmara com controle da temperatura e umidade do ar. Amostras do material das superfícies internas do refrigerador foram extraídas e submetidas à medição de ângulo de contato e rugosidade. As condições mínimas necessárias para o início do processo de nucleação foram avaliadas em uma bancada especialmente projetada e construída para essa finalidade. Os resultados foram então empregados para validar um critério teórico para prever se ocorre ou não formação de geada sobre uma determinada superfície. Adicionalmente, um modelo matemático foi desenvolvido com base nos princípios de conservação da massa e da energia para prever a espessura e a massa da camada de geada ao longo do tempo. O modelo foi validado contra dados experimentais, quando se observou que a espessura da geada, em diferentes condições de operação, era prevista dentro de uma faixa de erro de $\pm 10\%$. Embora a metodologia tenha sido elaborada para um refrigerador doméstico específico, ela se aplica a quaisquer compartimentos refrigerados onde exista formação de geada.

ABSTRACT

Household refrigerators are labeled as frost-free when frost forms on the evaporator coil only, from where it is periodically removed by the action of electrical heaters. However, when certain environmental and operating conditions take place, frost can also be formed on the cabinet inner liners, increasing the field call rates and consequently the maintenance and quality costs. In order to avoid this inconvenience, manufacturers have been trying to improve their refrigerator designs, but that increases costs and penalizes the energy performance. Albeit several distinguishing publications in the field of frost formation can be found in the open literature, none of them actually focused on the typical working and geometric conditions of household refrigerators and freezers. Therefore, this dissertation aimed to devise a methodology for analyzing the frost formation on the inner liners of frost-free refrigerators focused on the most influencing factors that drive the frost nucleation, growth and densification processes, such as psychrometric (temperature and humidity), flow (velocity), and surface conditions (roughness and contact angle). In order to accomplish that, a refrigerator was tested inside an environmental air temperature and humidity controlled chamber using an automatic door-opening device. In addition, samples of different liner materials were extracted from the refrigerated cabinet in order to have their contact angles and surface roughness measured. These samples were tested using a purpose-built testing facility for measuring both the mass and thickness of the frost deposited over a flat horizontal surface. The results were used to devise a criterion that establishes whether the frost nucleation would start. In addition, a mathematical model based on the mass and energy conservation principles, was developed to predict the mass and thickness of the frost layer over time. The model was validated against experimental data, showing deviations for the predicted frost thickness within a $\pm 10\%$ error band. Although the methodology was applied to a specific household refrigerator, it can be easily extended to any kind of refrigerated room subject to frost formation.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. Contexto histórico

A refrigeração pode ser definida como a arte relacionada ao resfriamento de corpos ou fluidos para temperaturas inferiores àquelas disponíveis em um determinado tempo e local (Gosney, 1982). Seu uso para a conservação de bens perecíveis e para climatização de ambientes teve início no período clássico (século IV a.C.). A figura 1.1, por exemplo, mostra um vaso grego composto por dois compartimentos distintos, num dos quais se colocava gelo ou neve, e no outro vinho.

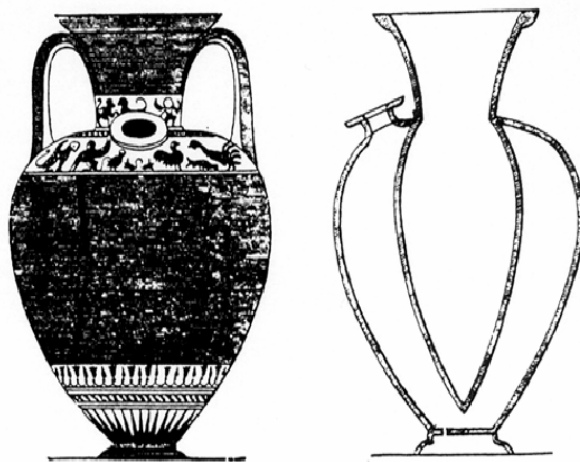


Figura 1.1 – Vaso grego do século IV a.C. utilizado para resfriar vinho.

Com o passar do tempo, o aumento da demanda e a escassez de fontes de água potável para extração de gelo provocaram vários problemas de saúde, o que motivou o desenvolvimento de métodos artificiais para a produção de gelo. No ano de 1755, o escocês Willian Cullen, professor da Universidade de Edimburgo, Escócia, promoveu pela primeira vez a solidificação da água por meios artificiais. O experimento de Cullen – cuja finalidade era puramente didática – consistia num recipiente fechado contendo éter (ver figura 1.2), que evaporava numa pressão inferior a atmosférica.

O primeiro sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor operando em um ciclo fechado foi concebido por Jacob Perkins em 1834.

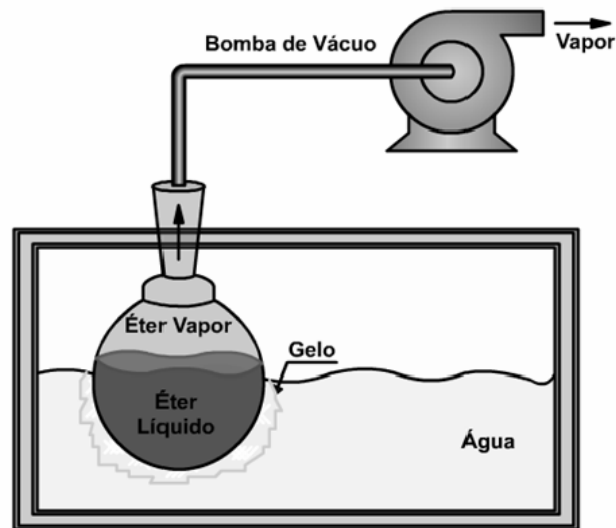


Figura 1.2 – Representação esquemática do experimento de Willian Cullen.

O ciclo proposto por Perkins, ilustrado na figura 1.3, era composto por quatro componentes básicos: dois trocadores de calor (evaporador e condensador), um compressor e um dispositivo de expansão. O princípio de operação consistia em retirar calor do ambiente a ser refrigerado – que está em contato com o evaporador, onde ocorre a evaporação de um fluido volátil, e transferir este calor para outro ambiente a uma temperatura superior, por meio da condensação do vapor de refrigerante a alta pressão.

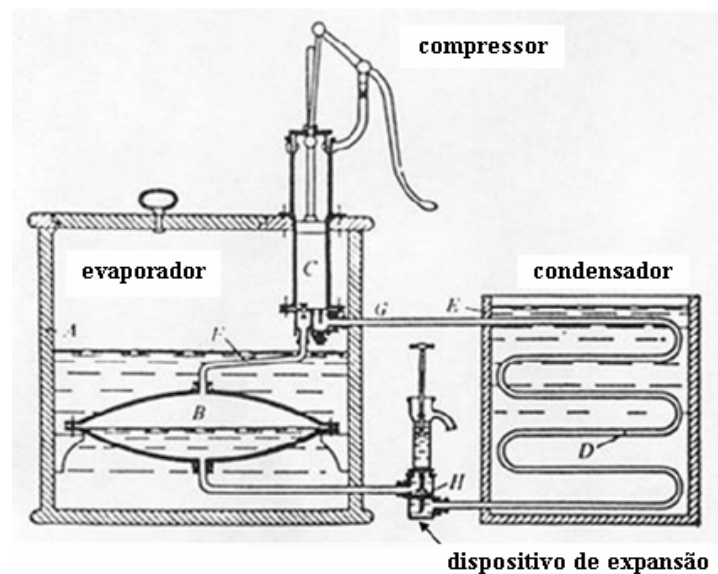


Figura 1.3 – Esquema do sistema de refrigeração proposto por Jacob Perkins (Gosney, 1982).

Entre 1856 e 1857, o escocês James Harrison materializou o conceito de Perkins através da construção de um equipamento capaz de produzir blocos de gelo para utilização nos refrigeradores domésticos existentes na época, conhecidos como geladeiras. O equipamento de Harrison representou uma grande evolução no segmento de refrigeração

doméstica, uma vez que possibilitou a substituição do gelo extraído da natureza, muitas vezes contaminado por bactérias, por um gelo limpo.

Os refrigeradores domésticos existentes nesta época eram, na sua maioria, caixas de madeira divididas em compartimentos (ver figura 1.4). Os blocos de gelo eram colocados na parte superior, para promover a circulação de ar frio, e assim manter os compartimentos a uma temperatura inferior a do ambiente. A água resultante da fusão do gelo era conduzida até uma bandeja localizada na parte inferior do refrigerador, que precisava ser periodicamente esvaziada.

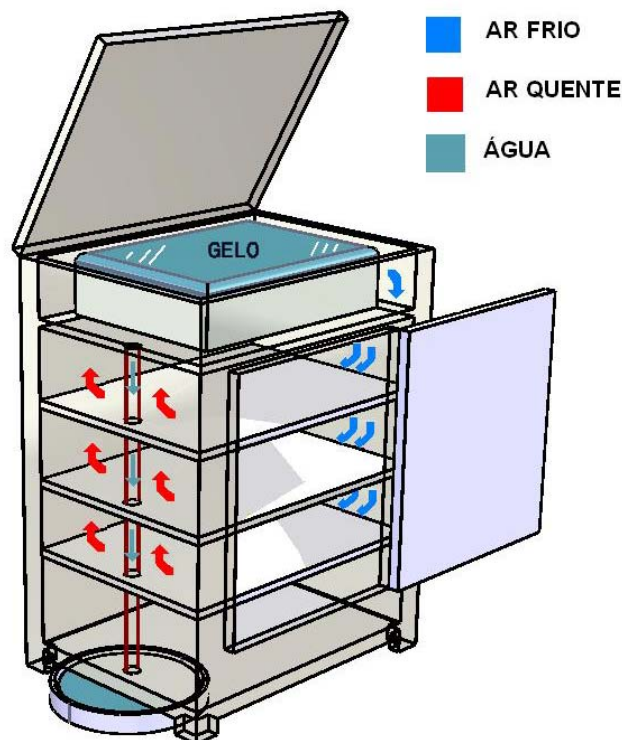


Figura 1.4 – Refrigerador doméstico do século XIX.

Apesar da inconveniência da reposição dos blocos de gelo e da remoção da água resultante do degelo, a utilização desse tipo de refrigerador persistiu até a segunda metade do século XIX, quando o alemão Karl Von Linden desenvolveu o primeiro refrigerador doméstico com sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor. Nessa mesma época o francês Ferdinand Carré desenvolveu um refrigerador doméstico com sistema de refrigeração por absorção, que utilizava o par amônia-água como fluido de trabalho. Tais refrigeradores se tornaram bastante populares, uma vez que proporcionavam a manutenção do frio nos compartimentos internos de maneira contínua e por um período de tempo prolongado. Nos anos seguintes, os refrigeradores domésticos passaram a ter acionamento elétrico – como, por exemplo, o DOMELRE (*Domestic Electric Refrigerator*) –, e o sistema de refrigeração

passou a ser uma unidade selada – um exemplo é o lançamento do refrigerador da *General Electric*, ilustrado na figura 1.5.



Figura 1.5 – Refrigerador doméstico com sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor.

Os primeiros refrigeradores produzidos em larga escala utilizavam evaporadores do tipo *roll-bond*, formados por duas placas de alumínio justapostas que originam canais por onde escoo o fluido refrigerante (ver figura 1.6). Nesses evaporadores, a movimentação de ar se dá por convecção natural. Ao entrar em contato com o evaporador, o ar é resfriado e desumidificado, originando uma camada de geada sobre a superfície, a qual degrada o desempenho do sistema, caso não venha a ser periodicamente removida.



Figura 1.6 – Evaporadores do tipo *roll-bond*.

No início do século XX, o processo de degelo do evaporador, ocorria através de uma interrupção prolongada no funcionamento do produto, o que prejudicava a qualidade dos alimentos estocados. Tal problema foi parcialmente solucionado no final da década de 1960, com o lançamento de uma nova linha de refrigeradores, conhecida como *frost-free* (Jacobus, 1967), onde o degelo ocorre automaticamente. Uma característica importante de um refrigerador *frost-free* é o sistema de distribuição de ar, onde existem um ventilador, dutos e um trocador de calor tubo-aletado, como ilustra a figura 1.7. O ar é aspirado pelo ventilador,

passa através do evaporador, e é insuflado num *plenum* com o objetivo de uniformizar o escoamento. Do *plenum*, parte da vazão de ar (~90%) é direcionada ao compartimento congelador, enquanto a outra parte (~10%) é insuflada no compartimento refrigerador através de um sistema de dutos. Um esquema da circulação de ar em um refrigerador *frost-free* é ilustrado na figura 1.7.

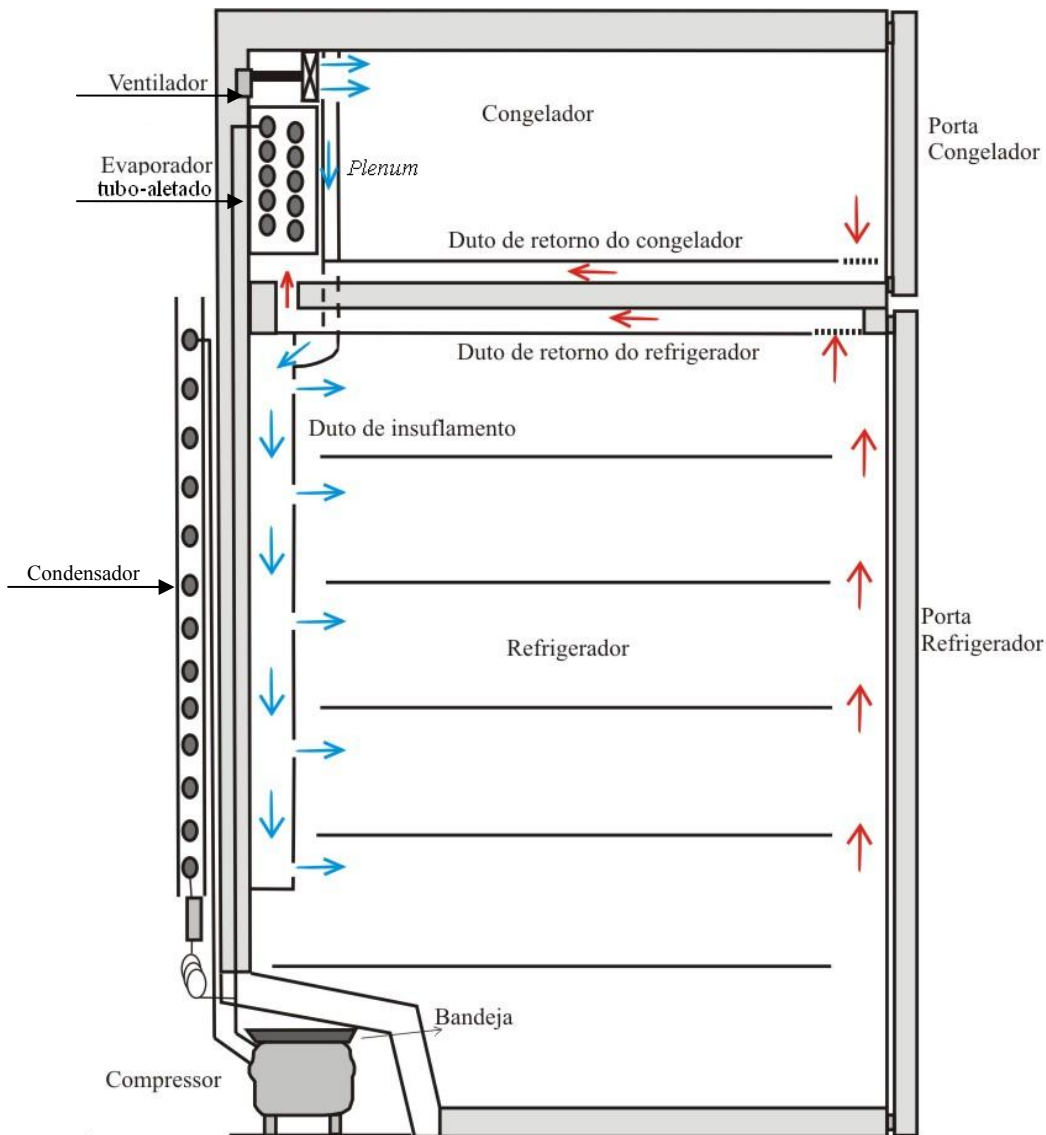


Figura 1.7 – Esquema de funcionamento de um refrigerador *frost-free*.

Para um produto ser classificado como *frost-free*, a geada deve se formar apenas no evaporador (ver figura 1.8) e de lá ser retirada através de resistências elétricas. No entanto, em algumas situações, percebe-se o aparecimento de uma camada de geada sobre as superfícies internas do refrigerador (ver figura 1.9) o que exige a ação do usuário para sua remoção.



Figura 1.8 – Formação de geada no evaporador.

O volume anual de produção de refrigeradores *frost-free* no Brasil ultrapassa 4 milhões de unidades (ELETROS, 2007), com a grande maioria sendo vendida para as regiões mais quentes do país, onde as condições ambientais e operacionais favorecem a formação de geada sobre as superfícies internas do refrigerador. Em face deste problema, grande parte das unidades entregues aos consumidores geram chamadas de assistência técnica e, em alguns casos, devoluções de produto. Os custos de tais operações representam um grande prejuízo para os fabricantes, que procuram desenvolver produtos cada vez mais robustos à formação de geada, o que eleva o custo e penaliza a eficiência energética dos equipamentos. Este contexto mostra a importância de estudos visando um melhor entendimento dos mecanismos de formação de geada sob condições tipicamente observadas em refrigeradores domésticos, com a finalidade de propor estratégias para evitar a sua formação.



Figura 1.9 – Formação de geada sobre as superfícies internas de um refrigerador *frost-free*.

1.2. Objetivos e metodologia

O presente trabalho está direcionado para o desenvolvimento de uma metodologia para prever a formação de geada sobre as superfícies internas de refrigeradores *frost-free*, com o objetivo de estabelecer limites para as variáveis relevantes do processo. Como objetivos principais, destacam-se:

- Identificar os diferentes processos de mudança de fase do vapor d'água sobre as superfícies internas de gabinetes refrigerados;
- Entender o processo de mudança de fase e o efeito dos parâmetros mais relevantes;
- Identificar pontos no gabinete onde ocorre mudança de fase e avaliar as condições correspondentes;
- Propor alternativas para evitar ou reduzir a formação de gelo e geada sobre as superfícies internas de refrigeradores domésticos.

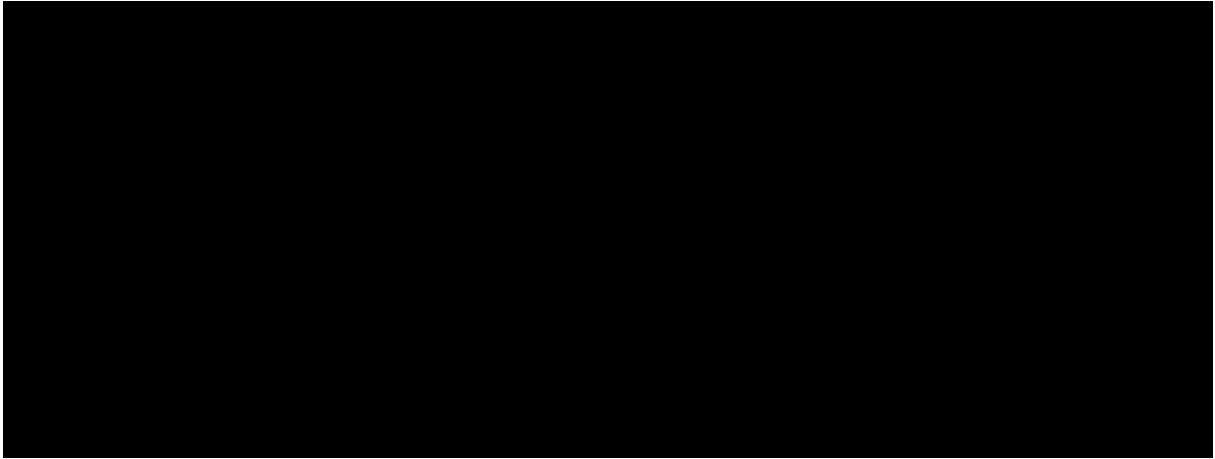
Como objetivos específicos, destacam-se:

- Desenvolver um aparato experimental para estudar a formação de gelo e geada sobre superfícies resfriadas;
- Avaliar experimentalmente o efeito das condições de operação sobre a formação de gelo e geada;
- Desenvolver modelos matemáticos para prever os processos de nucleação, crescimento e adensamento de geada em função das condições geométricas e de operação;
- Estabelecer uma metodologia para prever a formação de gelo e geada em gabinetes refrigerados.

1.3. Literatura

Devido à importância da formação de gelo e geada em diversos segmentos, tais como aeronáutica, criogenia e engenharia de alimentos, é grande o interesse pelo entendimento dos mecanismos físico-químicos que regem tais processos. Os principais trabalhos experimentais relacionados com a formação de geada disponíveis na literatura são descritos a seguir, estando as suas principais características sumarizadas na tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Trabalhos experimentais.



Cheng e Shiu (2002) realizaram uma importante revisão bibliográfica com foco 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 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. 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, onde se observou uma forma arredondada. Como esperado, camadas de geada mais espessas foram observadas quando o ar possuía temperatura e umidade relativa mais elevadas e a temperatura da superfície era mais baixa.

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

Lee *et al.* (2004) investigaram experimentalmente a formação de geada sobre duas superfícies com diferentes ângulos de contato (23° e 88°). As temperaturas de tais superfícies, assim como também a temperatura, umidade e velocidade do ar foram variadas. Percebeu-se que a forma do cristal de geada variava com a temperatura e a umidade do ar e com a

temperatura da superfície. Verificou-se também que a velocidade do ar afetava muito levemente a taxa de crescimento da geada. A influência do ângulo de contato sobre a nucleação da geada não foi corretamente investigada, pois as superfícies foram submetidas a graus de super-resfriamento que transcendiam o limite de nucleação, limite a partir do qual o ângulo de contato deixa de influenciar o processo. Além disso, a rugosidade das superfícies não foi avaliada.

Liu *et al.* (2005) aplicaram um revestimento à base de verniz acrílico sobre uma superfície metálica e avaliaram a formação de geada ao longo do tempo sob diversas condições psicrométricas e de temperatura superficial. Os autores observaram que, sob certas condições, não havia formação de geada sobre a superfície. O efeito da velocidade do ar não foi investigado e a massa de geada formada ao longo do tempo não foi registrada.

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

De maneira semelhante, Liu *et al.* (2006) alteraram a energia superficial de uma placa de cobre mediante a aplicação de uma camada de parafina, e a submetem 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.

Além dos trabalhos experimentais, os processos de crescimento e adensamento da geada podem ser estudados através de modelos matemáticos desenvolvidos com base nos princípios fundamentais da transferência de calor e de massa. Alguns dos principais estudos teóricos com foco na formação de geada disponíveis na literatura são listados na tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Trabalhos de modelagem matemática.

Autores	Origem	Abordagem	Teoria de meio poroso	Condições iniciais		Validação experimental
				Espessura [mm]	Densidade [kg/m ³]	
O'Neal (1982)	EUA	Analítica	Sim	0,05	40	Não
Sami e Duong (1989)	Canadá	Analítica	Sim	Não consta	Não consta	Sim
Tao et al. (1992)	Canadá	Analítica	Não	0,1	92,84	Sim
Le Gall e Grillot (1996)	França	Numérica	Sim	0,1	25	Sim
Lee et a. (1997)	Coréia do Sul	Analítica	Não	Não consta	Não consta	Sim
Cheng e Cheng (2001)	China	Semi-empírica	Não	Não consta	Função da temp. superficial	Sim
Lee (2003)	Coréia do Sul	Analítica	Sim	0,02	40	Sim
Na e Webb (2004a)	EUA	Numérica	Sim	0,02	30	Sim

O'Neal (1982) desenvolveu um dos primeiros modelos teóricos reportados na literatura. Através de uma abordagem unidimensional e considerando a geadá como um meio poroso, O'Neal (1982) desenvolveu um modelo para prever o crescimento e o adensamento de geadá sobre placas planas paralelas, em função do tempo, dos parâmetros psicrométricos, da temperatura da superfície e da velocidade do ar. Tal modelo, entretanto, não foi validado contra dados experimentais.

Sami e Duong (1989) propuseram um modelo unidimensional com base nos conceitos fundamentais de transferência de calor e massa para prever a espessura e a densidade da geadá formada sobre superfícies planas, como uma função do tempo. Foram realizadas diversas simulações variando a temperatura, a umidade e a velocidade do ar, além da temperatura da superfície. Os resultados obtidos foram comparados com resultados de dois trabalhos experimentais realizados por outros autores, observando-se uma razoável concordância. As condições iniciais necessárias ao modelo, entretanto, não foram reportadas, o que impede a reprodução dos resultados por outros autores.

Tao *et al.* (1992) formularam um modelo com base nos conceitos de difusão transiente de calor e de massa em um meio poroso para prever o crescimento de geadá sobre uma placa plana. Foram investigadas as variações temporais e espaciais da temperatura da superfície, densidade e taxa de adensamento de geadá. Segundo os autores, o uso de uma difusividade efetiva para o meio poroso melhora substancialmente a concordância do modelo com os resultados experimentais.

Le Gall e Grillot (1996) também desenvolveram um modelo para o crescimento e o adensamento de geada ao longo do tempo, com base nos conceitos de difusão de calor e massa. Grandes incertezas relativas ao transporte efetivo de massa no interior da camada de geada foram identificadas, o que exigiu um ajuste no modelo para reproduzir os dados experimentais dentro de uma banda de erros de $\pm 10\%$.

Lee *et al.* (1997) desenvolveram um procedimento semi-analítico para calcular a massa de geada depositada sobre uma superfície plana, considerando tanto a difusão molecular de água como a dessublimação do vapor d'água no interior da camada de geada. A transferência de massa foi expressa em termos da densidade do vapor e de um coeficiente de absorção. A validação do modelo foi realizada por meio de dados experimentais obtidos por outros autores, observando-se pouca concordância. Os autores não citam em nenhum momento as condições iniciais necessárias à integração temporal das equações diferenciais, dificultando a reprodução dos resultados por outros autores.

Cheng e Cheng (2001) desenvolveram uma metodologia semi-empírica para prever o crescimento e o adensamento de geada ao longo do tempo. Uma correlação empírica para a densidade, baseada na temperatura da superfície da geada, foi empregada. O modelo foi validado utilizando-se dados experimentais gerados por outros autores, quando uma razoável concordância foi observada.

Lee (2003) realizou uma análise crítica dos modelos para prever a formação de geada, identificando as variáveis que afetam o crescimento e o adensamento da geada, tais como a temperatura do ar, a temperatura da superfície, a umidade e a velocidade do ar. O autor conclui que não há um consenso quanto ao modo e a magnitude dos efeitos de cada variável sobre o processo de formação de geada. O autor também elaborou modelos simples para prever o processo de formação de geada. A validação do modelo contra dados experimentais não foi devidamente conduzida, uma vez que foram utilizados três valores para a densidade inicial durante três simulações numa mesma condição de operação.

Na e Webb (2004a) desenvolveram um modelo para prever o crescimento e o adensamento de geada com base na solução de 2 equações diferenciais parciais em conjunto com 2 equações diferenciais ordinárias. O modelo foi resolvido numericamente, exigindo um considerável esforço computacional. Diversos ajustes foram necessários ao modelo para que uma concordância na faixa de $\pm 15\%$ com os dados experimentais gerados pelos próprios autores fosse obtida.

Apesar do grande número de publicações na área, nenhum dos trabalhos se preocupou em estudar o processo de formação de geada sob condições psicrométricas ($T_{\infty} = 10^{\circ}\text{C}$, $\phi = 40\%$) e de superfície ($\theta = 80^{\circ}$, $-20^{\circ}\text{C} < T_p < 0^{\circ}\text{C}$) tipicamente observadas em refrigeradores *frost-free*, que é o foco do presente trabalho. Também não foi encontrado qualquer critério que pudesse prever a formação de uma camada de geada sobre uma superfície envolvendo todos os parâmetros relevantes. A maioria dos modelos disponíveis para o crescimento e adensamento de geada dependem de uma estimativa inicial para a densidade da geada, o que é fisicamente inconsistente, além de apresentarem uma fraca concordância com dados experimentais. O presente trabalho pretende preencher essas lacunas.

1.4. Estrutura da dissertação

Esse documento foi estruturado da seguinte forma: Após a introdução, o Capítulo 2 apresenta uma revisão geral sobre os processos de mudança de fase do vapor d'água, bem como uma análise dos processos de nucleação, crescimento e adensamento de geada em nível molecular. Em seguida, o Capítulo 3 apresenta um modelo matemático desenvolvido com a finalidade de prever a evolução temporal da espessura e da densidade de uma camada de geada sobre uma superfície plana. O Capítulo 4, por sua vez, apresenta uma investigação experimental dos processos de nucleação, crescimento e adensamento de geada sobre uma placa plana. No Capítulo 5 é investigada a formação de geada sobre as superfícies internas de um refrigerador doméstico. No Capítulo 6, são discutidos os resultados do trabalho. Por fim, são apresentadas as conclusões finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS

2.1. Aspectos gerais sobre o processo de mudança de fase do vapor d'água

Certas condições termodinâmicas devem ser satisfeitas para que o vapor d'água presente no ar mude de fase. Em um processo a pressão constante, quando a temperatura de uma massa de ar úmido atinge um valor abaixo do ponto de orvalho, sem interação com uma superfície sólida, e numa temperatura acima de 0°C , ocorre a condensação do vapor, o que dá origem a uma névoa semelhante à ilustrada na figura 2.1a. Quando tal condição ocorre na atmosfera, numa temperatura abaixo de 0°C , o vapor d'água pode passar diretamente para o estado sólido, formando flocos de neve similares aos ilustrados na figura 2.1b. Nesses casos, diz-se que houve um processo homogêneo de mudança de fase, caso não haja interação entre a mistura ar-vapor e um substrato. Porém, na maior parte dos casos há uma interação entre o vapor d'água e um substrato sólido (grãos de poeira), ainda que em nível microscópico, e o processo de mudança de fase passa a ser heterogêneo.

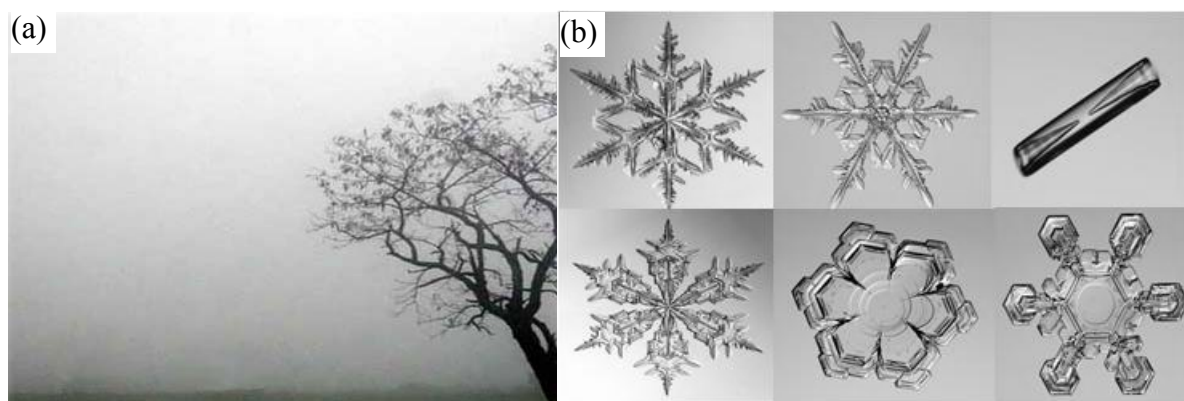


Figura 2.1 – (a) Névoa, (b) flocos de neve.

Adicionalmente, quando há interação entre uma mistura de ar e vapor d'água e um substrato sólido temperatura inferior à temperatura de saturação da mistura, pode haver condensação do vapor, formando um filme líquido ou gotas esparsas (ver figura 2.2a), ou dessublimação, formando uma camada de geada similar à ilustrada na figura 2.2b. Tais casos são processos heterogêneos de mudança de fase, os quais exigem uma quantidade de energia menor do que a dos processos homogêneos (Fletcher, 1970).

Quando a temperatura é inferior ao ponto de congelamento da água, pode ocorrer tanto a condensação com posterior congelamento das gotículas ou do filme líquido, formando uma camada de gelo semelhante à ilustrada na figura 2.2c, como a dessublimação do vapor. Esta última exige uma maior quantidade de energia em relação à condensação com congelamento, o que se reflete num maior grau de resfriamento a partir do ponto de orvalho para que este processo ocorra.

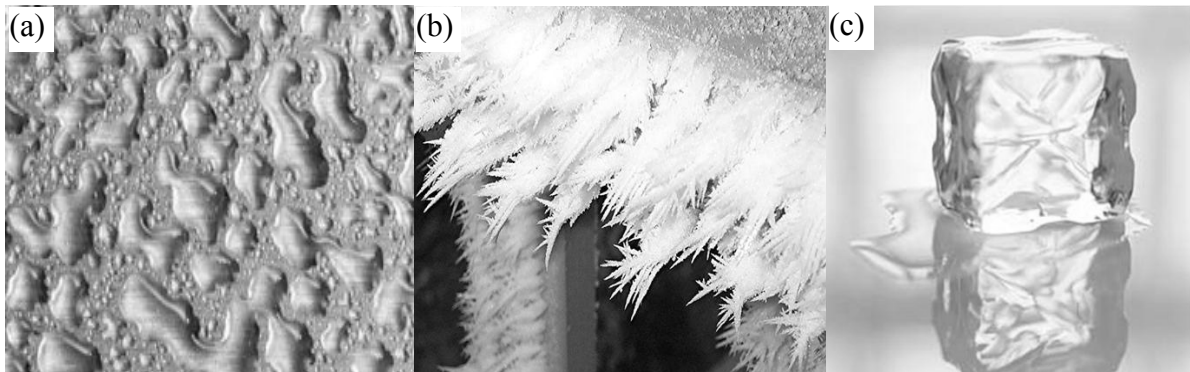


Figura 2.2 – (a) Condensação, (b) geada e (c) gelo.

No interior de refrigeradores domésticos, existem condições favoráveis à ocorrência de todos os processos de mudança de fase anteriormente mencionados. Dentre tais processos, a formação de geada é o que ocorre com maior frequência, sendo, portanto, o foco principal deste trabalho.

Como se pode observar na figura 2.3, a formação de uma camada de geada pode ser dividida em alguns estágios, caracterizados por processos de nucleação, crescimento e adensamento. Primeiramente ocorre a nucleação (1), quando um embrião (aglomerado de moléculas de vapor d'água) atinge o grau de super-resfriamento necessário para que o processo de mudança de fase ocorra. Em seguida, o embrião cresce (2) por meio de adesão de novas moléculas (Fletcher, 1970). Durante o processo de crescimento, a temperatura da superfície do embrião se torna mais alta que a temperatura do substrato, em função do isolamento térmico provocado por ele próprio e da geração local de energia térmica. Além disso, o embrião, ao crescer, aumenta a sua área lateral e o seu volume, o que exige uma maior quantidade de energia para sustentar o seu crescimento. Quando esta quantidade de energia supera a energia de nucleação, o embrião para de crescer, e surge uma nova nucleação sobre ele mesmo (3). O novo embrião cresce (4), aumenta a sua área externa e o seu volume, e passa a exigir uma maior quantidade de energia para sustentar seu crescimento. Por conseguinte, novas nucleações ocorrem sobre o embrião desenvolvido (5 e 6). Este processo é interrompido quando a energia total disponível na superfície da geada não é suficiente para

promover novas nucleações, originando um meio poroso, que adensa à medida que o vapor d'água se difunde para o seu interior.

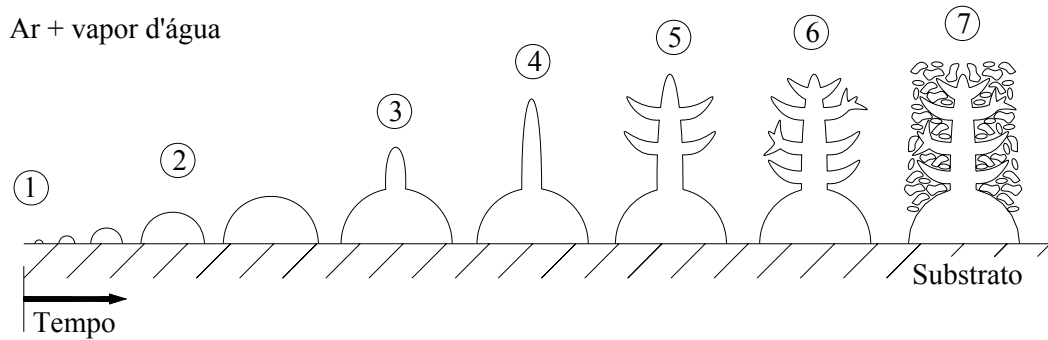


Figura 2.3 – Processo de formação de uma camada de geada sobre uma superfície plana (Tao *et al.*, 1992).

2.2. Nucleação

O processo de nucleação pode ocorrer de maneira homogênea, como no caso de uma névoa, ou heterogênea, como no caso de formação de um cristal de geada sobre uma superfície. Em ambos os casos, desconsiderando efeitos de superfície, a energia 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,

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

A variação infinitesimal da energia livre de Gibbs pode ser expressa da seguinte forma,

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (2.2)$$

Aplicando a primeira lei da Termodinâmica para uma transformação reversível, $dU - TdS + PdV = 0$, obtém-se,

$$dG = VdP - SdT; \quad pV = nRT \quad (2.3)$$

Como o processo de mudança de fase da água ocorre a temperatura constante, $dG = VdP$, de modo que a energia livre latente de nucleação, assumindo gás ideal, ΔG_{lat} , pode ser dada por,

$$\Delta G_{lat} = -nRT_e \ln \left(\frac{P_\infty}{P_{sat,e}} \right) \quad (2.4)$$

onde $P_\infty/P_{sat,e}$ representa a razão entre as pressões parciais do vapor no meio envolvente e na interface onde ocorre a nucleação. Expressando o número de moléculas presentes num embrião, $n = \rho_i V/M$, em termos da densidade do gelo, ρ_i , do volume do embrião, V , e da massa molar da água, M , pode-se re-escrever a equação (2.4) da seguinte forma,

$$\Delta G_{lat} = -\frac{\rho_i V R T_e}{M} \ln\left(\frac{P_\infty}{P_{sat,e}}\right) \cong -\frac{\rho_i V R T_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right) \quad (2.5)$$

A nucleação pode ser considerada como o resultado de uma seqüência de processos psicrométricos, esquematizados na figura 2.4. Independentemente dos efeitos de superfície, o vapor d'água necessita primeiramente ser resfriado até o ponto de orvalho (processo A-A'), antes do início do processo de mudança de fase. Tal resfriamento ocorre na camada limite térmica da superfície. Devido às tensões de superfície que agem sobre o embrião, tanto a nucleação homogênea quanto a heterogênea exige uma grande quantidade de energia para romper o equilíbrio e deflagrar o processo. Isso faz com que o resfriamento necessário ultrapasse o ponto de orvalho (processo A'-B). Assim que o equilíbrio é rompido, inicia-se a mudança de fase (processo B-C). Embora sejam processos distintos, os processos de resfriamento (A'-B) e de mudança de fase (B-C) ocorrem simultaneamente. Para totalizar a energia livre necessária para promover uma nucleação, soma-se a parcela sensível (processo A-A'-B) à latente (processo B-C),

$$\Delta G_{tot} = \Delta G_{lat} + \Delta G_{sen} \quad (2.6)$$

Como, no equilíbrio, o sistema tende para uma condição de mínima energia, o embrião procura a menor área superficial para um determinado volume. Desta forma o embrião assume um formato esférico, no caso da nucleação homogênea, e um formato de calota esférica, no caso da nucleação heterogênea, como ilustra a figura 2.5 (Fletcher, 1970). Nesta figura, A_{ag} representa a área da interface embrião-meio envolvente e γ_{ag} representa a energia superficial do embrião. Nesta figura são também indicadas as energias superficiais nas interfaces embrião-substrato e meio envolvente-substrato, representadas respectivamente por γ_{gp} e γ_{ap} , e a área da interface embrião-substrato, A_{gp} .

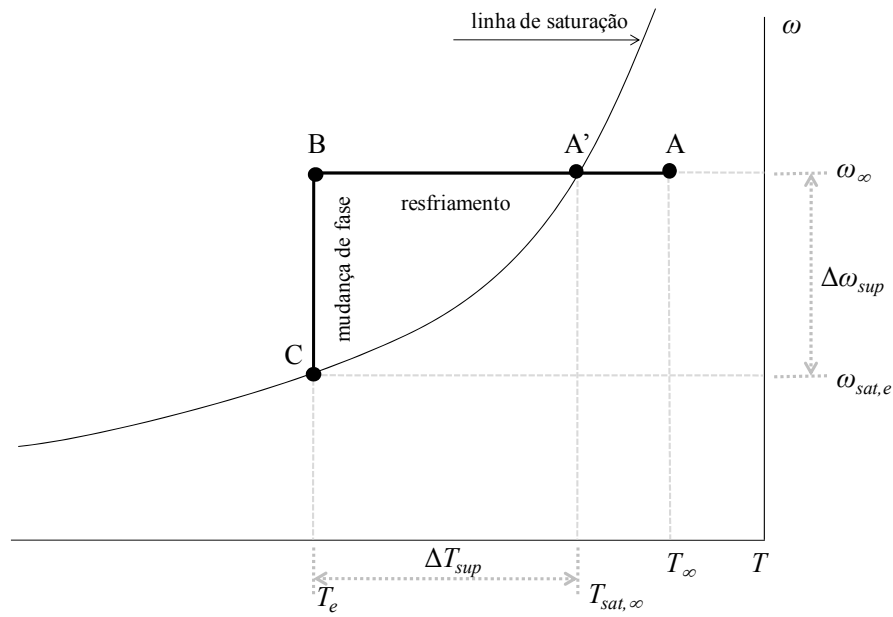


Figura 2.4 – Representação do processo de nucleação em uma carta psicrométrica.

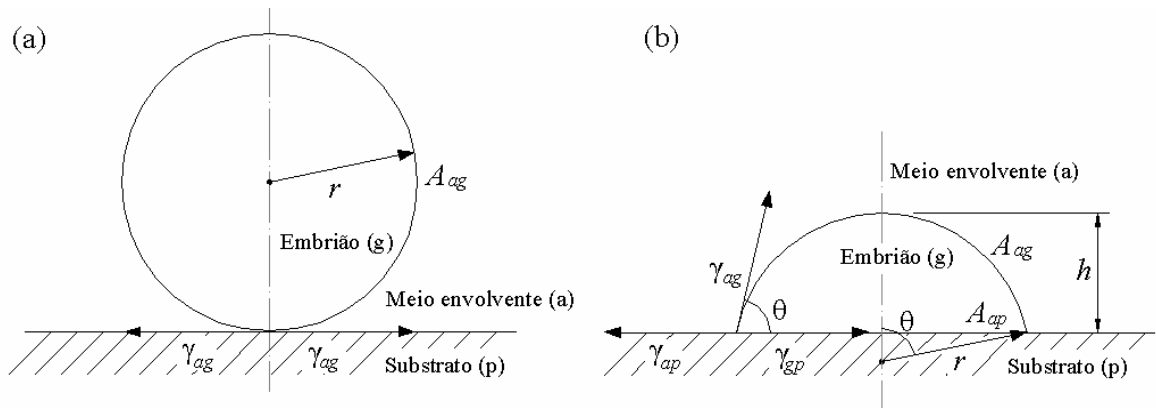


Figura 2.5 – Esquemas de nucleação: (a) homogênea e (b) heterogênea.

2.2.1. Nucleação homogênea

Para um embrião esférico de raio r , a energia livre total necessária para nucleação homogênea inclui uma parcela latente, ΔG_{lat} , dada pela equação (2.5), e uma parcela que corresponde à energia superficial da interface entre o meio envolvente e o embrião, $\gamma_{ag} A_{ag}$,

$$\Delta G_{tot} = -\frac{\rho_i V R T_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right) + \gamma_{ag} A_{ag} \quad (2.7)$$

Como $A_{ag} = 4\pi r^2$ e $V = 4\pi r^3/3$, pode-se re-escrever a equação anterior da seguinte forma,

$$\Delta G_{tot} = -\frac{4\pi}{3} r^3 \frac{\rho_i RT_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right) + \gamma_{ag} 4\pi r^2 \quad (2.8)$$

Dadas as condições psicrométricas, existe um valor crítico para o raio do embrião onde a energia de nucleação atinge um valor máximo. Para obter o valor do raio crítico, r^* , deriva-se a equação acima em relação ao raio e iguala-se a zero,

$$\frac{d(\Delta G_{tot})}{dr} = -4\pi r^2 \frac{\rho_i RT_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right) + \gamma_{ag} 8\pi r = 0 \quad (2.9)$$

logo,

$$r^* = \frac{2\gamma_{ag}}{\frac{\rho_i RT_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right)} \quad (2.10)$$

Substituindo a expressão anterior na equação (2.8), obtém-se a energia livre mínima necessária para a formação de um embrião sob determinadas condições psicrométricas,

$$\Delta G_{tot}^* = \frac{\frac{16\pi}{3} \gamma_{ag}^3}{\left[-\frac{\rho_i RT_e}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right)\right]^2} \quad (2.11)$$

2.2.2. Nucleação heterogênea

Quando a nucleação é heterogênea, isto é, o processo ocorre sobre um substrato, o embrião assume o formato de uma calota esférica. Por conseguinte, agem sobre o embrião tensões de superfície nas três interfaces existentes (ag , gp e ap), originando uma redução tanto da área lateral como do volume do embrião em relação à nucleação homogênea. Para uma calota esférica de raio r , a energia livre total de nucleação, é determinada adicionando-se um termo resultante de um balanço de energia superficial na interface do substrato, $(\gamma_{gp} - \gamma_{ap})A_{gp}$, à energia de nucleação homogênea,

$$\Delta G_{tot} = -\frac{\rho_i VRT_p}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right) + \gamma_{ag} A_{ag} + (\gamma_{gp} - \gamma_{ap}) A_{gp} \quad (2.12)$$

Através de um balanço de energia na interface $a-g-p$ (ver figura 2.5), obtém-se a relação $\cos\theta = (\gamma_{ap} - \gamma_{gp}) / \gamma_{ag}$, onde θ é o ângulo de contato da superfície. Como $V = \pi h^2(3r - h)/3$, $A_{ag} = 2\pi r h$ e $A_{gp} = \pi r^2 \sin^2\theta$, sendo $h = r(1 - \cos\theta)$, ΔG_{tot} pode ser dado por,

$$\Delta G_{tot} = \left[-\frac{\pi}{3} r^3 \frac{\rho_i RT_p}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right) + \gamma_{ag} \pi r^2 \right] (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) \quad (2.13)$$

O parâmetro r^* pode também ser obtido da equação (2.10). Substituindo a equação (2.10) na equação anterior, obtém-se a energia livre mínima necessária para a formação de um embrião em função das condições psicrométricas e do ângulo de contato,

$$\Delta G_{tot}^* = \frac{\frac{4\pi}{3} \gamma_{ij}^3}{\left[-\frac{\rho_{gs} RT_p}{M} \ln\left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,e}}\right) \right]^2} (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) \quad (2.14)$$

Convém observar que para $\theta = 180^\circ$, a equação anterior torna-se a equação (2.11). A figura 2.6 mostra 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 $\theta < 180^\circ$.

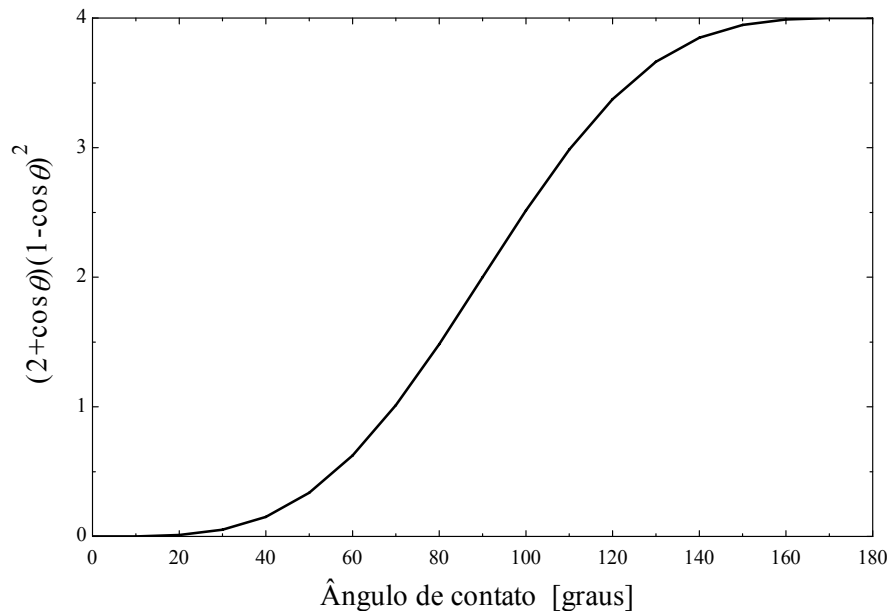


Figura 2.6 – Variação de $(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta)$ com θ .

Segundo dados experimentais obtidos por Volmer e Flood (1934), a nucleação homogênea se inicia quando existe uma taxa mínima de formação de embriões de aproximadamente 2,2 embriões/cm²s. Quando a nucleação é heterogênea, Becker e Doring (1935) propuseram uma função exponencial para estimar a taxa mínima de formação de embriões,

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\Delta G_{tot}^*}{kT_p}\right) \quad (2.15)$$

onde $I_0 = 10^{29} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ é a constante cinética de dessublimação, $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ é a constante de Boltzmann e T_p é a temperatura do substrato.

Admitindo-se, como estimativa preliminar, a mesma taxa mínima de formação de embriões (I), encontrada por Volmer e Flood (1934) torna-se possível resolver a equação 2.15, tanto para processos de dessublimação como condensação, a partir das condições psicrométricas e do ângulo de contato.

A solução da equação 2.15 fornece a temperatura do substrato e conseqüentemente o grau de super-resfriamento (diferença entre a temperatura de orvalho e a temperatura do substrato) onde se inicia o processo de mudança de fase (ver figura 2.7), como uma função do ângulo de contato.

A figura 2.7 foi gerada para uma temperatura de orvalho de 0°C e usando-se as propriedades do gelo para a curva de dessublimação e da água para a curva de condensação.

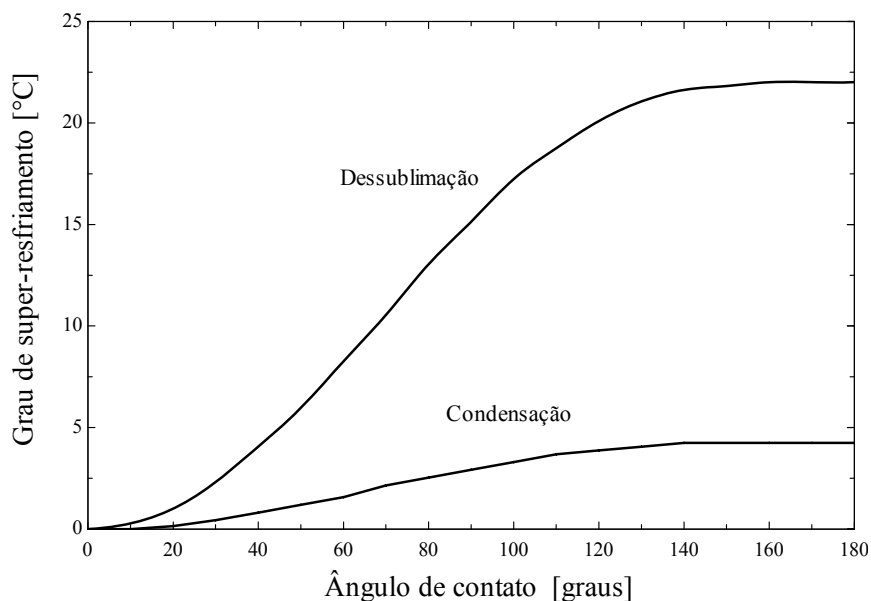


Figura 2.7 – Grau de super-resfriamento em função do ângulo de contato.

A exemplo de Fletcher (1970), repetiu-se a solução da equação 2.15 para diferentes temperaturas de orvalho, quando se observou a independência do grau de super-resfriamento desse parâmetro.

Na figura 2.4 percebe-se que para cada grau de super-resfriamento, $\Delta T_{sup} = T_{sat,s} - T_e$, existe um correspondente grau de supersaturação, $\Delta \omega_{sup} = \omega_{sat,e} - \omega_s$, esse último dependente da temperatura de orvalho do ar.

A figura 2.8 ilustra o grau de supersaturação como uma função do ângulo de contato para uma temperatura de orvalho de 0°C.

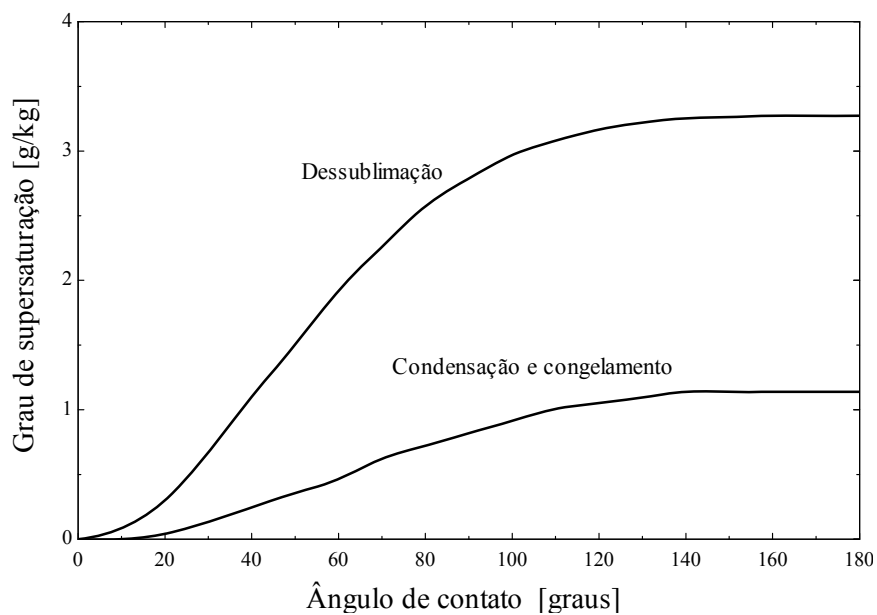


Figura 2.8 – Grau de supersaturação em função do ângulo de contato.

A análise anterior foi realizada com base numa taxa mínima de formação de embriões, observada por Volmer e Flood (1934), para nucleação homogênea e em equações derivadas para processos de nucleação sobre substratos completamente lisos. No entanto, as superfícies dos materiais utilizados em refrigeradores domésticos possuem imperfeições, (ver figura 2.9), que geram sítios propícios à nucleação, uma vez que atenuam os efeitos de superfície que tendem a retardar o processo, além de reduzir o volume dos embriões. Como estes dois fatores podem aumentar substancialmente a taxa de nucleação de embriões, I , uma vez que esta é uma função exponencial da energia de nucleação, a taxa mínima de formação de embriões proposta por Volmer e Flood (1934) pode não se adequar aos tipos de superfície utilizados em refrigeradores domésticos. Deste modo, um estudo experimental do processo de nucleação foi realizado para avaliar a taxa mínima de formação de embriões sobre superfícies rugosas (ver Capítulo 4).

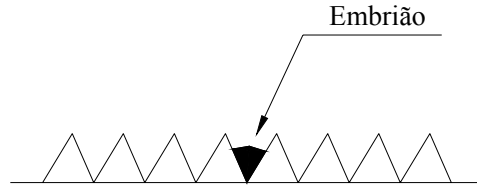


Figura 2.9 – Nucleação sobre uma superfície rugosa.

2.3. Crescimento

Após a nucleação, os cristais de geada crescem por meio da adesão de novas moléculas. Sobre esses cristais ocorrem sucessivas nucleações, formando um meio poroso, que cresce e adensa ao longo do tempo em função da difusão de massa. O modo como os cristais de geada crescem e se acomodam varia, dependendo dos fenômenos de transporte de calor e de massa envolvidos.

Diferentemente do fenômeno da nucleação, o crescimento da geada é tratado de maneira bidimensional, uma vez que depende de sucessivas nucleações sobre a superfície dos cristais já formados, chamados de “ilhas” de nucleação (Fletcher, 1970), como ilustrado na figura 2.3. Tais nucleações são consideradas heterogêneas, pois há interação com uma superfície sólida. Para um embrião de altura z e raio r , pode-se determinar a energia livre total necessária para uma nucleação sobre um cristal da seguinte forma,

$$\Delta G_{tot} = -\pi r^2 z \frac{\rho_i RT}{M} \ln \left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,s}} \right) + \gamma_{ij} 2\pi r z \quad (2.16)$$

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

$$\frac{d(\Delta G_{tot})}{dr} = -2\pi r z \frac{\rho_i RT}{M} \ln \left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,s}} \right) + \gamma_{ij} 2\pi z = 0 \quad (2.17)$$

obtendo-se o seguinte raio crítico,

$$r^* = \frac{\gamma_{ij}}{\frac{\rho_i RT}{M} \ln \left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,s}} \right)} \quad (2.18)$$

que fornece o seguinte ΔG_{tot}^* ,

$$\Delta G_{tot}^* = \frac{\pi z \gamma_{ij}^2}{\frac{\rho_i RT}{M} \ln \left(\frac{\omega_\infty}{\omega_{sat,s}} \right)} \quad (2.19)$$

Similarmente à nucleação sobre substratos, uma taxa de formação de embriões sobre cristais de geada pode ser estimada através da equação (2.15), desconsiderando efeitos de transporte de massa e de energia até o local de crescimento. Como estes efeitos não podem ser desprezados, a taxa de crescimento da geada será determinada através de uma abordagem macroscópica, baseada nos princípios de conservação de massa e energia (ver Capítulo 3).

2.4. Adensamento

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

$$\rho D_{ef} \frac{d^2 \omega}{dx^2} + \dot{\omega} = 0 \quad (2.20)$$

onde D_{ef} simboliza a difusividade efetiva do vapor d'água na geada e $\dot{\omega} = -\rho\alpha\omega$ é o termo de geração. Como a dessublimação do vapor d'água pode ser modelada como uma reação de primeira ordem, o termo de geração pode ser definido como uma função de um coeficiente de dessublimação, α , com sinal negativo, indicando que o vapor d'água é consumido na reação.

Resolvendo analiticamente a equação (2.20) para uma condição de superfície impermeável em $x = 0$, ou seja, $\omega = \omega_{sat,p}$ e $d\omega/dx = 0$, e supondo α e D_{ef} constantes, tem-se como resultado a seguinte distribuição de umidade ao longo da camada de geada,

$$\omega(x_s) = \omega_{sat,p} \cosh \sqrt{\frac{\alpha x_s^2}{D_{ef}}} \quad (2.21)$$

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

$$Ha_x^2 = \frac{t_{dif}}{t_{des}} = \frac{\alpha x_s^2}{D_{ef}} \quad (2.22)$$

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

$$\alpha = \frac{D_{ef}}{x_s^2} \left[\operatorname{arc} \cosh \left(\frac{\omega_{sat,s}}{\omega_{sat,p}} \right) \right]^2 \Rightarrow Ha = \operatorname{arc} \cosh \left(\frac{\omega_{sat,s}}{\omega_{sat,p}} \right) \quad (2.23)$$

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

2.5. Morfologia

Em função de alguns parâmetros como velocidade de crescimento e direção preferencial de crescimento, diferentes formas de cristal de geada podem ser observados para diferentes valores de temperatura e de grau de supersaturação, como mostra a figura 2.10, adaptada de Kobayashi (1958). Algumas das diversas formas de cristal existentes estão ilustradas na tabela 2.1. Dentre elas, as formas dendríticas formam a camada de geada menos densa e com menor condutividade térmica.

Condições típicas para a formação de dendritas são geralmente encontradas em evaporadores de refrigeradores *frost-free*, os quais têm seu desempenho deteriorado em função das propriedades termofísicas da geada. Além das formas dendríticas, formas de agulha também são encontradas nas superfícies de refrigeradores domésticos.

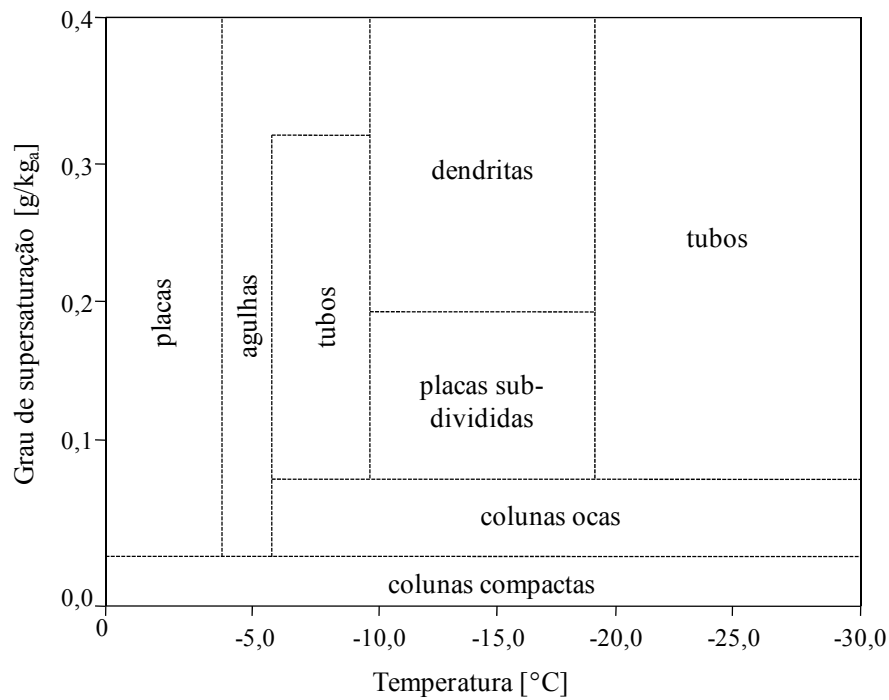


Figura 2.10 – Diagrama ilustrando as diferentes formas de cristal de geada em função do grau de supersaturação e da temperatura da superfície (Kobayashi, 1958).

Tabela 2.1 – Ilustrações das diferentes formas de cristal de geada (Kobayashi, 1958).

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

2.6. Síntese do capítulo

Uma análise dos princípios fundamentais relacionados aos processos de nucleação, crescimento e adensamento da geada foi apresentada e discutida. A nucleação pode ser descrita como o resultado de uma seqüência de processos psicrométricos sensíveis e latentes, e pode ocorrer de maneira homogênea, quando o ar úmido é resfriado abaixo do ponto de orvalho sem que haja interação com um substrato sólido, ou heterogênea, quando tal interação

está presente. Com base na energia livre de Gibbs mínima necessária para desencadear o processo de nucleação, constatou-se que quanto menor o ângulo de contato, menor é o grau de super-resfriamento necessário para promover a nucleação.

O processo de crescimento da geada ocorre por meio da adesão de novas moléculas ao embrião nucleado, que ao atingir um determinado tamanho, passa a exigir uma quantidade de energia para sustentar o crescimento superior à necessária para formar um novo embrião. A sucessão de etapas de adesão molecular e nucleação de embriões origina um meio poroso, que adensa ao longo do tempo por meio da difusão de vapor d'água para o seu interior.

Foram também apresentadas diversas formas de cristais de geada, as quais dependem do grau de supersaturação e da temperatura do substrato. Tal análise permitiu identificar a formação de dendritas nas superfícies de evaporadores de refrigeradores *frost-free*, e de formas de agulha nas demais superfícies internas desses refrigeradores.

CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO

3.1. Aspectos gerais

Como mencionado anteriormente, pode-se definir uma camada de geada como um meio poroso – composto por cristais de gelo formados a partir de processos de nucleação e de crescimento –, que adensa ao longo do tempo devido à difusão de vapor d’água para o seu interior. No Capítulo 2, o processo de nucleação foi analisado em nível molecular, levando em conta os parâmetros de superfície e as condições psicrométricas envolvidas. Já os processos de crescimento e adensamento, apesar de também dependerem de sucessivas nucleações, possuem certas complexidades, principalmente quanto ao transporte de massa e energia, que dificultam a análise molecular. Como consequência, os trabalhos disponíveis na literatura empregam uma abordagem macroscópica, como ilustrada na figura 3.1.

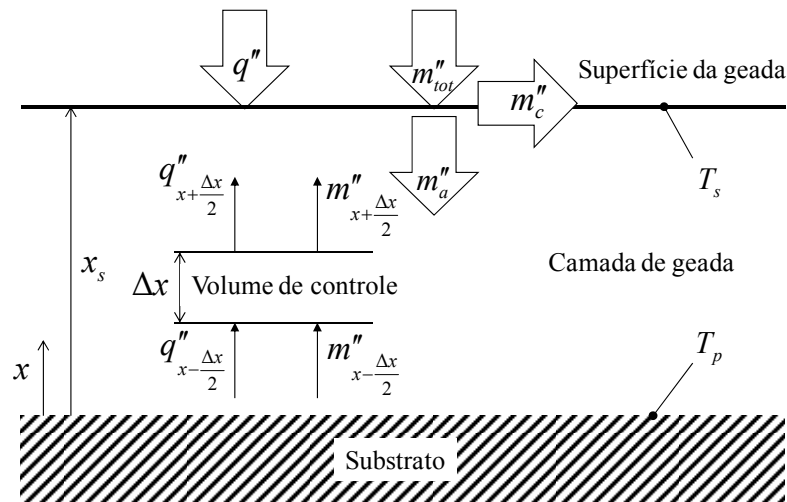


Figura 3.1 – Representação esquemática do modelo físico.

No presente trabalho, foi desenvolvido um modelo matemático simplificado para prever as taxas de crescimento e adensamento da geada sobre superfícies planas ao longo do tempo, procurando incorporar as melhores características dos modelos disponíveis na literatura. Do trabalho de Lee *et al.* (1997), fez-se uso do coeficiente de absorção de vapor e da integração analítica das equações diferenciais obtidas dos balanços de massa e de energia no interior da camada de geada. Dos trabalhos de Na e Webb (2004a,b), incorporou-se algumas características de meio poroso ao coeficiente de difusão, tais como porosidade e tortuosidade do meio. Por fim, do trabalho de Cheng e Cheng (2001), empregou-se uma

correlação empírica para o cômputo da densidade da geada, de modo que a taxa de adensamento pôde ser calculada analiticamente.

Em adição às características mencionadas, as seguintes hipóteses simplificativas foram adotadas: (i) os processos de difusão de calor e massa na camada de geada são considerados quase-estáticos e unidimensionais, (ii) a espessura da camada de geada é uniforme ao longo da superfície, (iii) a pressão é uniforme no interior da camada, (iv) a analogia de Lewis para a transferência de calor e de massa é aplicável, (v) as propriedades termofísicas são constantes.

3.2. Formulação matemática

O modelo consiste na decomposição do fluxo de massa de vapor d'água transferido da corrente de ar para a camada de geada, m''_{tot} , em duas parcelas, uma responsável pelo crescimento, m''_c , e outra pelo adensamento da camada de geada, m''_a , como esquematizado na figura 3.1,

$$m''_{tot} = m''_c + m''_a = \rho_g \frac{dx_s}{dt} + x_s \frac{d\rho_g}{dt} = \lambda_m (\omega_\infty - \omega_{sat,s}) \quad (3.1)$$

onde λ_m representa o coeficiente de transferência de massa e x_s é a espessura da camada de geada.

Hayashi *et al.* (1977) propuseram, com base em apenas três medições, a seguinte correlação empírica para densidade da camada de geada, ρ_g ,

$$\rho_g = 650 \exp(0,277T_s) \quad (3.2)$$

onde T_s é a temperatura da superfície da geada em [°C]; $T_s < 0^\circ\text{C}$.

Tal correlação não representa adequadamente a variação da densidade com o tempo, uma vez que esta também depende do grau de supersaturação, que por sua vez depende da temperatura do substrato (Na e Webb, 2004b).

Dessa forma, optou-se por alterar a correlação de Hayashi *et al.* para a seguinte forma,

$$\rho_g = a \exp(bT_s + cT_p) \quad (3.3)$$

onde T_p é a temperatura do substrato em [°C].

Os coeficientes dessa correlação foram determinados através de dados experimentais gerados especialmente para essa finalidade (ver Capítulo 4). Tal expressão permite o cômputo da densidade inicial da geada em função da temperatura da superfície do substrato, o que distingue o presente modelo dos demais disponíveis na literatura, onde a densidade inicial da geada é arbitrada.

A partir da equação da densidade da geada, pode-se determinar o fluxo de massa responsável pelo adensamento, \dot{m}_a'' , da seguinte forma,

$$\dot{m}_a'' = x_s \frac{d\rho_g}{dt} = ab \exp(bT_s + cT_p) x_s \frac{dT_s}{dt} = b\rho_g x_s \frac{dT_s}{dt} \quad (3.4)$$

Pode-se ainda decompor o diferencial de temperatura da superfície da geada da seguinte forma (para regime quase estático),

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{dx_s}{dt} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_s} = \frac{m_c''}{\rho_g} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_s} \quad (3.5)$$

Voltando à equação (3.4), obtém-se uma expressão para o fluxo de massa responsável pelo adensamento da geada em função da variação da temperatura superficial da geada,

$$\dot{m}_a'' = bx_s m_c'' \frac{dT}{dx} \Big|_{x_s} \quad (3.6)$$

A variação da temperatura superficial da geada é obtida através de um balanço de energia na superfície da mesma, que considera as parcelas relacionadas à convecção, radiação e ao calor latente de dessublimação referente ao fluxo de massa responsável pelo crescimento,

$$k_{g,s} \frac{dT}{dx} \Big|_{x=x_s} = h_c (T_\infty - T_s) + \sigma_r \varepsilon_r (T_\infty^4 - T_s^4) + m_c'' h_{sv} \quad (3.7)$$

onde $h_{sv} = 2830 \text{ kJ/kg}$ é o calor latente de sublimação da água, $\sigma_r = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann, $\varepsilon_r = 0,95$ é a emissividade da geada e k_g é a condutividade térmica da geada.

Incorporando as equações (3.6) e (3.7) ao balanço de massa (3.1), obtém-se uma equação do 2º grau, que fornece o fluxo de massa responsável pela parcela de crescimento da camada de geada,

$$\frac{bx_s h_{sv}}{k_g} m_c''^2 + \left\{ \left[h_c (T_\infty - T_s) + \sigma_r \varepsilon_r (T_\infty^4 - T_s^4) \right] \frac{bx_s}{k_g} + 1 \right\} m_c'' - \lambda_m (\omega_\infty - \omega_s) = 0 \quad (3.8)$$

Uma das raízes da equação anterior gera um valor negativo e deve ser descartada. A outra solução é a seguinte,

$$m_c'' = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (3.9)$$

onde,

$$A = \frac{bx_s h_{sv}}{k_g} \quad (3.10)$$

$$B = \left[h_c (T_\infty - T_s) + \sigma_r \varepsilon_r (T_\infty^4 - T_s^4) \right] \frac{bx_s}{k_g} + 1 \quad (3.11)$$

$$C = -\lambda_m (\omega_\infty - \omega_{sat,s}) \quad (3.12)$$

A taxa de crescimento da camada de geadas é então obtida por,

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{m_c''}{\rho_g} \quad (3.13)$$

Para calcular os fluxos de calor e massa, bem como as taxas de crescimento e adensamento da geadas, precisa-se ainda deduzir uma expressão para determinar a temperatura da superfície da geadas. Para tanto, aplica-se o princípio da conservação de energia ao volume de controle ilustrado na figura 3.1,

$$-q_{x-\Delta x/2}'' + q_{x+\Delta x/2}'' = (-m_{x-\Delta x/2}'' + m_{x+\Delta x/2}'') h_{sv} \quad (3.14)$$

Dividindo ambos os lados por Δx ,

$$\frac{-q_{x-\Delta x/2}'' + q_{x+\Delta x/2}''}{\Delta x} = \frac{(-m_{x-\Delta x/2}'' + m_{x+\Delta x/2}'') h_{sv}}{\Delta x} \quad (3.15)$$

No limite onde $\Delta x \rightarrow 0$,

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{-q_{x-\Delta x/2}'' + q_{x+\Delta x/2}'' - (-m_{x-\Delta x/2}'' + m_{x+\Delta x/2}'') h_{sv}}{\Delta x} = 0 \quad (3.16)$$

Logo, a equação (3.16) assume a seguinte forma,

$$\frac{dq''}{dx} = \frac{dm''}{dx} h_{sv} \quad (3.17)$$

Neste ponto, torna-se necessário determinar a variação do fluxo de massa na camada de geada, dm''/dx . Para tanto, aplica-se o princípio da conservação da massa no volume de controle apresentado na figura 3.1,

$$-m''_{x-\Delta x/2} + m''_{x+\Delta x/2} = \dot{\omega}\Delta x \quad (3.18)$$

Dividindo ambos os lados por Δx ,

$$\frac{-m''_{x-\Delta x/2} + m''_{x+\Delta x/2}}{\Delta x} = \dot{\omega} \quad (3.19)$$

No limite onde $\Delta x \rightarrow 0$,

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{-m''_{x-\Delta x/2} + m''_{x+\Delta x/2}}{\Delta x} - \dot{\omega} = \frac{dm''}{dx} - \dot{\omega} = 0 \quad (3.20)$$

Como a dessublimação do vapor d'água pode ser definida como uma reação de primeira ordem (Lee *et al.*, 1997), o termo de geração pode ser obtido a partir de um coeficiente de dessublimação, α .

$$\dot{\omega} = -\rho\alpha\omega \quad (3.21)$$

Aplicando a lei de Fick,

$$m'' = -\rho \frac{D\varepsilon}{\tau} \frac{d\omega}{dx} \quad (3.22)$$

a equação (3.20) assume a seguinte forma,

$$\frac{d^2\omega}{dx^2} = \frac{\alpha\tau}{D\varepsilon} \omega \quad (3.23)$$

A equação diferencial acima é homogênea com coeficientes constantes, dando origem à seguinte solução,

$$\omega = c_1 \exp\left(\sqrt{\frac{\alpha\tau}{D\varepsilon}}x\right) + c_2 \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha\tau}{D\varepsilon}}x\right) \quad (3.24)$$

Resolvendo analiticamente a expressão anterior para uma condição de superfície impermeável em $x = 0$, ou seja, $\omega = \omega_{sat,p}$ e $d\omega/dx = 0$, obtém-se a distribuição de umidade ao longo da camada de geadas,

$$\omega(x) = \frac{\omega_{sat,p}}{2} \left[\exp\left(\sqrt{\frac{\alpha\tau}{D\varepsilon}}x\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha\tau}{D\varepsilon}}x\right) \right] = \omega_{sat,p} \cosh\left(\sqrt{\frac{\alpha\tau}{D\varepsilon}}x\right) \quad (3.25)$$

Considerando a expressão anterior juntamente com a lei de Fourier, $q'' = -k_g \frac{dT}{dx}$, com a equação (3.17), obtém-se,

$$k_g \frac{d^2T}{dx^2} = -\alpha h_{sv} \rho_{\infty} \omega_{sat,p} \cosh\left(\sqrt{\frac{\alpha\tau}{D\varepsilon}}x\right) \quad (3.26)$$

A integração da equação (3.26) origina,

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-\alpha h_{sv} \rho_{sat,p}}{k_g} \sqrt{\frac{D\varepsilon}{\alpha\tau}} \sinh\left(\sqrt{\frac{\alpha\tau}{D\varepsilon}}x\right) + c_3 \quad (3.27)$$

A integração da equação anterior fornece a distribuição de temperatura na camada de geadas,

$$T = \frac{-\alpha h_{sv} \rho_{sat,p}}{k_g} \frac{D\varepsilon}{\alpha\tau} \cosh\left(\sqrt{\frac{\alpha\tau}{D\varepsilon}}x\right) + c_3 x + c_4 \quad (3.28)$$

Substituindo as condições de contorno para $x = 0$, ou seja, $T = T_p$, e, a condição de acoplamento de energia na superfície da geadas,

$$k_g \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=x_g} = q''_{sen} + m_c'' h_{sv} \quad (3.29)$$

Obtém-se a variação da temperatura da superfície da camada de geadas,

$$T_s = T_p + \frac{q''_{tot} x_s}{k_g} - \frac{h_{sv} \rho_\infty D \varepsilon \omega_{sat,p}}{k_g \tau} (\cosh Ha_x - 1) \quad (3.30)$$

onde,

$$q''_{tot} = q''_{sen} + m''_c h_{sv} \quad (3.31)$$

O fechamento do problema exige expressões para calcular a difusividade do vapor d'água no ar, D , a condutividade média da geada, k_g , os coeficientes de transferência de calor e massa, h_c e h_m , a tortuosidade, τ , e a porosidade da geada, ε . Tais expressões são mostradas a seguir.

3.3. Equações de fechamento

O coeficiente de difusão mássica, D , para uma mistura de dois gases com comportamento de gás ideal é função direta da temperatura e inversa da pressão, $D \sim T / p$ (Baehr e Stephan, 1996). Como o processo de formação da geada ocorre a pressão praticamente constante, a difusividade do vapor no ar foi expressa através de uma função linear da temperatura a partir dos dados apresentados por Lee *et al.* (1997), relacionados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Difusividade do vapor no ar para diferentes temperaturas (Lee *et al.*, 1997).

Temperatura	Difusividade
[°C]	[cm ² /s]
-45,6	0,163
-40,0	0,169
-34,4	0,176
-28,9	0,183
-23,3	0,190
-17,8	0,198
-12,2	0,205
-6,7	0,213
-1,1	0,220
4,4	0,228
10,0	0,236
15,6	0,243

A difusividade do vapor d'água no ar foi então correlacionada com a temperatura, através da seguinte expressão:

$$D = 0,001T + 0,221 \quad (3.32)$$

onde T é dada em [°C] e D em [cm²/s].

A figura 3.2 ilustra graficamente o comportamento da equação (3.32).

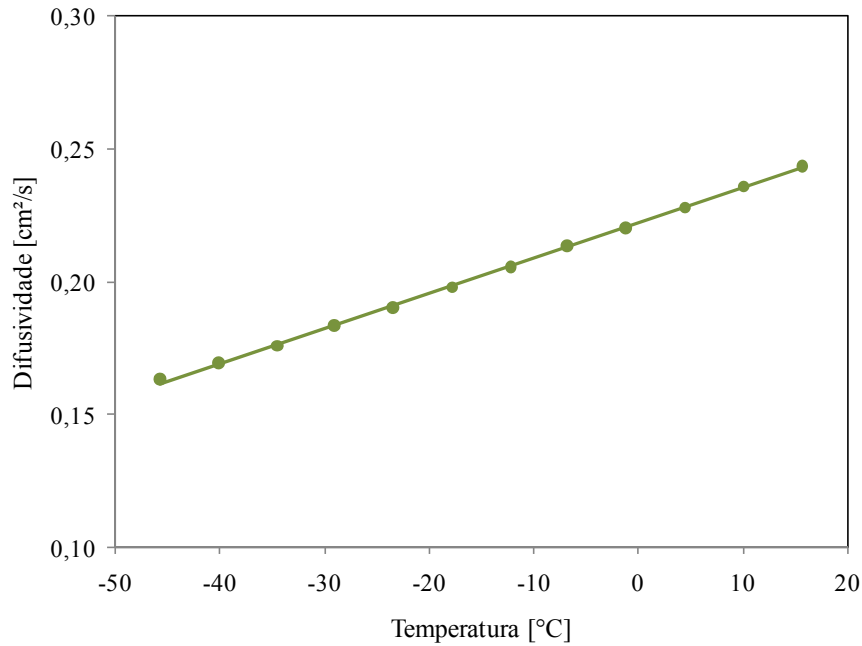


Figura 3.2 – Variação da difusividade com a temperatura.

A condutividade térmica da geada, k_g , foi correlacionada com a densidade da geada, dentro de uma faixa de $50 \leq \rho_g \leq 400 \text{ kg/m}^3$ (Lee *et al.*, 1997),

$$k_g = 0,132 + 3,13 \cdot 10^{-4} \rho_g + 1,60 \cdot 10^{-7} \rho_g^2 \quad (3.33)$$

onde ρ_g expressa em kg/m^3 .

O coeficiente de transferência de calor, λ_c , foi calculado através da correlação sugerida por Yamakawa (1972) para escoamentos sobre placas planas horizontais, válida para $Re_L Pr \geq 100$,

$$Nu_L = \frac{\lambda_c L}{k_\infty} = 0,034 Re_L^{0,8} \quad (3.34)$$

onde,

$$Re_L = \frac{V_\infty L \rho_\infty}{\mu_\infty} \quad (3.35)$$

$$Pr = \frac{\mu_\infty c_{p,\infty}}{k_\infty} \quad (3.36)$$

O coeficiente de transferência de massa, λ_m , foi, por sua vez, obtido a partir da analogia de Lewis,

$$\frac{Nu_L}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n} \Rightarrow \frac{\lambda_c}{\lambda_m} = c_{p,m} Le^{1-n} \quad (3.37)$$

onde $c_{p,m} = c_{p,as} + c_{p,v}\omega_s$ é o calor específico da mistura ar-vapor. O número de Lewis (Le) é obtido da seguinte forma,

$$Le = \frac{\alpha}{D_{ef}} \quad (3.38)$$

A densidade do gelo foi expressa como uma função linear da temperatura,

$$\rho_i = 916,7 - 0,136T_s \quad (3.39)$$

onde T_s é expressa em [°C].

A figura 3.3 ilustra graficamente o comportamento da equação (3.39), dentro de uma faixa de -45°C a 0°C.

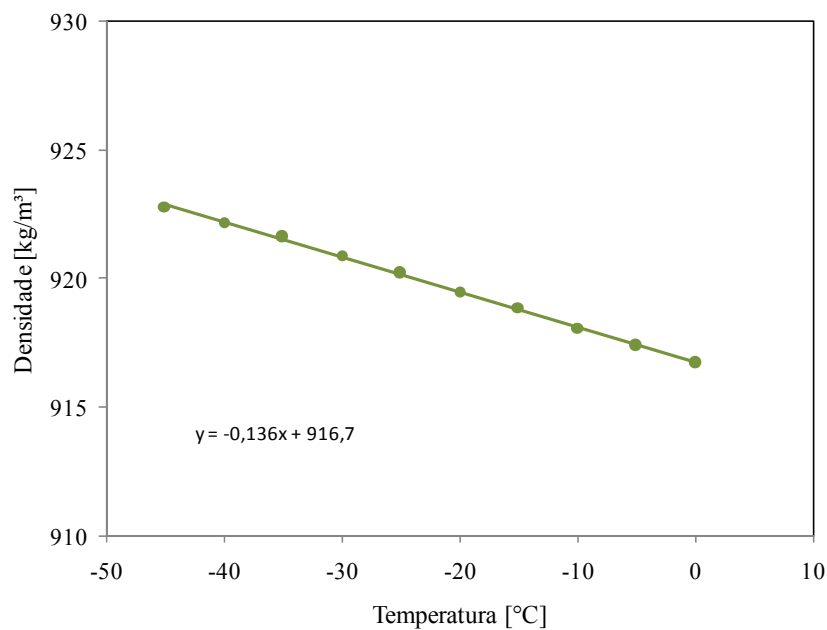


Figura 3.3 – Variação da densidade do gelo com a temperatura.

A porosidade, ε , foi calculada a partir das densidades da geada, ρ_g , do gelo sólido, ρ_i , e do ar úmido, ρ_∞ ,

$$\varepsilon = \frac{\rho_g - \rho_i}{\rho_\infty - \rho_i} \quad (3.40)$$

A tortuosidade, τ , foi calculada a partir do modelo de Zehnder, citado por Lee (2003),

$$\tau = \frac{\varepsilon}{1 - \sqrt{1 - \varepsilon}} \tag{3.41}$$

3.4. Metodologia de solução do modelo

A exemplo de O'Neal (1982), empregou-se $x_s = 0,001\text{mm}$ como condição inicial para a espessura da camada de geadá. A densidade inicial da geadá foi obtida em função das temperaturas do substrato e da superfície da geadá, $\rho_g = f(T_s, T_p)$, que, no instante inicial, são iguais, $T_s = T_p$. De posse destas informações, determina-se a espessura da geadá ao longo do tempo através do processo esquematizado na figura 3.4.

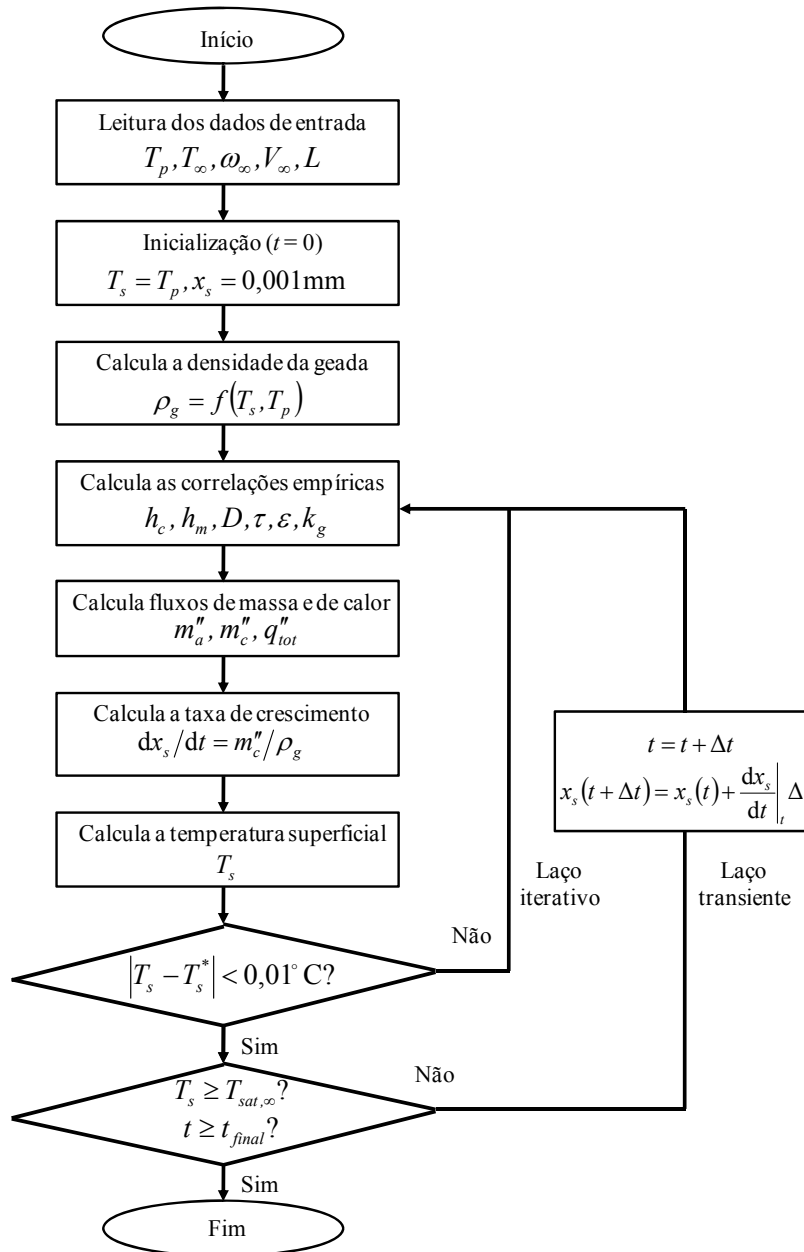


Figura 3.4 – Algoritmo de solução.

O processo inicia com a leitura das variáveis de entrada: temperatura e comprimento da superfície, umidade, temperatura e velocidade do ar. Em seguida, inicia-se o processo de cálculo, considerando-se a temperatura da superfície da geada igual à temperatura do substrato, e a espessura inicial de 0,001mm. A densidade da geada é então determinada a partir da temperatura do substrato. Na seqüência, os parâmetros de fechamento são calculados para o instante inicial. Em seguida, as equações algébricas que governam a distribuição de umidade e temperatura ao longo da camada de geada são resolvidas através do método das substituições sucessivas para se obter o valor de T_s . De posse de m_a'' e m_c'' , calcula-se a taxa de variação da espessura, dx_s/dt . O valor da espessura da geada para o instante subsequente, $t + \Delta t$, é obtido a partir da equação de Euler,

$$x_s(t + \Delta t) = x_s(t) + \left. \frac{dx_s}{dt} \right|_t \Delta t \quad (3.42)$$

O valor de Δt foi fixado em 10^{-6} s no instante de partida. Nos instantes subsequentes, tal valor aumenta exponencialmente, de acordo com a seguinte equação,

$$\Delta t = \Delta t_1 + (\Delta t_0 - \Delta t_1) \exp[-(t - t_0)/\tau_t] \quad (3.43)$$

onde $\tau_t = 10$, $\Delta t_0 = 10^{-2}$ s e $\Delta t_1 = 1$ s. O parâmetro τ_t altera o tempo de solução do modelo, mas não afeta o resultado final, como mostrado na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Variação do tempo de solução do modelo com o parâmetro τ_t .

τ_t	Tempo de solução	Espessura final da geada
	[s]	[mm]
1	59,9	2,585
10	60,4	2,585
100	63,8	2,585
1000	103,5	2,585
10000	387,2	2,585

A simulação encerra quando o tempo final pré-estabelecido é atingido ou quando a temperatura da superfície da geada se torne o ponto de orvalho. O modelo foi validado com dados experimentais obtidos através de um aparato experimental especificamente projetado para essa finalidade (ver Capítulo 4).

3.5. Síntese do capítulo

Um modelo semi-empírico, que prevê a variação da espessura de uma camada de geada ao longo do tempo foi desenvolvido considerando a geada como um meio poroso. Uma correlação empírica para a densidade da geada foi proposta e seus coeficientes ajustados com base em dados experimentais obtidos no presente trabalho (Capítulo 4). Tal correlação prevê a densidade inicial da geada como função da temperatura do substrato, o que difere o presente trabalho de outros encontrados na literatura, onde a densidade inicial precisa ser arbitrada.

CAPÍTULO 4 - EXPERIMENTOS FUNDAMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados em duas frentes, uma denominada experimentos fundamentais (descrita neste capítulo) e outra denominada experimentos aplicados (detalhada no capítulo seguinte). Enquanto a primeira foi motivada pela necessidade de informações para subsidiar e validar os modelos apresentados nos capítulos anteriores, a segunda foi realizada com o objetivo de visualizar e de identificar as condições de operação que propiciam o processo de formação de geada no interior de refrigeradores domésticos.

Na primeira etapa, foram realizados diversos experimentos para investigar os processos de nucleação, crescimento e adensamento da geada sobre superfícies planas horizontais. Para tanto, um aparato experimental foi especialmente projetado e construído, como descrito a seguir.

4.1. Aparato experimental

Para garantir um controle rigoroso das condições ambientais, a bancada experimental foi instalada no interior de uma câmara climatizada (ver figura 4.1), onde a temperatura e a umidade relativa do ar são controladas. A câmara permite variações de temperatura entre -20°C a 45°C ($\pm 0,2^{\circ}\text{C}$) com umidade entre 50% e 90% ($\pm 1\%$). Para atender a faixa de temperatura de -20°C a 15°C , utiliza-se uma unidade de refrigeração, juntamente com um conjunto de resistências elétricas, dispostas em paralelo e controladas por um PID. A umidade removida pelo sistema de resfriamento é reposta através de uma bandeja de umidificação, onde as resistências elétricas são controladas por outro PID. Para atender a faixa de temperatura de 15°C a 45°C , a unidade de refrigeração é substituída por um condicionador de ar do tipo *Split*, instalado em paralelo.

A movimentação do ar no interior da câmara é induzida por um ventilador tangencial, que insufla o ar num forro falso perfurado, de onde é então distribuído por toda a região de testes. Da região de testes, o ar passa pelo piso da câmara, que também é perfurado, e segue para uma serpentina de resfriamento e desumidificação, onde existe um by-pass, controlado por um *damper*. O sistema de movimentação de ar, ilustrado na figura 4.1, mantém a velocidade do ar, no sentido vertical, entre 0,1m/s e 0,25m/s ($\pm 0,05\text{m/s}$).

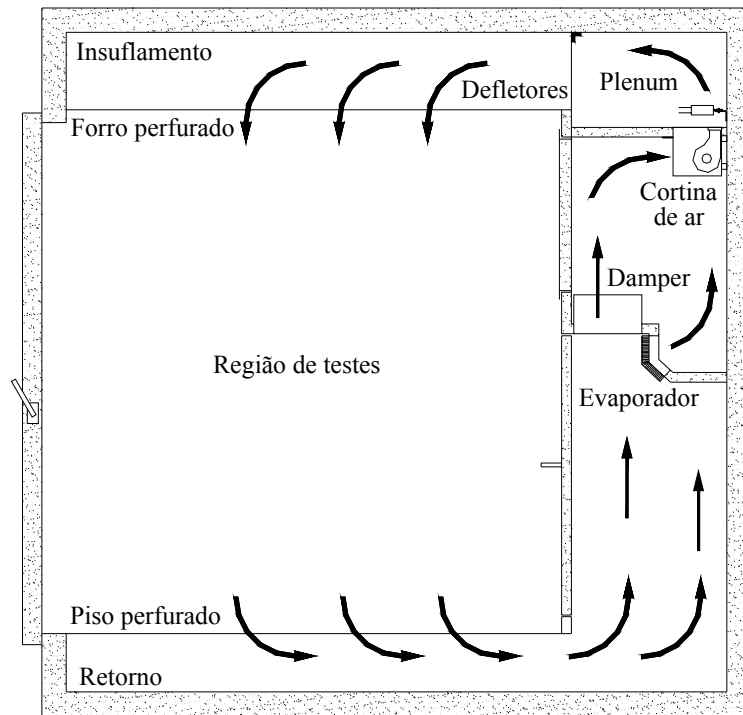


Figura 4.1 – Corte lateral da câmara – visualização do fluxo de ar.

O aparato experimental propriamente dito (ver figura 4.2) foi especialmente construído para investigar a formação de geada sobre superfícies planas horizontais. A bancada consiste de uma placa de alumínio resfriada através de um módulo termoelétrico, posicionada no interior de um túnel de vento com secção de testes transparente. Para avaliar o crescimento e o adensamento da geada ao longo do tempo, utiliza-se a própria placa de alumínio como superfície de teste. Já nos experimentos onde o foco é o estudo da nucleação da geada, a placa é usada como suporte para a fixação das amostras. Nestes casos, as amostras, cujas dimensões devem coincidir com as dimensões da placa de alumínio (100 x 100 mm), são fixadas com auxílio de pasta térmica.

A velocidade do ar sobre a superfície de teste é garantida por um ventilador axial com rotação variável (QUALITAS Q120A3). Antes da secção de testes existem duas telas perfuradas para homogeneizar o campo de velocidades. A velocidade do ar é medida por um anemômetro de fio quente (INSTRUTHERM TAFR-180), com incerteza de medição de $\pm 0,1$ m/s.

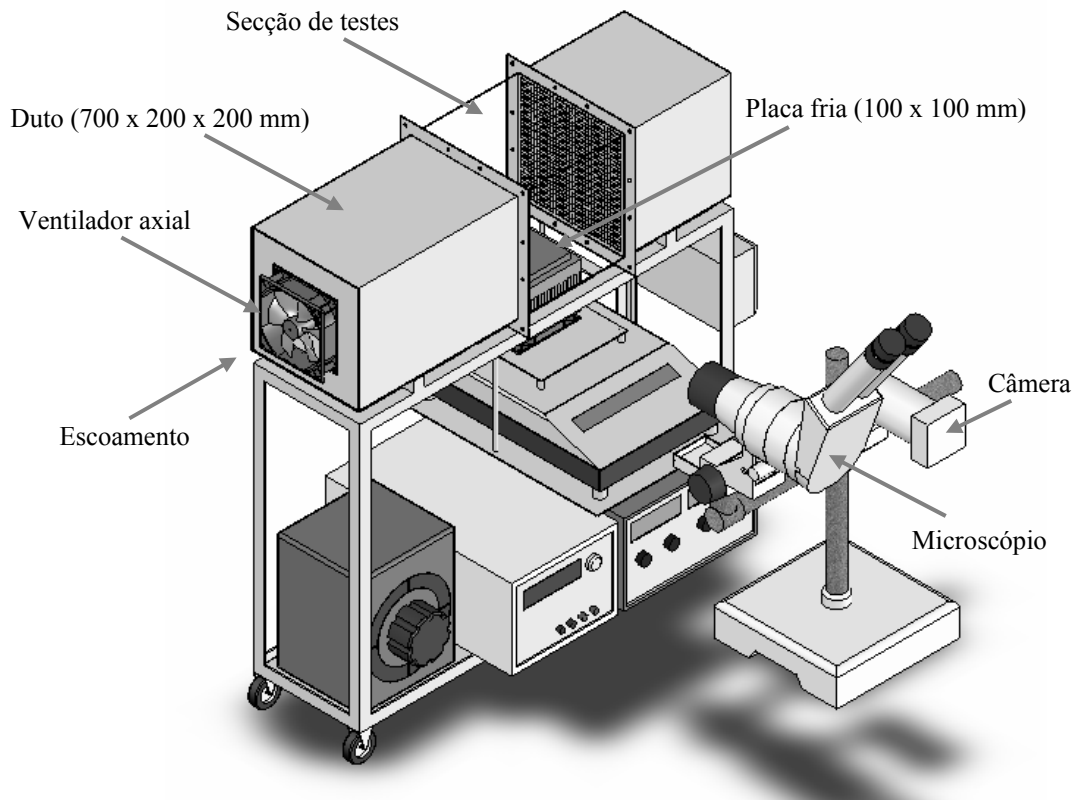


Figura 4.2 – Túnel de vento para estudo da formação de geada sobre superfícies planas.

O módulo termoelétrico (MELCOR MPA-250-12), com capacidade máxima de 74W, possui, além da placa de alumínio no lado frio, um dissipador de calor, também fabricado em alumínio, no lado quente. A temperatura da placa fria, monitorada por um termopar Tipo-T, é controlada através da variação da corrente fornecida à célula termoelétrica. A temperatura do ar é também monitorada por um termopar Tipo-T. A seção de testes foi fabricada com acrílico transparente para permitir a visualização da geada. A umidade relativa do ar é medida através de um transdutor capacitivo (VAISALA HMT-337), com incerteza de medição de $\pm 1\%$.

Durante o processo de medição da densidade da geada, o módulo termoelétrico foi retirado do túnel de vento e colocado sobre uma balança eletrônica (PINACLE P-203), como ilustrado na figura 4.3a. A temperatura da superfície da geada foi medida através de uma câmera infravermelho (FLIR THERMACAM – SC500), ilustrada na figura 4.3b, com incerteza de medição de $\pm 1^\circ\text{C}$.

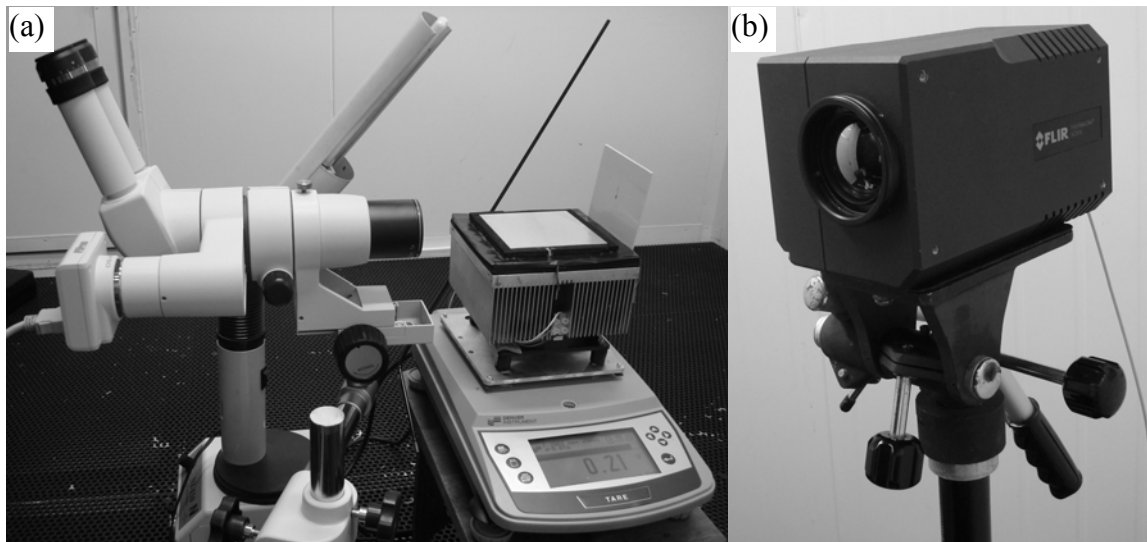


Figura 4.3 – (a) Aparato de medição da densidade da geada, (b) câmera infravermelho.

A camada de geada formada sobre a placa fria é fotografada ao longo do tempo através de um sistema de aquisição e tratamento de imagens. Tal sistema é composto por uma câmera digital com 4,1 megapixels de resolução máxima (NIKON DS Fi1), ilustrada na figura 4.3a, um microscópio estereoscópico (SMZ 800) dotado de um conjunto de lentes (NIKON) com relação de ganho máxima de 32x e um programa de tratamento de imagens (NIKON – NIS ELEMENTS BASIC RESEARCH). Uma escala de medição com 1mm de comprimento, dividida em cem partes de $10\mu\text{m}$ (ver figura 4.4) é utilizada para calibrar o sistema de medição do programa.

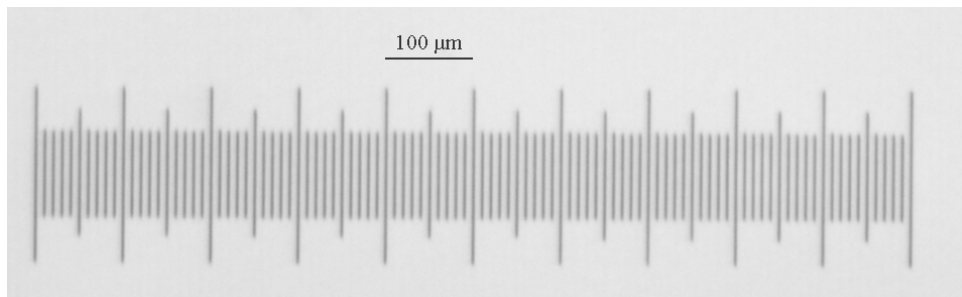


Figura 4.4 – Escala de medição da espessura da geada.

4.2. Procedimentos experimentais

Antes da realização dos ensaios voltados ao estudo da nucleação, as amostras precisaram ser alteradas e ter o seu ângulo e rugosidade medidos. Tais procedimentos são descritos a seguir, juntamente com os processos de medição da espessura e da massa de geada.

4.2.1. Tratamento das amostras

Foram utilizadas 5 amostras de material polimérico (poliestireno), utilizado na fabricação dos componentes internos de refrigeradores domésticos. Tal material possui uma camada externa de material virgem, que proporciona brilho, e uma camada interna de material processado. As amostras são quadradas, possuem a mesma espessura, 2mm, e a mesma área, 0,01m². Uma delas foi mantida inalterada e as demais sofreram os seguintes tratamentos superficiais: aplicação de cera automotiva (JOHNSON - GRAN PRIX), revestimento com verniz acrílico (RENNER - AUTO COLOR JET) e desbastes com lixas 100 e 50 (NORTON K-246). As amostras e os seus respectivos tratamentos superficiais estão indicados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Relação das amostras e respectivos tratamentos superficiais.

Amostra	Tratamento superficial
I	Nenhum
II	Verniz (RENNER – AUTO COLOR JET)
III	Cera automotiva (JOHNSON - GRAND PRIX)
IV	Lixa 100 (menos rugosa)
V	Lixa 50 (mais rugosa)

4.2.2. Medição do ângulo de contato

Existem diversos métodos para medição do ângulo de contato da água sobre superfícies planas, os quais podem ser classificados em estáticos e dinâmicos. No presente trabalho, adotou-se um método estático, que consiste na deposição de uma gota de água com volume conhecido sobre a amostra, mantida na posição horizontal por meio de um pedestal. A gota é então fotografada por uma câmera de alta resolução (4,1 megapixel) e relação de ganho de 8x. O volume da gota é medido por uma bureta com menor divisão de escala de 0,02ml, ilustrada na figura 4.5 juntamente com o restante do aparato de medição.

O procedimento de medição consiste em posicionar a amostra no pedestal, ajustar o nível da superfície e, em seguida, posicionar a bureta na vertical e, com o bico dosador afastado 8 mm da amostra. A câmera digital é então ajustada. Após os ajustes, deposita-se uma gota com volume de 0,1ml sobre a região central da amostra, ajusta-se o foco da câmera e registra-se a imagem da gota no computador. Em seguida mede-se o ângulo de contato, usando-se o software de tratamento de imagens UTHSCSA IMAGE TOOL (Wilcox *et al.*, 2006), cuja interface gráfica está ilustrada na figura 4.6. Durante as medições o ambiente foi mantido em 20°C (±0,2°C) e 50% (±5%) de umidade relativa.

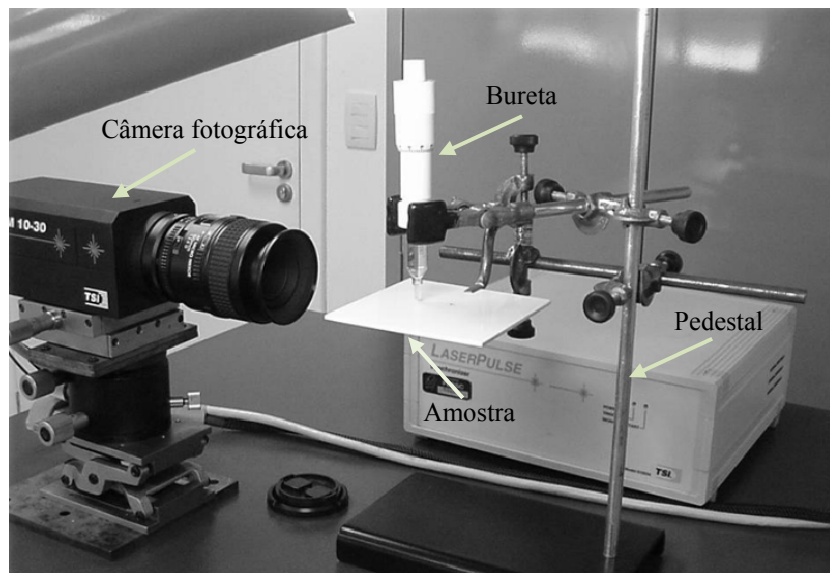


Figura 4.5 – Aparato para medição do ângulo de contato.

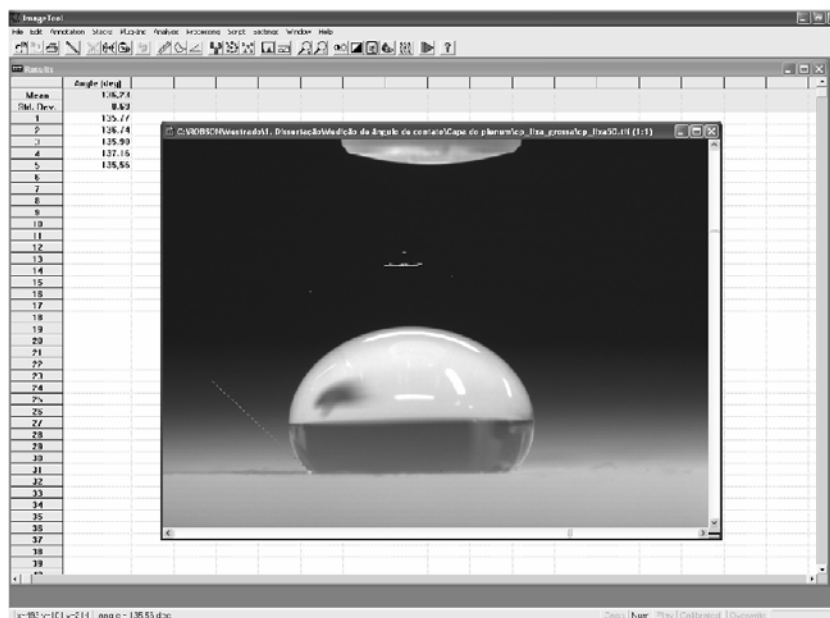


Figura 4.6– Software utilizado para medir o ângulo de contato (UTHSCSA IMAGE TOOL).

Cada amostra foi submetida a medições do ângulo de contato em cinco posições, escolhidas aleatoriamente. Em cada posição foram realizadas 5 medições. A incerteza de medição do ângulo de contato, com base no desvio padrão das medições, manteve-se em torno de $\pm 5^\circ$ para as 5 amostras. Os valores médios do ângulo de contato, para cada amostra, são mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Ângulo de contato para diferentes amostras.

Amostra	Ângulo de Contato
	[graus]
I - Original	73
II - Verniz	84
III - Cêra	97
IV - Lixa 100	119
V - Lixa 50	130

O ângulo de contato de uma superfície depende principalmente de dois fatores, sendo um deles a afinidade química entre o substrato e a água. O material das amostras e os revestimentos empregados (cera e verniz) são ambos de natureza apolar, ao contrário da água, que é polar. Isto explica a fraca interação entre a água e a superfície das amostras. Outro fator que afeta o ângulo de contato é a rugosidade da superfície, que age no sentido de diminuir o molhamento da superfície.

4.2.3. Medição da rugosidade

A rugosidade superficial depende do tipo de acabamento que, por sua vez, depende da máquina-ferramenta ou do processo de fabricação utilizado na produção do material. Na análise dos desvios de uma superfície real em relação a uma superfície ideal, podem-se distinguir os erros macro-geométricos ou erros de forma, que podem ser medidos com instrumentos de medição convencionais, e os erros micro-geométricos, que podem ser medidos somente com instrumentos especiais, tais como rugosímetros e perfilógrafos. Estes instrumentos podem ser ópticos ou eletromecânicos. No presente trabalho, empregou-se um instrumento eletromecânico, esquematizado na figura 4.7.

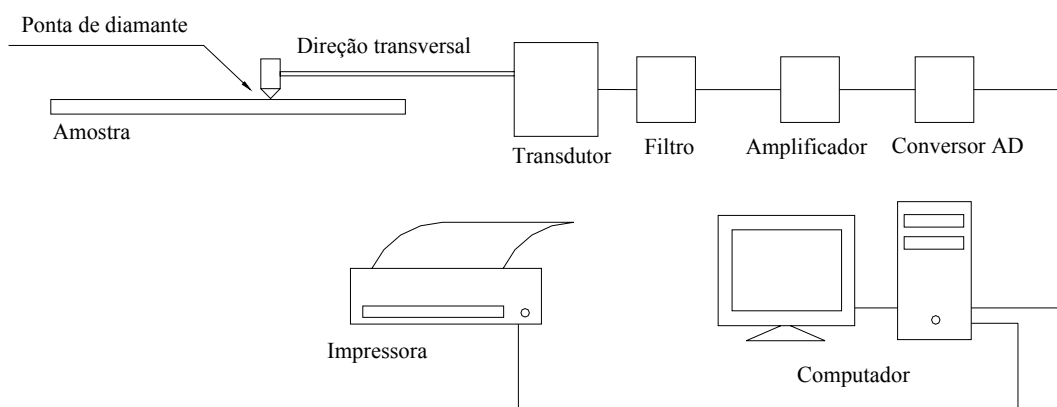


Figura 4.7 – Esquema de medição da rugosidade através de dispositivo eletromecânico.

A rugosidade foi medida no laboratório de metrologia da Embraco – Empresa Brasileira de Compressores S/A, através de um rugosímetro TAYLOR-HOBSON, modelo FORM TALYSURF INTRA, mantido num ambiente com temperatura de 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) (ver figura 4.8). As medições foram realizadas seguindo as recomendações da norma NBR-ISO 4287 (2002).



Figura 4.8 – Rugosímetro TAYLOR-HOBSON – FORM TALYSURF INTRA.

O processo de medição inicia com a colocação da amostra em uma base, com o sentido de medição paralelo ao braço do suporte da agulha de medição. Em seguida, avança-se a agulha até o ponto de início da medição, e retorna-se 5,6mm, valor esse conhecido como comprimento de medição. O sistema de aquisição e processamento de dados empregado conta com um micro-computador e com um software específico para avaliação de perfis (TAYLOR-HOBSON, 2006).

Existem diversos parâmetros relacionados à rugosidade de uma superfície, tais como rugosidade média, rugosidade total, altura de picos, profundidade de vales e fator de assimetria. Neste trabalho, optou-se pelo uso da rugosidade média, Ra , definida da seguinte forma,

$$Ra = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} h_r(x) dx \quad (4.1)$$

onde L_m é o comprimento de medição e h_r representa a altura de um pico em relação à linha média do perfil, como ilustrado na figura 4.9. Os resultados das medições de rugosidade são mostrados na tabela 4.3.

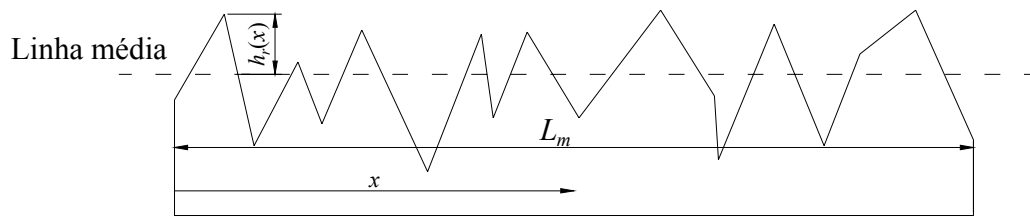


Figura 4.9 – Perfil médio de uma superfície rugosa.

Tabela 4.3 – Rugosidade das amostras.

Amostra	Rugosidade média (R_a)
	[μm]
I - Original	0,05
II - Verniz	0,11
III - Cêra	0,06
IV - Lixa 100	3,37
V - Lixa 50	6,92

Da tabela 4.3, percebe-se que a superfície encerada apresentou uma rugosidade média levemente superior à superfície original. Isto se deve à baixa resistência mecânica da cera, insuficiente para suportar a pressão da agulha utilizada para medir a rugosidade.

4.2.4. Medição da espessura da geada

Antes de iniciar o processo de medição da espessura da geada deve-se posicionar o centro da lente do microscópio paralelamente ao perfil da superfície de teste. Em seguida, o *software* de aquisição e tratamento de imagens (NIKON – NIS ELEMENTS BASIC RESEARCH, 2007) deve ser calibrado através da escala de medição. Para tanto, posiciona-se a escala à frente da superfície de teste, ajusta-se o foco e registra-se uma fotografia, que servirá para estabelecer o número de pixels das fotografias seguintes. Terminada a calibração, é extremamente importante manter o sistema câmera-microscópio e o aparato experimental imóveis, uma vez que a calibração é válida para uma única distância focal. Após a calibração, estabelece-se o perfil de referência ($x = 0$) e utiliza-se a cota vertical do programa para medir a espessura máxima da geada nos instantes de tempo determinados. O procedimento de medição em questão está ilustrado na figura 4.10.

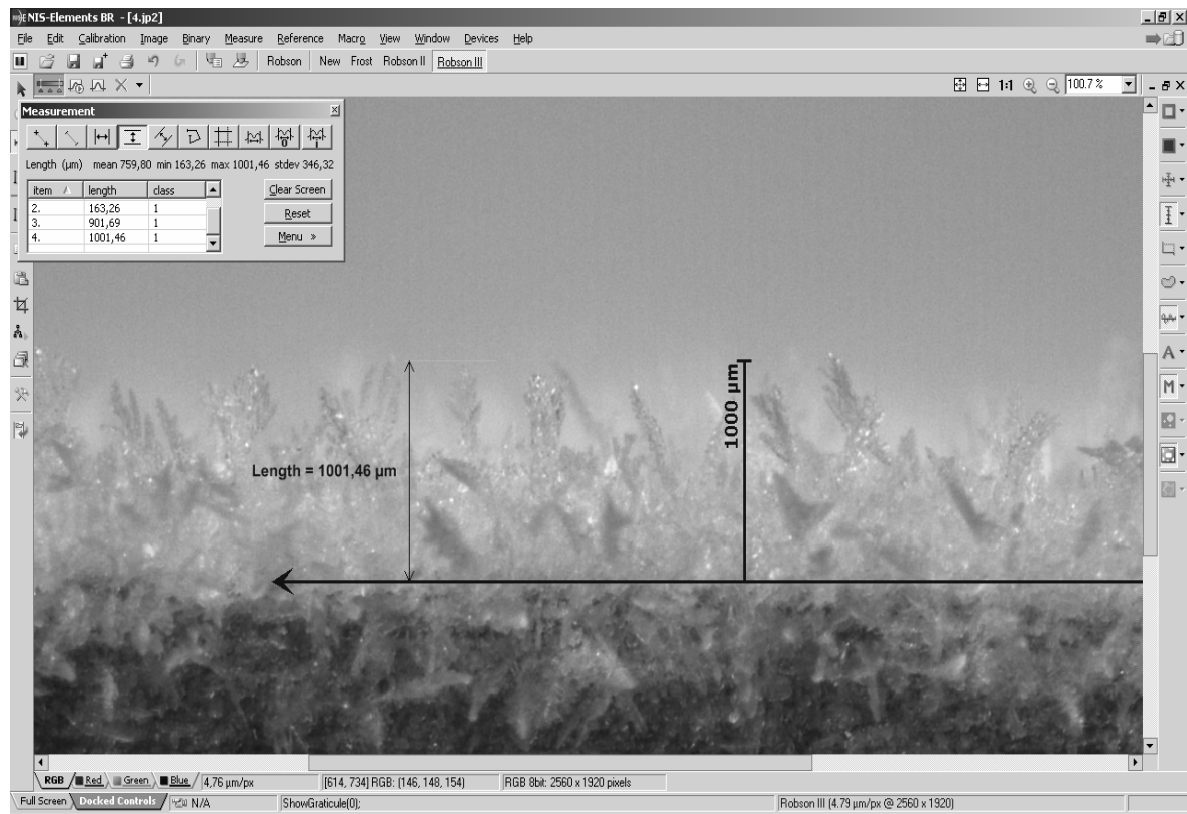


Figura 4.10 – Interface do *software* e procedimento de medição da espessura da gead.

4.2.5. Medição da massa da gead

A massa de gead depositada sobre a superfície de teste foi medida apenas durante os experimentos para determinação da densidade da gead. Nesse caso, o módulo termoeletrico foi retirado da seção de testes e posicionado sobre a balança, a qual foi devidamente zerada antes do início dos experimentos. Tal procedimento teve por objetivo eliminar erros de medição associados com a vedação no encaixe entre a seção de testes e o módulo termoeletrico.

4.2.6. Procedimento de ensaio

Apesar de diferentes, todos os experimentos realizados seguiram os mesmos procedimentos básicos. Com o aparato experimental no interior da câmara climatizada, posiciona-se o microscópio em relação à superfície de teste, e ajusta-se o foco e a distância focal (75 mm). Em seguida, cobre-se a superfície de teste com um filme de cloreto de Polivinila (PVC) e aciona-se o ventilador do túnel de vento e o módulo termoeletrico. Assim que a temperatura da superfície de teste atinge a condição desejada, retira-se o filme e iniciam-se os processos de registro fotográfico e de aquisição de temperatura e umidade relativa ao longo do tempo. O tempo total de cada experimento foi estabelecido em 2h.

Além dos procedimentos básicos, cada série de experimentos exige certos procedimentos experimentais específicos. Durante os testes para investigar o crescimento e o adensamento da geada, por exemplo, registra-se uma fotografia da geada a cada minuto, durante os primeiros 5 minutos. Após este intervalo e até os 30 primeiros minutos, as fotografias passam a ser registradas a cada 5 minutos. A partir deste instante, até o final do ensaio, a geada é fotografada a cada 10 minutos. O teste é encerrado após 2h, quando o módulo termoelétrico e o ventilador axial são desligados. Quando a geada se torna líquida, inicia-se a secagem da superfície e, a partir do momento que esta está totalmente seca, aguarda-se um período de 1h, recobre-se a superfície novamente com o filme de PVC e inicia-se um novo ensaio.

Nos experimentos para medição da densidade da geada, as fotografias são registradas apenas no início do teste, 1h após o início e no fim do teste. Juntamente com as fotografias, são registradas, nos mesmos instantes, a massa e as temperaturas superficiais da geada e do substrato. O processo de encerramento e reinício destes experimentos é idêntico ao dos demais. Os experimentos realizados com foco no estudo da nucleação da geada seguem os mesmos procedimentos dos ensaios para medição da densidade, exceto pelo fato de que a massa não é registrada.

4.3. Resultados

4.3.1. Ensaio para estudo da nucleação

De acordo com os princípios fundamentais da nucleação, a taxa de formação de embriões sobre uma superfície é tanto maior quanto menor o ângulo de contato, maior a rugosidade e maior o grau de super-resfriamento. Exceto pela rugosidade, o efeito dessas variáveis sobre a nucleação pode ser prevista matematicamente, como descrito no Capítulo 2. Os experimentos aqui reportados foram realizados com o intuito de validar o modelo matemático introduzido no Capítulo 2 e também para explorar o efeito da rugosidade sobre a taxa de nucleação de embriões. Para tanto, diferentes amostras de material foram submetidas a vários graus de super-resfriamento, mantendo-se as condições do ar ambiente fixas nos valores indicados na tabela 4.4. Tais condições foram escolhidas para que o ponto de orvalho fosse inferior a 0°C.

Tabela 4.4 – Condições ambientais para os ensaios de nucleação.



A tabela 4.5 ilustra a taxa mínima de formação de embriões como uma função do grau de super-resfriamento, para uma superfície com ângulo de contato de 90° e para as condições psicrométricas indicadas na tabela 4.4. Tais valores foram derivados a partir do modelo de nucleação apresentado no Capítulo 2.

Tabela 4.5 – Variação da taxa de formação de embriões em função do grau de super-resfriamento ($\theta=90^\circ$).

Grau de super-resfriamento	Taxa mínima de formação de embriões
[°C]	[embriões/cm ² s]
1,01	$5,8 \cdot 10^{-200}$
1,26	$2,8 \cdot 10^{-120}$
1,51	$8,6 \cdot 10^{-77}$
1,76	$1,9 \cdot 10^{-50}$
2,01	$2,7 \cdot 10^{-33}$
2,26	$1,7 \cdot 10^{-21}$
2,51	$5,0 \cdot 10^{-13}$
2,76	$9,8 \cdot 10^{-7}$
2,88	$2,8 \cdot 10^{-4}$
3,09	1,0
3,10	2,2
3,26	$3,4 \cdot 10^2$
3,51	$3,3 \cdot 10^5$
3,76	$8,5 \cdot 10^7$
4,01	$8,1 \cdot 10^9$
4,27	$3,6 \cdot 10^{11}$

Admitindo-se uma superfície com área de 1cm^2 e uma taxa mínima de formação de embriões de $2,8 \cdot 10^{-4}$ embriões/cm²s, percebe-se que haverá a nucleação de um único embrião após um período de 1h. No entanto, como o diâmetro de um embrião é relativamente pequeno, da ordem de 10^{-6} mm, é preciso que a taxa mínima de formação de embriões seja mais elevada para que uma camada de geada seja visível a olho nu, após um período de 1h.

Na tabela 4.5 percebe-se que uma variação de apenas $0,22^\circ\text{C}$ no grau de super-resfriamento, o que corresponde a menos da metade da incerteza de medição desse parâmetro, provoca uma alteração na taxa mínima de formação de embriões de $2,8 \cdot 10^{-4}$ para $2,2$ embriões/cm²s. Considerando que o ângulo de contato também afeta a taxa mínima de formação de embriões (ver tabela 4.6), e que a incerteza de medição desse parâmetro é de $\pm 5^\circ$, pode-se concluir que a incerteza associada com a estimativa da taxa mínima de formação de

embriões é da ordem de 10^8 embriões/cm²s. Em face dessa elevada incerteza optou-se pelo valor sugerido por Volmer e Flood (1934), de 2,2 embriões/cm²s, em cálculos realizados nesse trabalho.

Tabela 4.6 – Variação da taxa de formação de embriões em função do ângulo de contato ($\Delta T_{sup}=3,1^\circ\text{C}$).

Ângulo de contato	Taxa mínima de formação de embriões
[graus]	[embriões/cm ² s]
85	$3,3 \cdot 10^3$
90	$2,0 \cdot 10^0$
95	$1,2 \cdot 10^{-3}$

A tabela 4.7 mostra o grau de super-resfriamento necessário para o início do processo de nucleação sobre cada uma das amostras consideradas. Nessa mesma tabela mostra-se também a taxa mínima de formação de embriões, calculada através do modelo apresentado no Capítulo 2.

Na tabela 4.7 percebe-se que as superfícies IV e V, mesmo com maiores ângulos de contato, exigem um menor grau de super-resfriamento para início da nucleação. Isso se deve a maior rugosidade dessas superfícies que tende a facilitar o processo de nucleação. Percebe-se também que a superfície III, por apresentar um ângulo de contato superior à superfície I, exige um maior grau de super-resfriamento.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de nucleação.

Amostra	Ângulo de Contato	Rugosidade média (<i>Ra</i>)	Grau de super-resfriamento mínimo	Taxa mínima de formação de embriões
	[graus]	[μm]	[$^\circ\text{C}$]	[embriões/cm ² s]
I - Original	72,6	0,05	3,2	$9,6 \cdot 10^{11}$
II - Verniz	83,6	0,11	3,0	$8,4 \cdot 10^2$
III - Cêra	96,7	0,06	4,6	$2,5 \cdot 10^{11}$
IV - Lixa 100	118,6	3,37	3,0	$5,4 \cdot 10^{-19}$
V - Lixa 50	129,5	6,92	2,8	$8,6 \cdot 10^{-30}$

A tabela 4.8 mostra os resultados de um ensaio onde cada amostra foi submetida a um grau de super-resfriamento de 6°C . Percebe-se nitidamente que as superfícies que exigem um maior super-resfriamento para o início do processo de nucleação são aquelas que apresentam camadas de geada de menor espessura, após um período de 1,5h. As figuras 4.10 a 4.14 mostram fotografias das superfícies das amostras no início e após 1,5 h de teste.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de nucleação ($\Delta T_{sup}=6^{\circ}\text{C}$).

Amostra	Ângulo de Contato	Rugosidade média (Ra)	Grau de super-resfriamento	Espessura da geada após 1,5 h
	[graus]	[μm]	[$^{\circ}\text{C}$]	[mm]
I - Original	72,6	0,05	6,0	0,285
II - Verniz	83,6	0,11	6,0	0,300
III - Cêra	96,7	0,06	6,0	0,135
V - Lixa 100	118,6	3,37	6,0	0,330
IV - Lixa 50	129,5	6,92	6,0	0,385

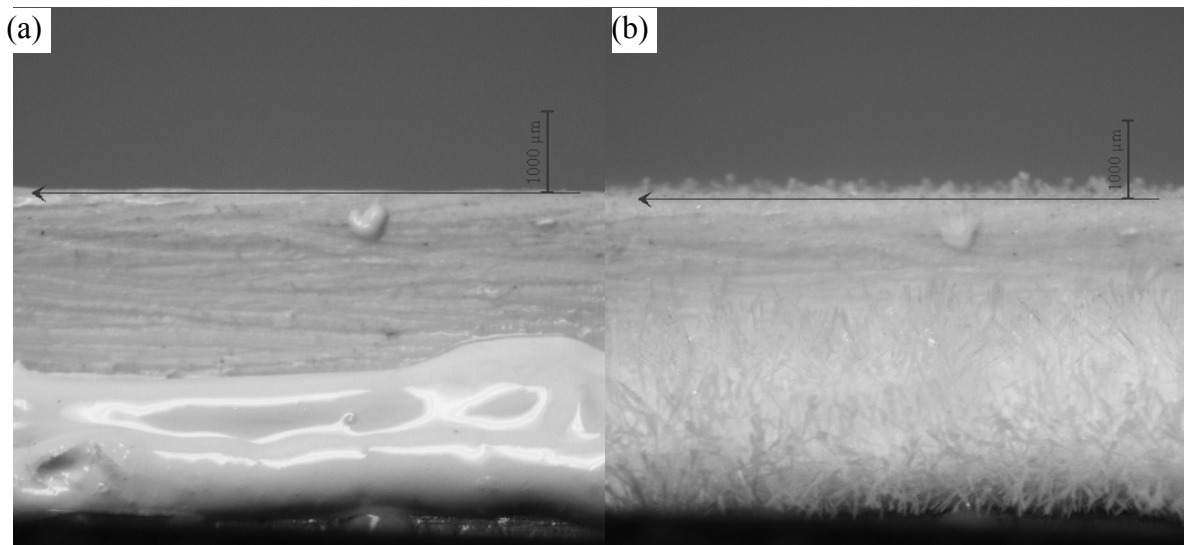


Figura 4.10 – Formação de geada sobre a amostra I; (a) no início do teste, (b) após 1,5 horas.

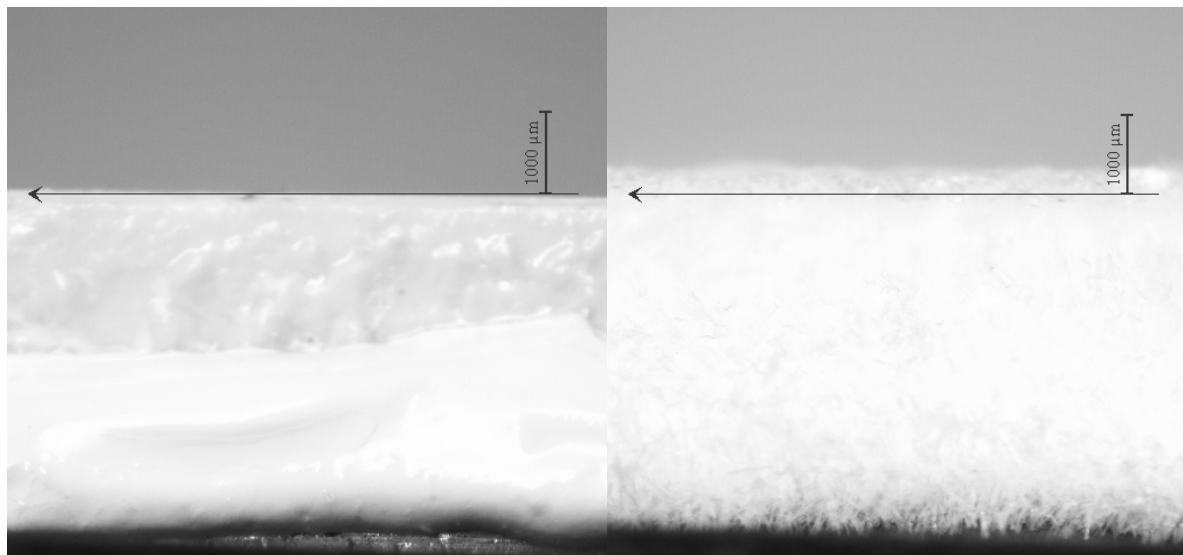


Figura 4.11 – Formação de geada sobre a amostra II; (a) no início do teste, (b) após 1,5 horas.

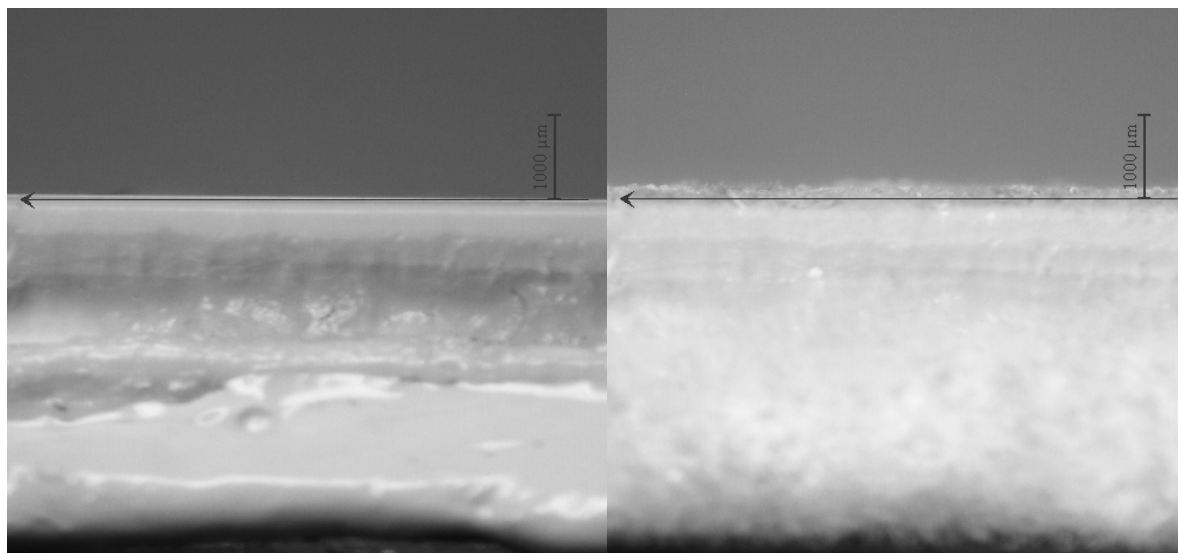


Figura 4.12 – Formação de geada sobre a amostra III; (a) no início do teste, (b) após 1,5 horas.

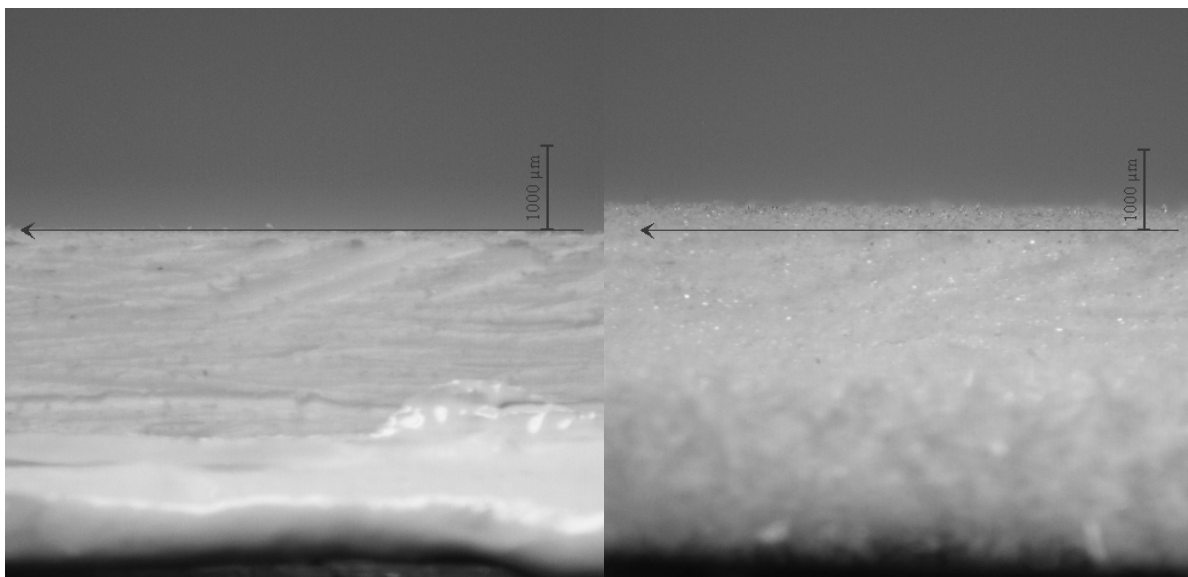


Figura 4.13 – Formação de geada sobre a amostra IV; (a) no início do teste, (b) após 1,5 horas.

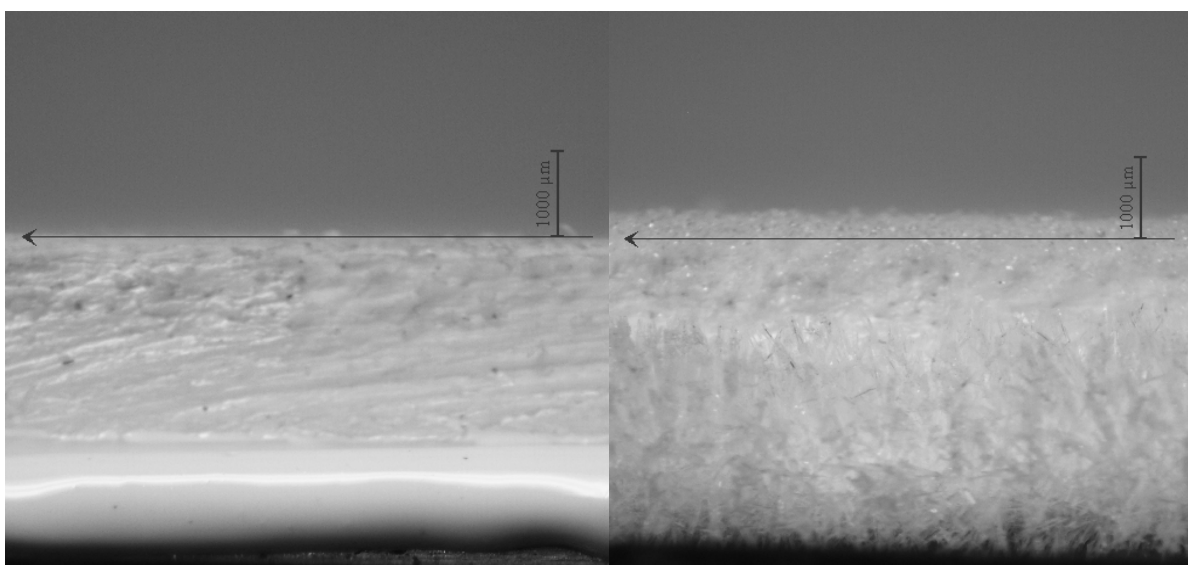


Figura 4.14 – Formação de geada sobre a amostra V; (a) no início do teste, (b) após 1,5 horas.

4.3.2. Ensaios para medição da densidade da geada

Para avaliar empiricamente a densidade da geada, foram realizados 12 experimentos usando diferentes valores de temperatura do ar, umidade relativa e temperatura do substrato. Tais valores estão indicados na tabela 4.9 e os resultados das medições aparecem na tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Condições de operação dos ensaios para medição da densidade da geada.

Teste Nº	Temperatura do ar	Umidade relativa	Temperatura da placa
	[°C]	[%]	[°C]
1	22,0	80	-15,0
2	22,0	80	-10,0
3	22,0	80	-5,0
4	22,0	50	-15,0
5	22,0	50	-10,0
6	22,0	50	-5,0
7	16,0	80	-15,0
8	16,0	80	-10,0
9	16,0	80	-5,0
10	16,0	50	-15,0
11	16,0	50	-10,0
12	16,0	50	-5,0

Pode-se observar que uma redução na temperatura da placa fria, mantendo as demais condições constantes, origina uma menor densidade e uma maior espessura de geada. Nos ensaios realizados com a placa na mesma temperatura e com a mesma umidade relativa, observou-se uma relação direta entre a temperatura do ar e a densidade da geada. Nos ensaios realizados com as mesmas temperaturas do ar e da placa fria, observou-se uma relação direta entre a densidade da geada e a umidade relativa.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios para medição da densidade da geada.

Teste N°	t	ΔT_{sup}	T_s	T_p	m	ρ	x_s	ε	k_g	D_{ef}
	[h]	[°C]	[°C]	[°C]	[g]	[kg/m³]	[mm]	-	[W/mK]	[cm²/s]
1	1,0	33,4	-4,9	-15,0	3,80	136,15	2,79	0,85	0,18	0,15
2	1,0	28,4	-3,0	-10,0	3,85	178,74	2,15	0,81	0,19	0,14
3	1,0	23,4	-0,6	-5,0	3,63	225,05	1,61	0,76	0,21	0,12
4	1,0	26,1	-7,1	-15,0	2,13	90,03	2,37	0,90	0,16	0,17
5	1,0	21,1	-4,8	-10,0	2,11	119,07	1,77	0,87	0,17	0,16
6	1,0	16,1	-2,7	-5,0	1,77	128,35	1,38	0,86	0,17	0,15
7	1,0	27,5	-6,3	-15,0	2,48	85,31	2,91	0,91	0,16	0,17
8	1,0	22,5	-5,2	-10,0	2,35	104,63	2,25	0,89	0,17	0,16
9	1,0	17,5	-2,4	-5,0	2,32	136,63	1,70	0,85	0,18	0,15
10	1,0	20,6	-7,6	-15,0	1,54	82,00	1,88	0,91	0,16	0,17
11	1,0	15,6	-5,3	-10,0	1,33	84,71	1,57	0,91	0,16	0,17
12	1,0	10,6	-3,4	-5,0	1,11	112,46	0,99	0,88	0,17	0,15
1	2,0	33,4	-3,7	-15,0	7,83	204,97	3,82	0,78	0,20	0,13
2	2,0	28,4	-1,3	-10,0	7,63	253,15	3,01	0,73	0,22	0,12
3	2,0	23,4	0,0	-5,0	7,12	318,00	2,24	0,66	0,25	0,10
4	2,0	26,1	-4,8	-15,0	4,22	131,26	3,22	0,86	0,18	0,15
5	2,0	21,1	-4,0	-10,0	3,98	156,94	2,54	0,83	0,19	0,14
6	2,0	16,1	-1,8	-5,0	3,54	174,64	2,03	0,81	0,19	0,14
7	2,0	27,5	-5,6	-15,0	4,87	126,96	3,84	0,86	0,17	0,15
8	2,0	22,5	-3,0	-10,0	4,58	153,28	2,99	0,83	0,18	0,14
9	2,0	17,5	-1,4	-5,0	4,37	191,58	2,28	0,79	0,20	0,13
10	2,0	20,6	-6,4	-15,0	2,86	107,80	2,65	0,88	0,17	0,16
11	2,0	15,6	-4,0	-10,0	2,57	116,51	2,21	0,87	0,17	0,15
12	2,0	10,6	-2,6	-5,0	2,08	137,11	1,52	0,85	0,18	0,15

Com base nos resultados experimentais, a seguinte correlação empírica é então proposta,

$$\rho_g = 207,3 \exp(0,2664 T_s - 0,06148 T_p) \quad (4.2)$$

onde as temperaturas são dadas em [°C] e ρ_g em [kg/m³].

A tabela 4.11 mostra os valores de densidade obtidos experimentalmente, juntamente com os obtidos com a equação 4.2 e da correlação proposta por Hayashi *et al.* (1977).

A figura 4.15 expressa tal comparação na forma gráfica. Pode-se perceber que os resultados fornecidos pela equação proposta no presente trabalho se mantêm dentro de uma faixa de erro de $\pm 15\%$, enquanto que a correlação de Hayashi fornece desvios substancialmente maiores, exceto nos ensaios onde a temperatura da placa era mais fria.

Tabela 4.11 – Comparação entre as correlações para cálculo da densidade da geada.

Teste N°	T_s	T_p	Densidade medida	Densidade calculada (presente trabalho)	Densidade calculada (Hayashi et al., 1977)
	[°C]	[°C]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
1	-4,9	-15,0	136,15	141,32	167,28
2	-3,0	-10,0	178,74	172,39	283,15
3	-0,6	-5,0	225,05	240,26	550,47
4	-7,1	-15,0	90,03	78,64	90,95
5	-4,8	-10,0	119,07	106,72	171,98
6	-2,7	-5,0	128,35	137,32	307,68
7	-6,3	-15,0	85,31	97,32	113,51
8	-5,2	-10,0	104,63	95,94	153,94
9	-2,4	-5,0	136,63	148,74	334,34
10	-7,6	-15,0	82,00	68,84	79,18
11	-5,3	-10,0	84,71	93,41	149,74
12	-3,4	-5,0	112,46	113,96	253,45
1	-3,7	-15,0	204,97	194,55	233,24
2	-1,3	-10,0	253,15	271,14	453,44
3	0,0	-5,0	318,00	281,90	650,00
4	-4,8	-15,0	131,26	145,13	171,98
5	-4,0	-10,0	156,94	132,07	214,64
6	-1,8	-5,0	174,64	174,52	394,80
7	-5,6	-15,0	126,96	117,28	137,80
8	-3,0	-10,0	153,28	172,39	283,15
9	-1,4	-5,0	191,58	194,15	441,06
10	-6,4	-15,0	107,80	94,77	110,41
11	-4,0	-10,0	116,51	132,07	214,64
12	-2,6	-5,0	137,11	141,02	316,33

Dessa forma pode-se concluir que a densidade da geada é uma função das temperaturas superficiais do substrato e da geada, e não unicamente uma função da temperatura superficial da geada, como proposto por Hayashi *et al.* (1977).

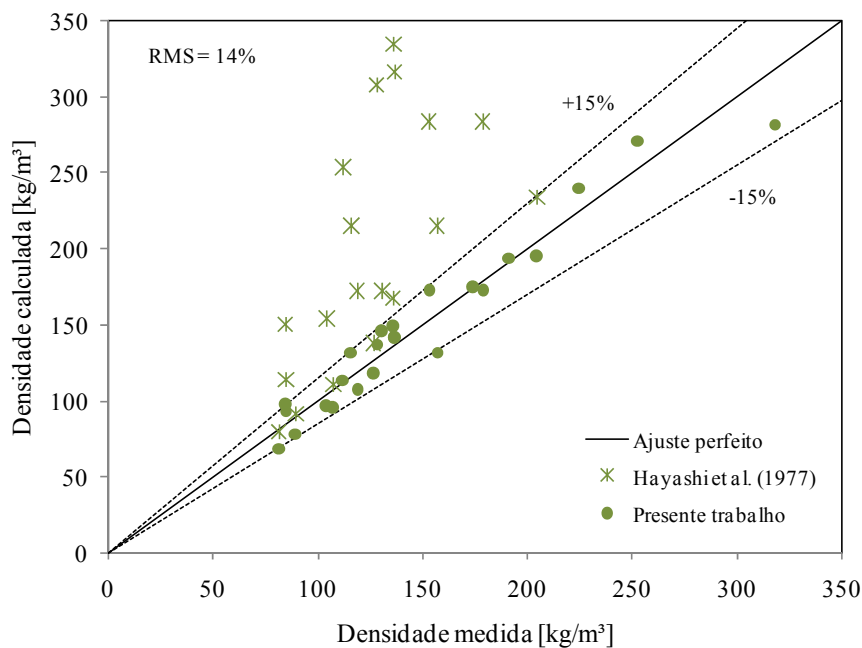


Figura 4.15 – Comparação entre os valores de densidade medidos e calculados através das correlações empíricas.

4.3.3. Ensaio para avaliação do crescimento e do adensamento da geada

Neste item são apresentados e discutidos os resultados de 16 experimentos realizados para investigar os efeitos do grau de super-resfriamento, da velocidade e da umidade do ar sobre o crescimento e o adensamento da geada. A velocidade foi variada entre 0,4 e 1,0 m/s, a umidade relativa entre 50 e 80%, a temperatura do ar entre 16,0 e 22,0°C e a temperatura da superfície de teste entre -4,0 e -16,0°C. As condições de operação de cada experimento estão relacionadas na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Condições de operação dos ensaios de crescimento e adensamento.

Teste N°	Temperatura do ar	Umidade relativa	Temperatura da superfície de teste	Velocidade do ar
	[°C]	[%]	[°C]	[m/s]
1	16,0	80	-4,0	0,7
2	16,0	80	-8,0	0,7
3	16,0	80	-12,0	0,7
4	16,0	80	-16,0	0,7
5	16,0	80	-4,0	1,0
6	16,0	80	-8,0	1,0
7	16,0	80	-12,0	1,0
8	16,0	80	-16,0	1,0
9	22,0	50	-4,0	0,7
10	22,0	50	-9,0	0,7
11	22,0	50	-4,0	1,0
12	22,0	50	-9,0	1,0
13	22,0	50	-9,0	0,4
14	22,0	50	-4,0	0,4
15	22,0	65	-9,0	0,7
16	22,0	80	-9,0	0,7

O efeito da temperatura da superfície foi explorado utilizando-se duas velocidades diferentes e mantendo-se a temperatura e a umidade do ar respectivamente em 16°C e 80%. As figuras 4.16 e 4.17 mostram que quanto mais fria a superfície, maior é a espessura da camada de geada. Dessas figuras percebe-se também que o efeito da velocidade do ar sobre a espessura é desprezível, dentro dos limites avaliados.

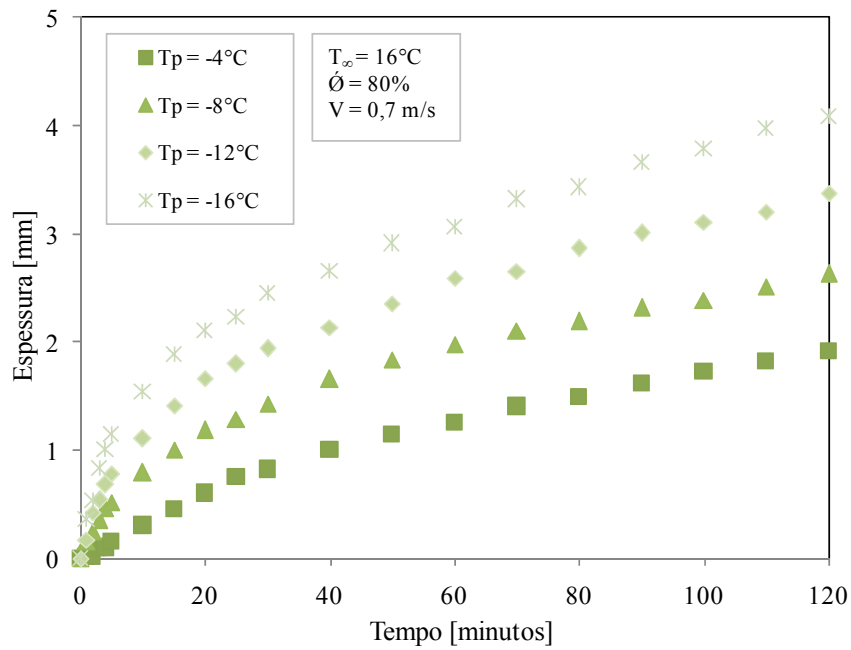


Figura 4.16 – Efeito da temperatura do substrato sobre a variação da espessura da geada (0,7 m/s).

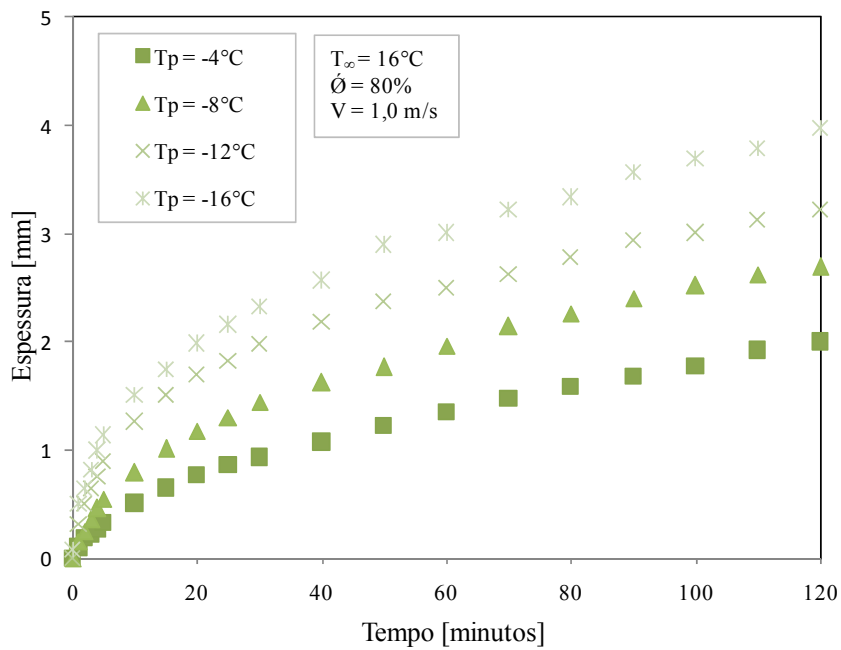


Figura 4.17 – Efeito da temperatura do substrato sobre a variação da espessura da geada (1,0 m/s).

A figura 4.18 mostra que a umidade do ar afeta apenas levemente a espessura da camada de geada formada ao longo do tempo. Isso se deve ao aumento da densidade da geada com o aumento da umidade relativa (ver tabelas 4.9 e 4.10).

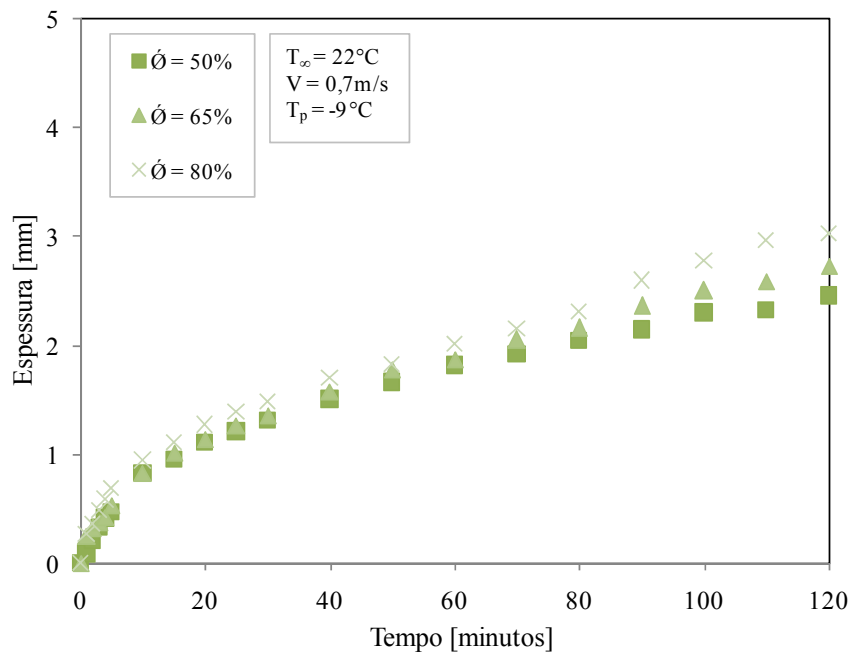


Figura 4.18 – Efeito da umidade do ar sobre a variação da espessura da geadas.

4.4. Síntese do capítulo

Um aparato experimental foi projetado, construído e utilizado para identificar o grau de super-resfriamento mínimo necessário para permitir o início do processo de nucleação sobre cinco amostras com tratamentos superficiais diferentes. Os efeitos do ângulo de contato, que tende a aumentar o limite de nucleação, e da rugosidade, que tende a diminuí-lo, foram comparados experimentalmente.

Em linhas gerais, observou-se que a espessura da camada de geadas é mais fortemente afetada pela temperatura da placa fria. Observou-se também que a densidade da geadas aumenta com a umidade relativa e com a temperatura do ar.

CAPÍTULO 5 - EXPERIMENTOS APLICADOS

Mostrou-se anteriormente que o processo de formação de geada depende do ângulo de contato, da rugosidade e do grau de super-resfriamento da superfície. Dessa forma, foram necessários experimentos para identificar as condições superficiais e operacionais, típicas das paredes internas de refrigeradores domésticos. Primeiramente, mediu-se o ângulo de contato de várias superfícies e a velocidade do ar em diversas posições no interior do compartimento refrigerado. Em seguida foram realizados dois testes com o refrigerador posicionado no interior de uma câmara climatizada mantida a 32°C e 70% de umidade relativa. No primeiro teste as portas do refrigerador foram mantidas fechadas, enquanto no segundo, o produto foi submetido a um regime cíclico de abertura de portas. Deve-se ressaltar que, quando o produto está com as portas fechadas, não há infiltração de umidade para o interior do gabinete, o que torna o ar interno extremamente seco. Com a abertura das portas a umidade penetra no gabinete, podendo ocorrer formação de geada.

5.1. Aparato experimental

Os experimentos foram realizados com um refrigerador doméstico de 432 litros de volume interno. Tal refrigerador, ilustrado na figura 5.1, possui 2 ventiladores para promover a movimentação do ar no interior dos compartimentos refrigerados (congelador e refrigerador), um compartimento de congelamento extra-rápido e uma interface eletrônica, que permite a seleção de diversas condições de funcionamento pré-programadas, que visam o resfriamento rápido ou a economia de energia.



Figura 5.1 – Refrigerador BRX48.

Ao todo, foram monitoradas nove superfícies, incluindo as superfícies do gabinete, porta, gavetas, prateleiras e divisórias do compartimento congelador. O grau de super-resfriamento de cada uma destas superfícies foi registrado a partir das indicações de termopares superficiais (OMEGA STICK-ON). Termopares do Tipo-T (OMEGA – UNSHEATHED FINE GAGE MICROTAMP) e sensores de umidade relativa (GE G-CAP 2) foram também instalados a 20 mm da superfície para avaliar a temperatura de orvalho (ver figura 5.2). A temperatura e a umidade relativa do ar foram registradas com uma incerteza de medição de respectivamente $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ e $\pm 2\%$.

A velocidade do ar nos mesmos pontos de medição da temperatura de orvalho foi medida na condição de vazão máxima do produto, através de um anemômetro de fio quente (INSTRUTHERM TAFR-180), com incerteza de medição de $\pm 0,1\text{m/s}$. O ângulo de contato das superfícies foi medido através do procedimento descrito na seção 4.2.2. Nesta etapa do trabalho não foram realizadas medições de rugosidade.

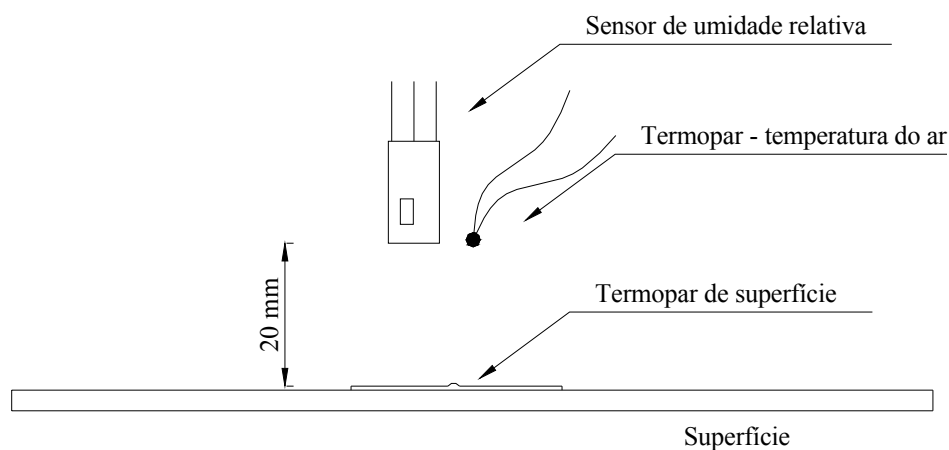


Figura 5.2 – Esquema de instalação dos sensores de medição.

O *plenum* é a região intermediária entre o evaporador e o compartimento congelador. Na interface entre o *plenum* e o congelador existe uma peça denominada capa do *plenum*, em cuja face frontal foram instalados transdutores para medir a temperatura superficial, além da temperatura e da umidade relativa do ar, como ilustra a figura 5.3. Como se pode observar, as regiões inferior e mediana estão mais expostas ao ar externo proveniente das aberturas de porta, diferentemente da região superior, que fica enclausurada por uma gaveta de resfriamento rápido. O ar frio, proveniente do evaporador, incide sobre a parte traseira da capa do *plenum*, antes de ser insuflado no compartimento interno. Por essa razão, a temperatura da superfície da capa do *plenum* é inferior a temperatura do congelador.

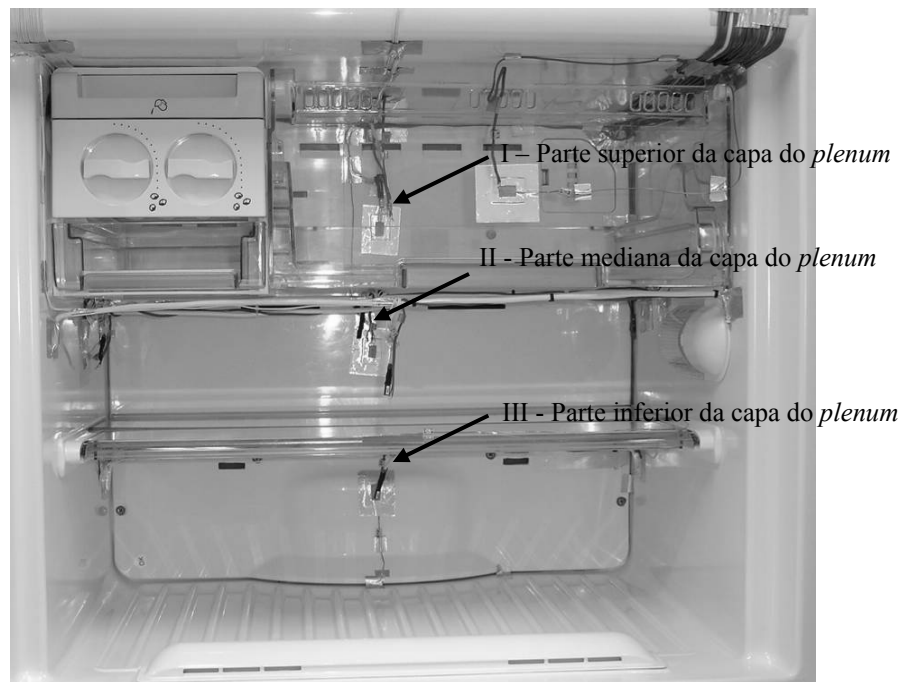


Figura 5.3 – Pontos de medição de temperatura e umidade relativa na região da capa do *plenum*.

Transdutores foram também instalados tanto na prateleira inferior como na capa interna da porta do congelador, como ilustra a figura 5.4. Instrumentos similares foram também instalados sobre a prateleira mediana, na parte frontal da capa da gaveta de resfriamento rápido, na parte inferior do reservatório de água e na parede lateral esquerda, como mostram respectivamente as figuras 5.5, 5.6 e 5.7.

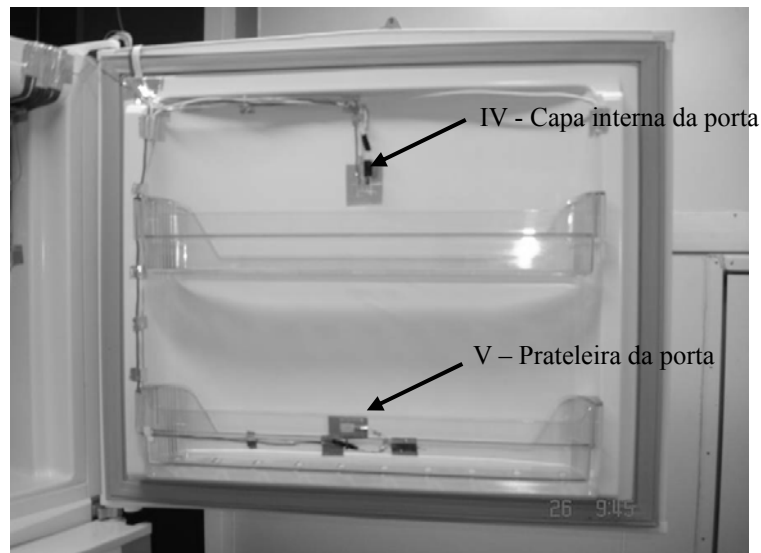


Figura 5.4 – Pontos de medição de temperatura e umidade relativa na região da porta.

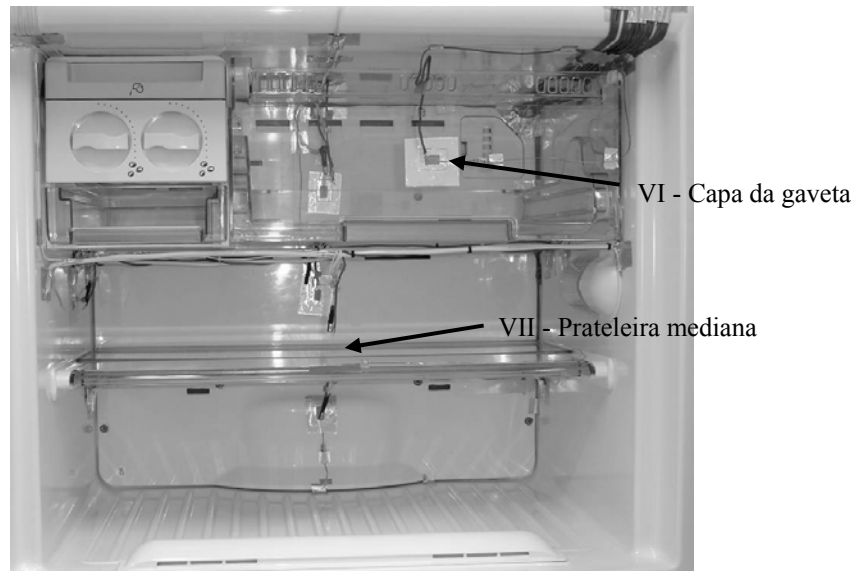


Figura 5.5 – Pontos de medição de temperatura e umidade relativa na região da prateleira mediana e na capa da gaveta de resfriamento rápido.

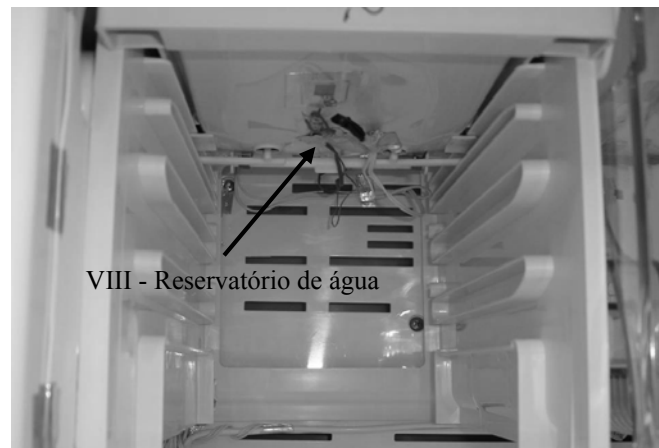


Figura 5.6 – Pontos de medição de temperatura e umidade relativa na região do reservatório de água.

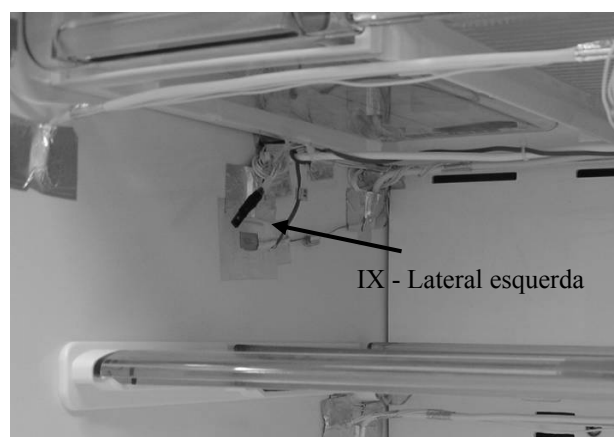


Figura 5.7 – Pontos de medição de temperatura e umidade relativa na região da lateral esquerda do congelador.

Para estudar o impacto da abertura das portas do produto sobre a formação de geada nas superfícies internas do congelador, foram realizados experimentos utilizando-se um

sistema automático para abertura e fechamento de portas (SELCO – APRS 020). Tal equipamento, ilustrado na figura 5.8, é composto por dois mecanismos controlados por uma interface eletrônica, que permite a regulagem do intervalo entre aberturas, tempo de porta aberta e número de ciclos, para cada um dos compartimentos.



Figura 5.8 – Sistema de abertura de porta

Cada mecanismo é composto por um dispositivo pneumático quebra-vácuo, para facilitar a abertura das portas, e por um braço articulado, para deslocar as portas até a posição pré-selecionada. Os braços são fixados nas portas e nas paredes laterais do refrigerador através de ventosas.

5.2. Resultados

5.2.1. Ângulo de contato

As nove superfícies monitoradas são feitas a partir do mesmo material e através de processos de fabricação similares. Isso faz com que os ângulos de contato dessas superfícies sejam bastante semelhantes, e dentro da faixa de erro de medição, como indicado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Medições do ângulo de contato das superfícies internas do refrigerador



5.2.2. Velocidade

A velocidade do ar no interior do refrigerador foi medida com o produto operando em regime de partida e com as portas fechadas, i.e., com a máxima vazão de ar. Em seguida, foram realizadas medições semelhantes com a porta do congelador aberta. Os resultados destas medições são mostrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Medições de velocidade no interior do refrigerador

Superfície	Velocidade [m/s]	
	Porta fechada	Porta aberta
I	0,4	0,4
II	0,2	0,2
III	0,3	0,3
IV	0,2	0,1
V	0,7	0,2
VI	0,1	0,1
VII	0,3	0,3
VIII	0,6	0,7
IX	0,2	0,2

Percebe-se que as superfícies enclausuradas, como a região superior da capa do *plenum* e a parte inferior do reservatório de água, apresentam a mesma velocidade com as portas abertas ou fechadas. Além disso, observou-se que em algumas superfícies a velocidade é bastante baixa, próxima da estagnação.

5.2.3. Grau de super-resfriamento – portas fechadas

Durante a operação do refrigerador, algumas superfícies do congelador atingem temperaturas bastante baixas. Além disso, tais superfícies recebem um fluxo de ar quente e úmido, logo após o degelo do evaporador. Por essa razão resolveu-se monitorar o grau de super-resfriamento dessas superfícies ao longo de 30 horas.

As figuras 5.9 a 5.11 ilustram o comportamento do grau de super-resfriamento respectivamente nas regiões superior, mediana e inferior da capa do *plenum*. Percebe-se que, nas regiões superior e inferior, o super-resfriamento atinge respectivamente 5°C e 7°C, logo após os ciclos de degelo. Nota-se também que super-resfriamento é mínimo na região mediana, em razão do menor fluxo de ar incidente sobre essa região. Além disso, verifica-se que quando o compressor é desligado a temperatura da superfície da região mediana aumenta e se aproxima da temperatura de orvalho, reduzindo assim o super-resfriamento. Com o compressor em funcionamento percebe-se que a temperatura da superfície se reduz mais

lentamente do que a temperatura do ar, o que torna o ar sempre mais frio que a superfície, eliminando assim qualquer possibilidade de condensação.

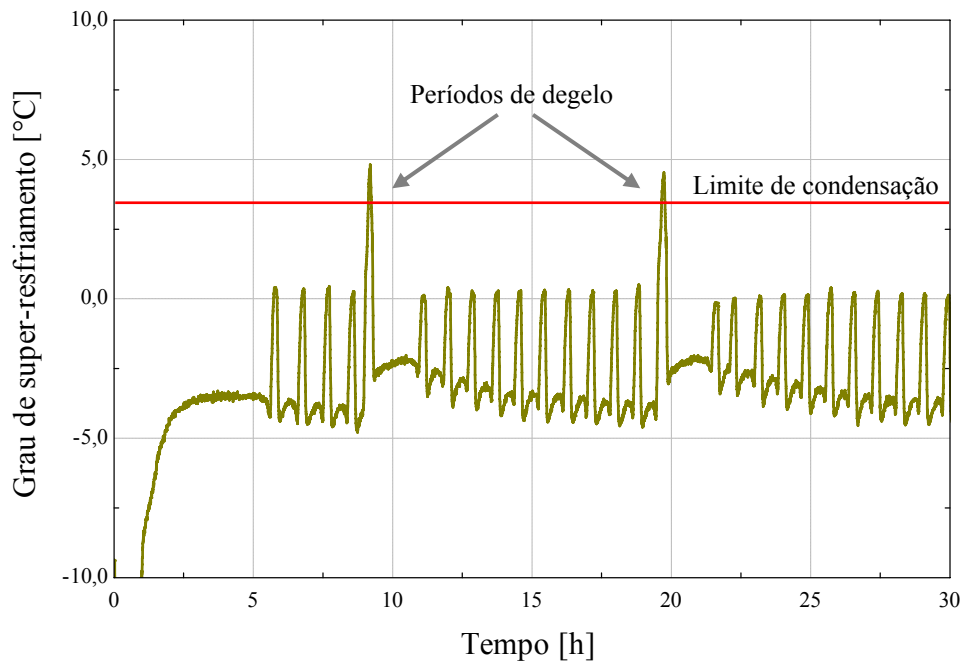


Figura 5.9 – Grau de super-resfriamento na região superior da capa do *plenum*.

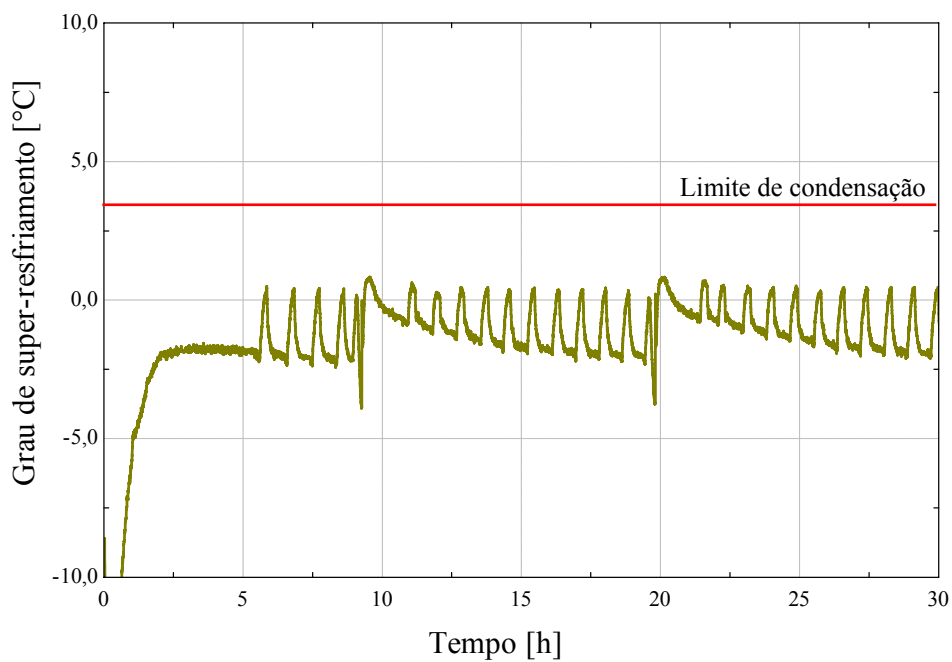


Figura 5.10 – Grau de super-resfriamento na região mediana da capa do *plenum*.

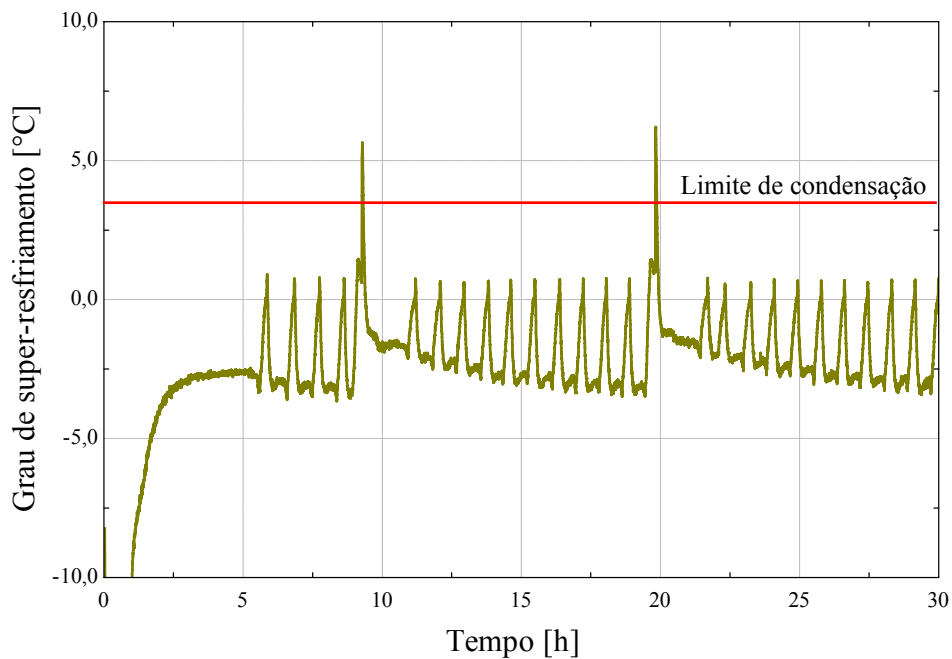


Figura 5.11 – Grau de super-resfriamento na região inferior da capa do *plenum*.

As figuras 5.12 a 5.14 ilustram respectivamente o comportamento da temperatura superficial nas regiões superior, mediana e inferior da capa do *plenum*. Nota-se que, em todas estas regiões, a temperatura da superfície se manteve sempre abaixo do ponto de congelamento da água. Isto favorece a formação de gelo nas regiões superior e inferior da capa do *plenum*, uma vez que o grau de super-resfriamento destas regiões superou o limite de condensação. Isso não ocorre na região mediana, onde o limite condensação não foi atingido.

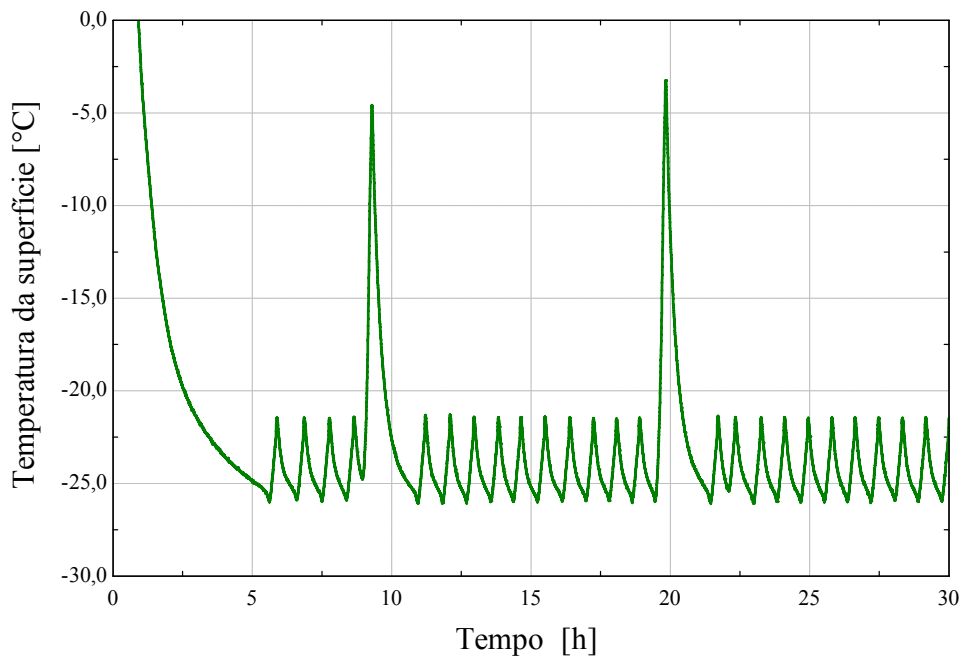


Figura 5.12 – Temperatura superficial na região superior da capa do *plenum*.

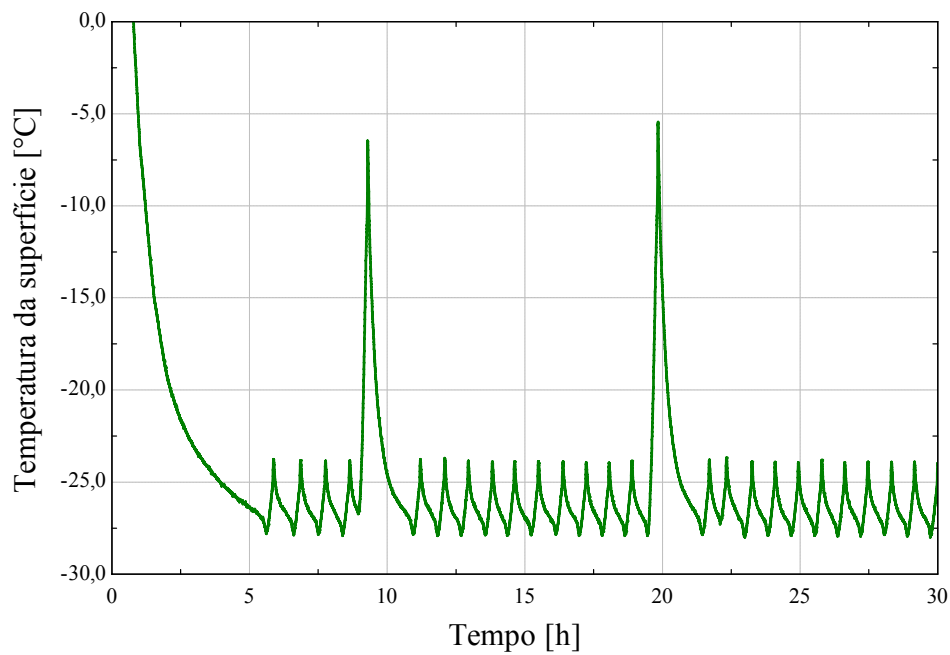


Figura 5.13 – Temperatura superficial na região mediana da capa do *plenum*.

As superfícies da porta do congelador são naturalmente mais quentes que as demais superfícies do compartimento, devido à maior circulação de ar nesta região e a proximidade das gaxetas. Mesmo assim foram observados elevados valores de super-resfriamento nessa região, em torno de 7°C , logo após o processo de degelo (ver figuras 5.15 e 5.16).

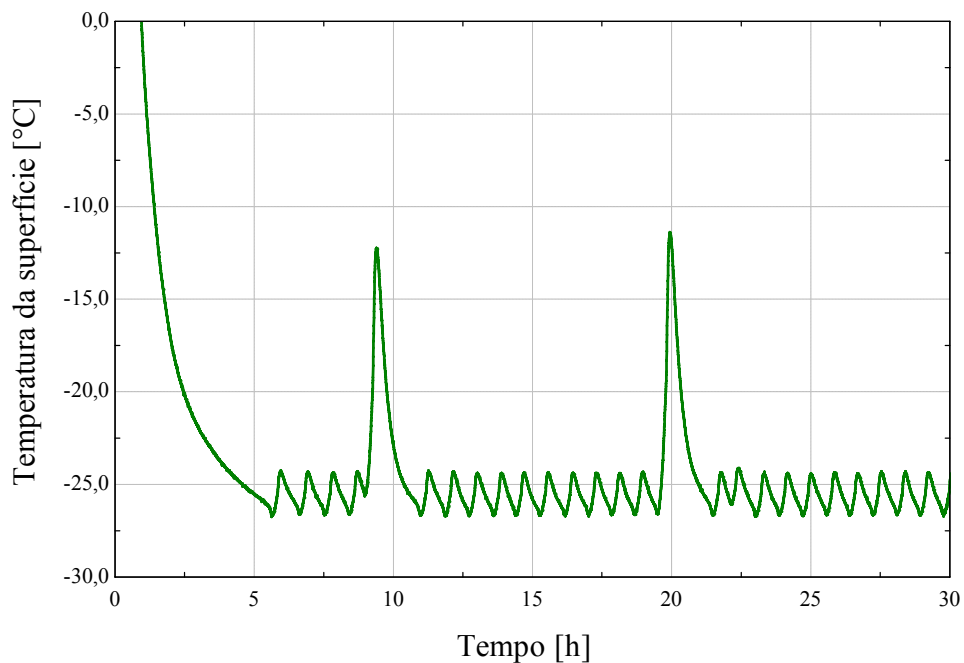


Figura 5.14 – Temperatura superficial na região inferior da capa do *plenum*.

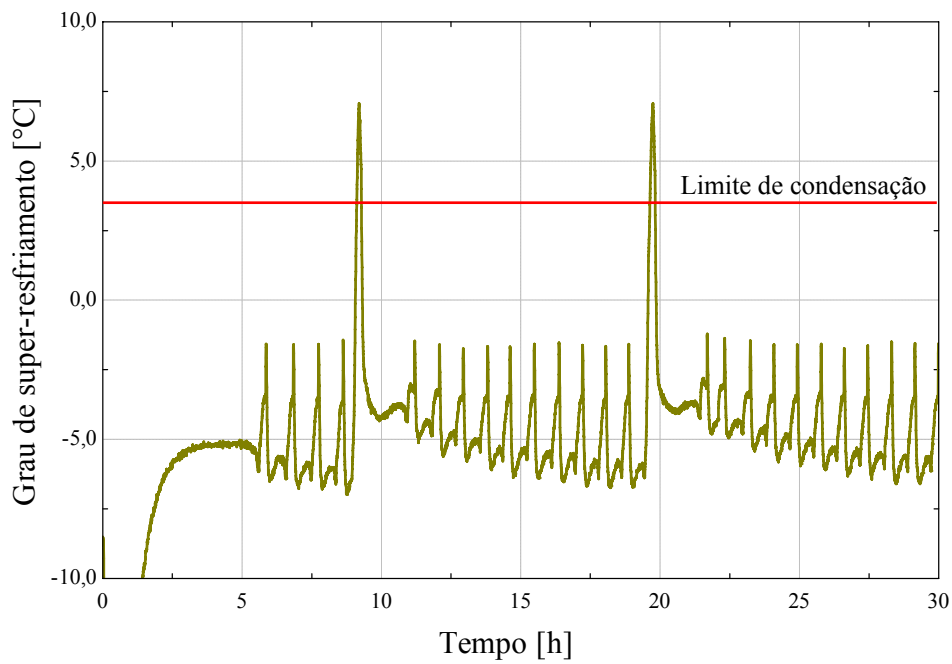


Figura 5.15 – Grau de super-resfriamento na região da superfície interna superior da porta.

De forma similar às superfícies da capa do *plenum*, as regiões da porta apresentaram sempre temperaturas negativas, como se pode observar nas figuras 5.17 e 5.18. Isso favorece a condensação e o congelamento do vapor d'água, quando o limite de condensação for ultrapassado.

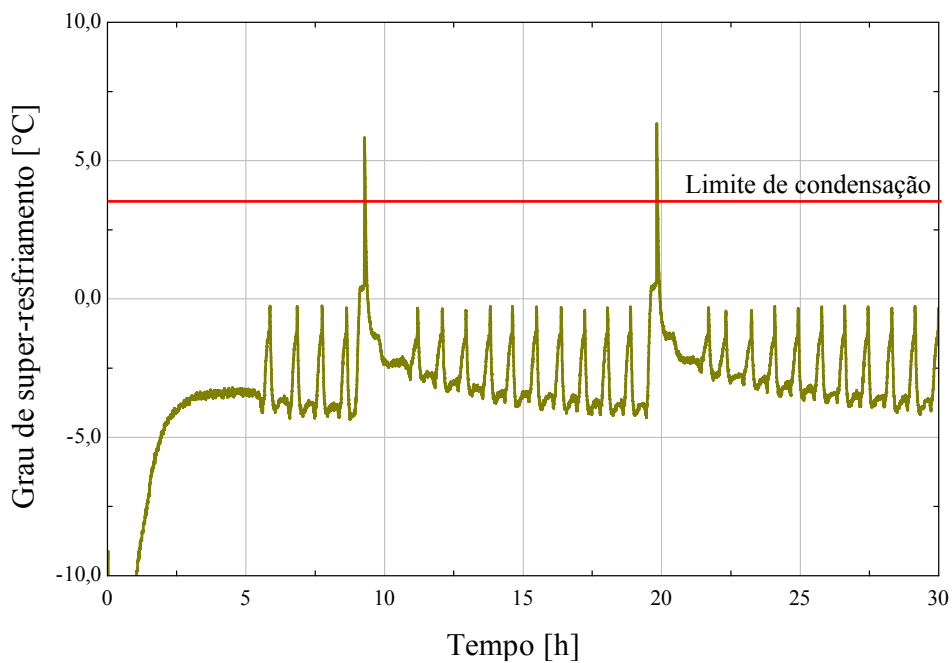


Figura 5.16 – Grau de super-resfriamento na região da prateleira inferior da porta.

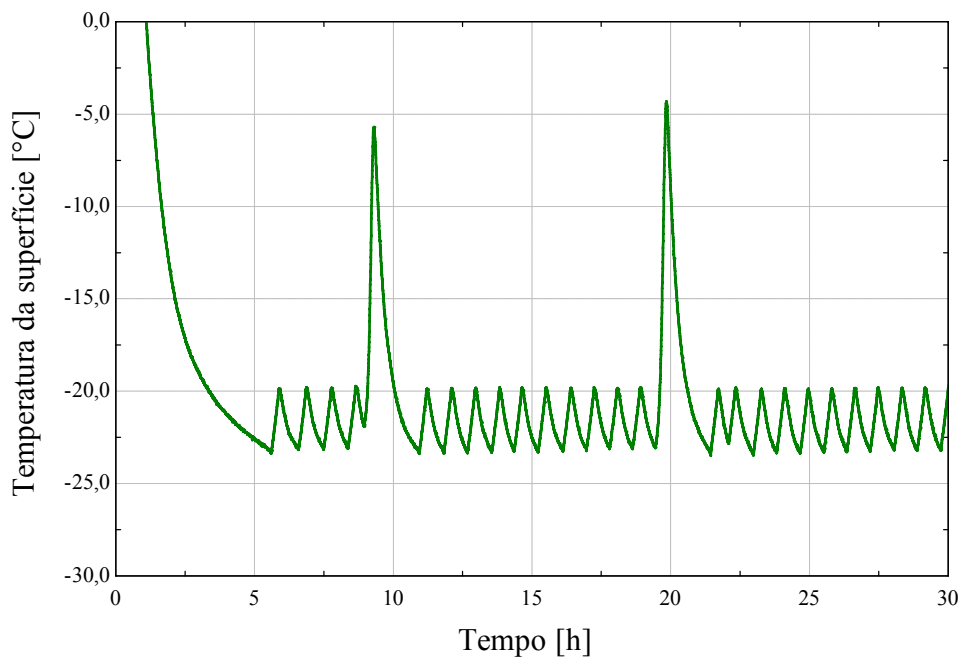


Figura 5.17 – Temperatura superficial na região da superfície interna superior da porta.

A figura 5.19 ilustra a variação do grau de super-resfriamento na região frontal da capa da gaveta de resfriamento rápido, onde se pode verificar que tal variável se manteve sempre próxima do limite de condensação, porém sem superá-lo. Em alguns momentos o grau de super-resfriamento atingiu valores da ordem de -17°C , resultado da incidência de ar quente proveniente do evaporador, após o período de degelo, sobre a parte traseira da superfície, (ver figura 5.20). Fica claro, portanto, que não existem condições propícias para a condensação nesta região.

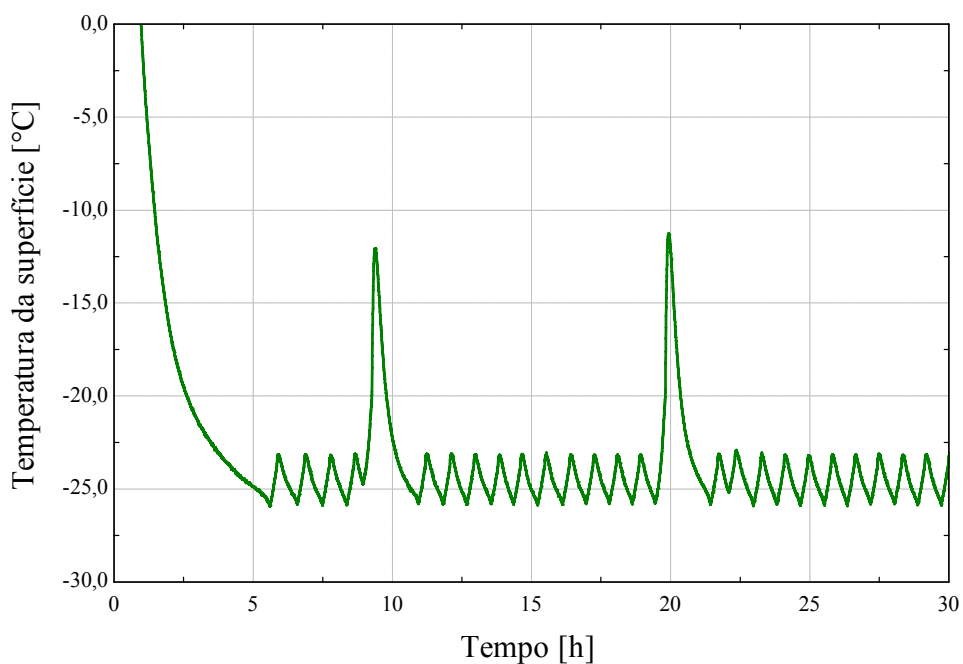


Figura 5.18 – Temperatura superficial na região da prateleira inferior da porta.

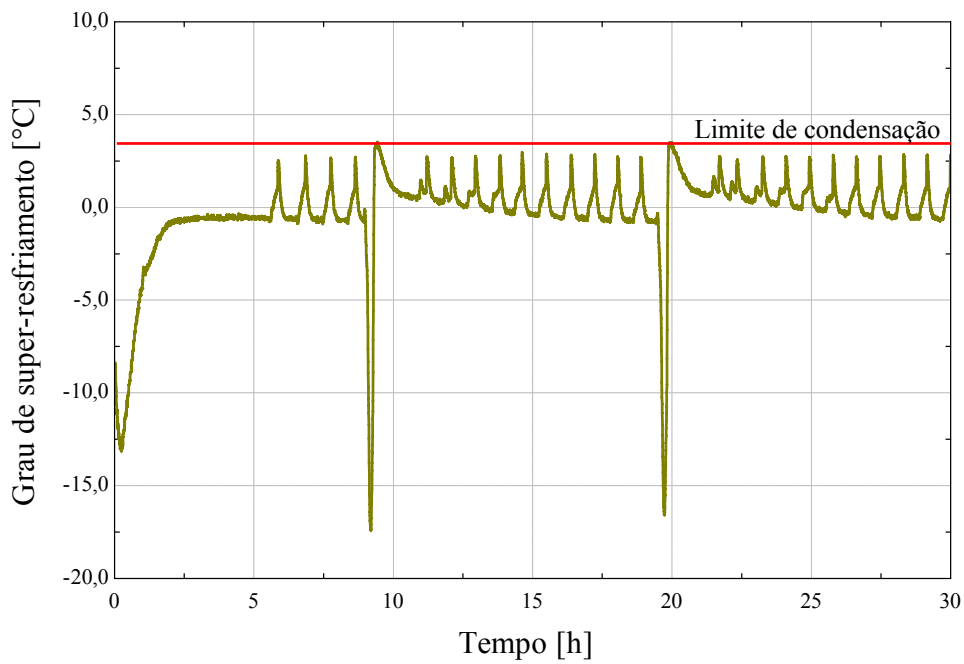


Figura 5.19 – Grau de super-resfriamento na região frontal da capa da gaveta de resfriamento rápido.

A figura 5.21 mostra que o grau de super-resfriamento sobre a prateleira mediana do congelador atinge valores da ordem de 10°C , valor esse que extrapola o limite de condensação. Como a temperatura dessa superfície se mantém sempre negativa (ver figura 5.22), pode-se concluir que existem condições suficientes para formação de uma camada de gelo.

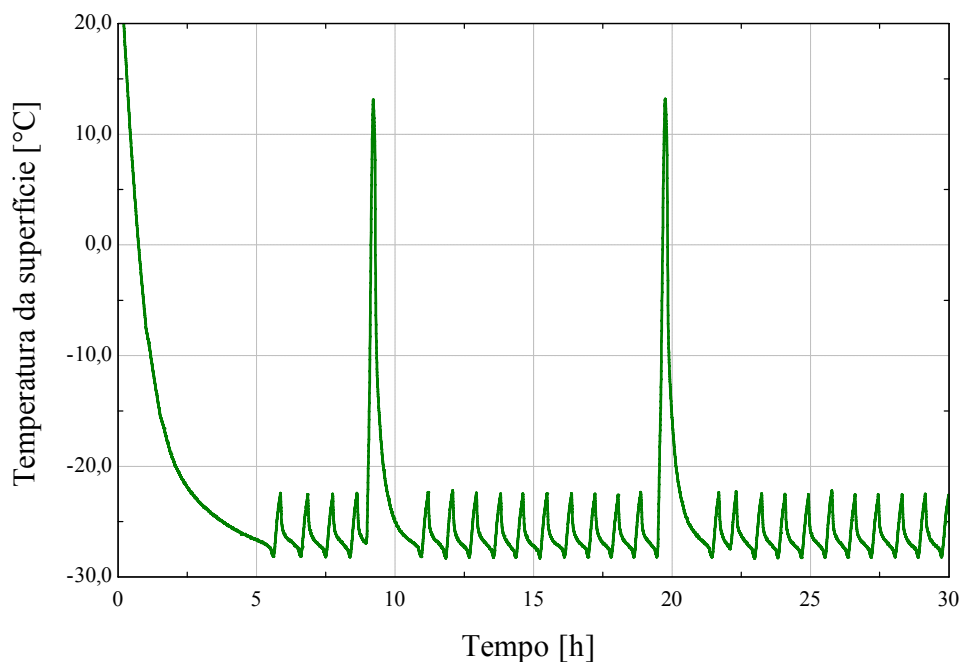


Figura 5.20 – Temperatura superficial na região frontal da capa da gaveta de resfriamento rápido.

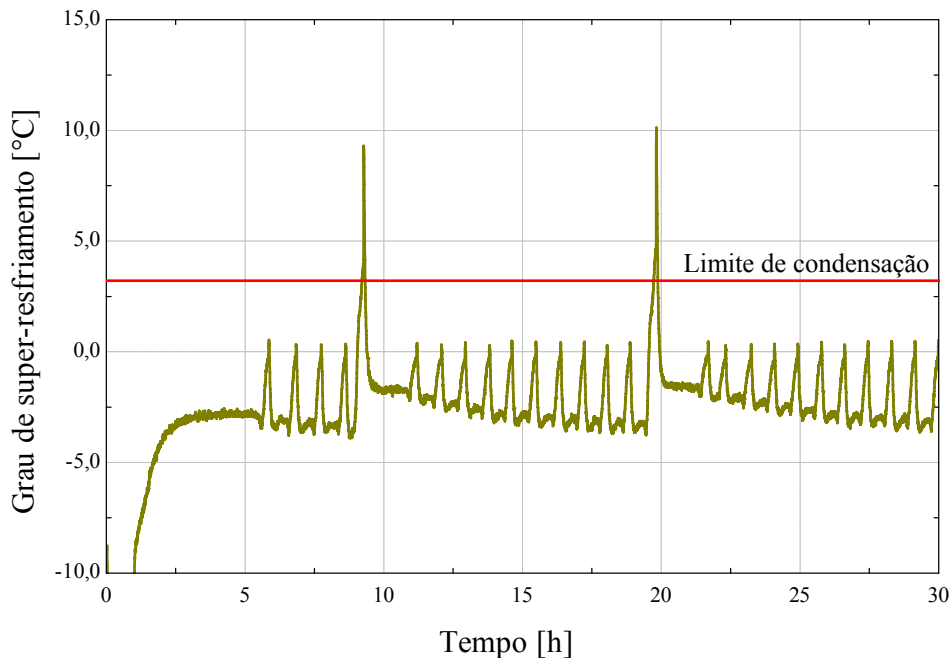


Figura 5.21 – Grau de super-resfriamento na região da prateleira mediana.

A figura 5.23 mostra que, a exemplo do que ocorre em outras regiões do congelador, o grau de super-resfriamento na superfície do reservatório de água supera o limite de condensação, logo após o processo de degelo. Isto deve-se ao fluxo de ar quente e úmido proveniente da região do evaporador e à baixa temperatura dessa superfície, sempre abaixo de 0°C (ver figura 5.24).

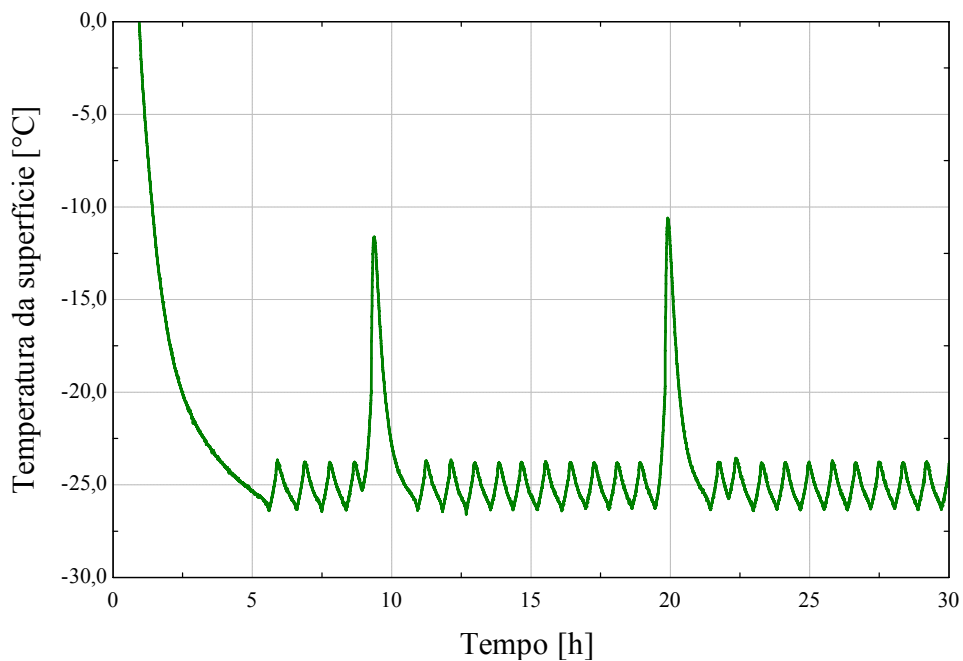


Figura 5.22 – Temperatura superficial na região da prateleira mediana.

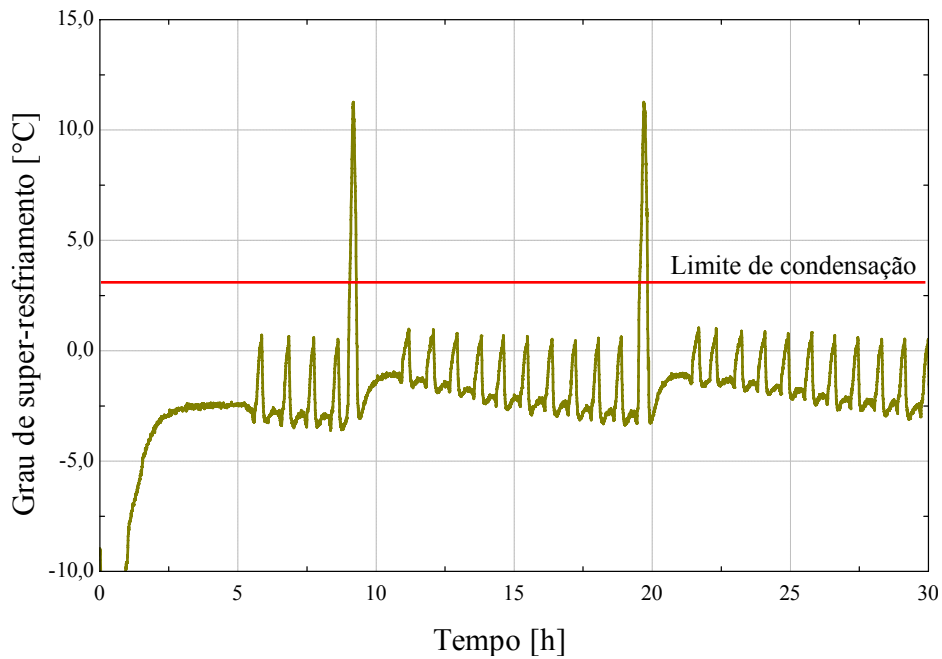


Figura 5.23 – Grau de super-resfriamento na região inferior do reservatório de água.

A figura 5.25 mostra que a temperatura de orvalho superou em até 8°C a temperatura da superfície lateral esquerda do congelador nos instantes finais do ciclo de degelo. Tal fato, associado à baixa temperatura dessa superfície (ver figura 5.26), favorece a formação de gelo nesta região.

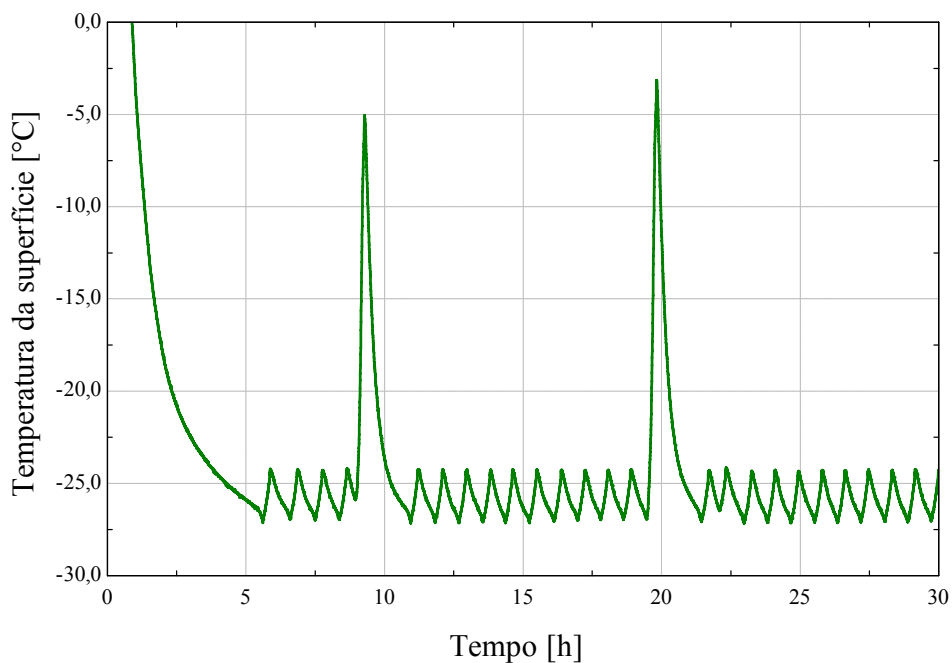


Figura 5.24 – Temperatura superficial na região inferior do reservatório de água.

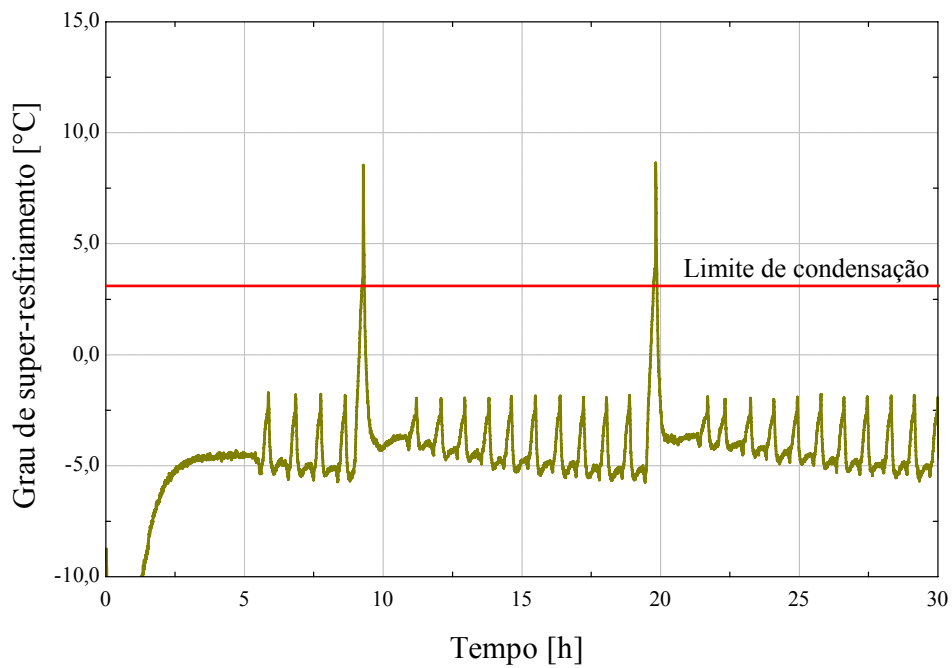


Figura 5.25 – Grau de super-resfriamento na região lateral esquerda do compartimento congelador.

Em resumo, percebe-se que existem condições propícias à formação de gelo na maioria das superfícies monitoradas. No entanto, tais condições foram sempre observadas após o processo de degelo, quando uma parcela considerável de vapor d'água penetrava no congelador. Fora dessas condições o ar se encontrava bastante seco devido à ausência de abertura de portas e à retenção de vapor d'água no evaporador.

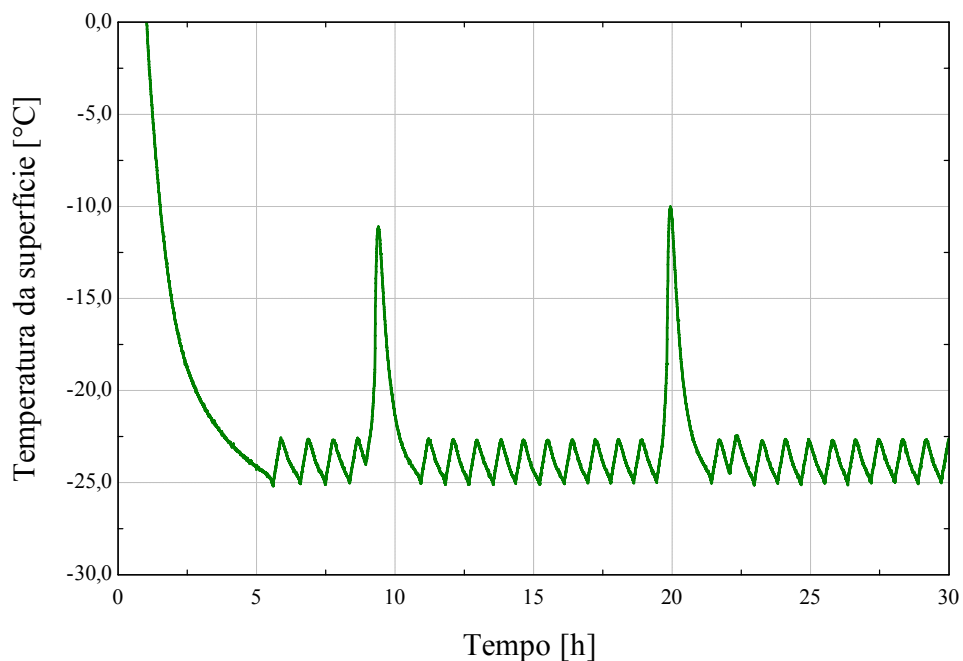


Figura 5.26 – Grau de super-resfriamento na região lateral esquerda do compartimento congelador.

5.2.4. Grau de super-resfriamento – abertura das portas

Os testes descritos a seguir foram realizados abrindo-se as portas do refrigerador. Dessa forma uma parcela de ar externo penetra no gabinete onde encontra superfícies com temperatura bem inferior ao ponto de orvalho, podendo ocorrer condensação ou até mesmo dessublimação.

Durante esses testes utilizou-se um equipamento para abrir automaticamente as portas do refrigerador, já descrito anteriormente. As seguintes condições foram estabelecidas: No congelador, mantém-se a porta aberta por 10 segundos, a cada 12 minutos, durante 1 hora. Isto se repete 4 vezes por dia, a cada 3 horas. No compartimento refrigerador, mantém-se a porta aberta por 30 segundos, a cada 3 minutos, durante 1 hora. Isto também se repete 4 vezes por dia, a cada 3 horas. Tais condições foram definidas com base nos procedimentos empregados pelo fabricante do produto (Fritzen, 2006).

Como se pode observar nas figuras 5.27 a 5.29, durante os períodos em que as portas do produto permaneceram abertas, o grau de super-resfriamento na região superior da capa do *plenum* não atingiu valores superiores a 7°C, uma vez que não há incidência de ar externo sobre ela. Já nas regiões mediana e inferior, onde existe um maior fluxo de ar proveniente do ambiente externo, o grau de super-resfriamento superou os 10°C, o que favorece a formação de gelo, uma vez que as temperaturas das superfícies se mantiveram sempre abaixo de 0°C (ver figuras 5.30 a 5.32).

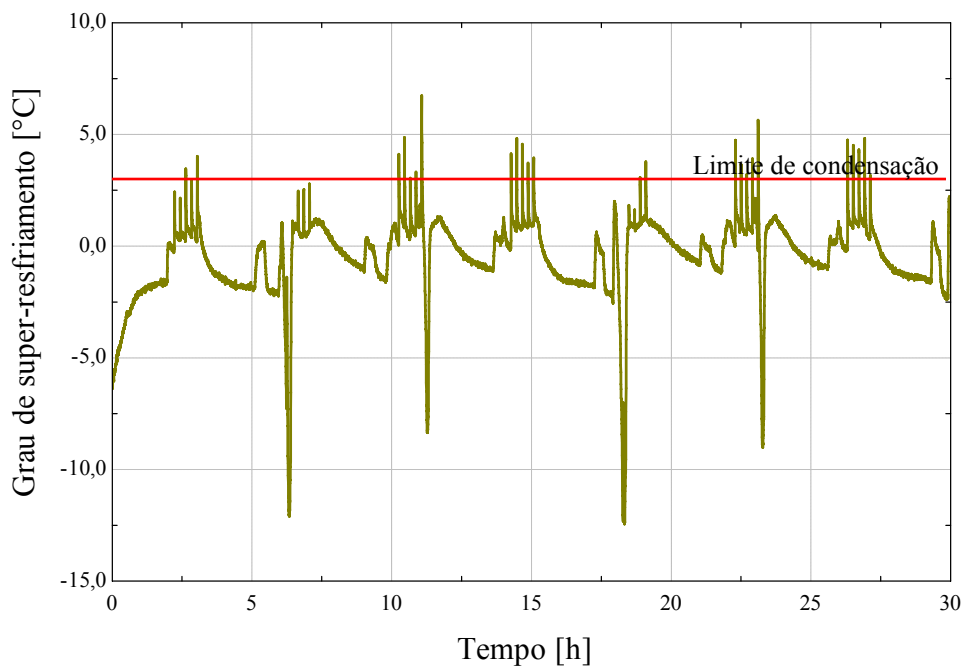


Figura 5.27 – Grau de super-resfriamento na região superior da capa do *plenum*.

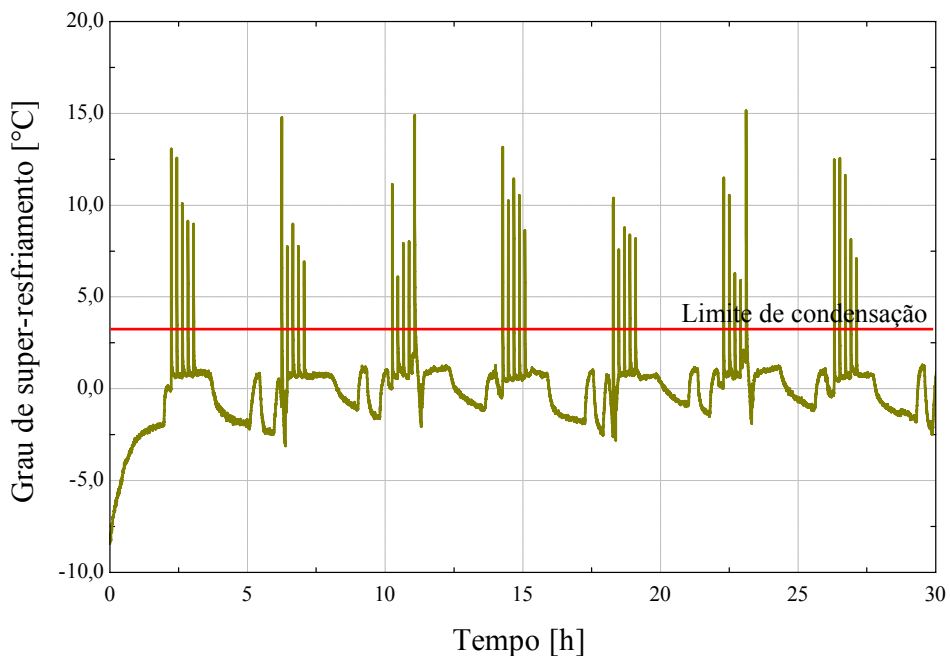


Figura 5.28 – Grau de super-resfriamento na região mediana da capa do *plenum*.

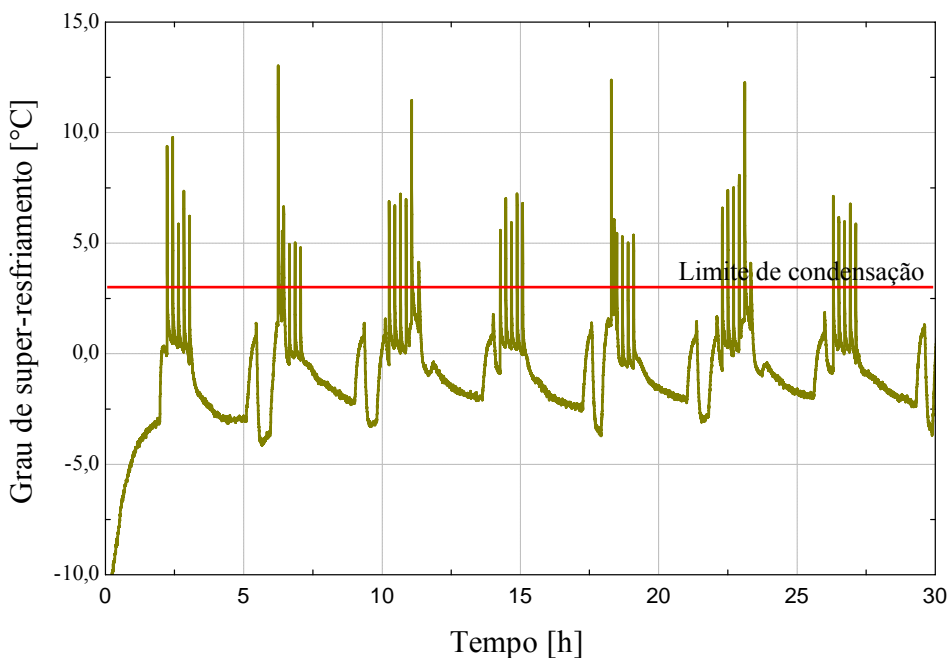
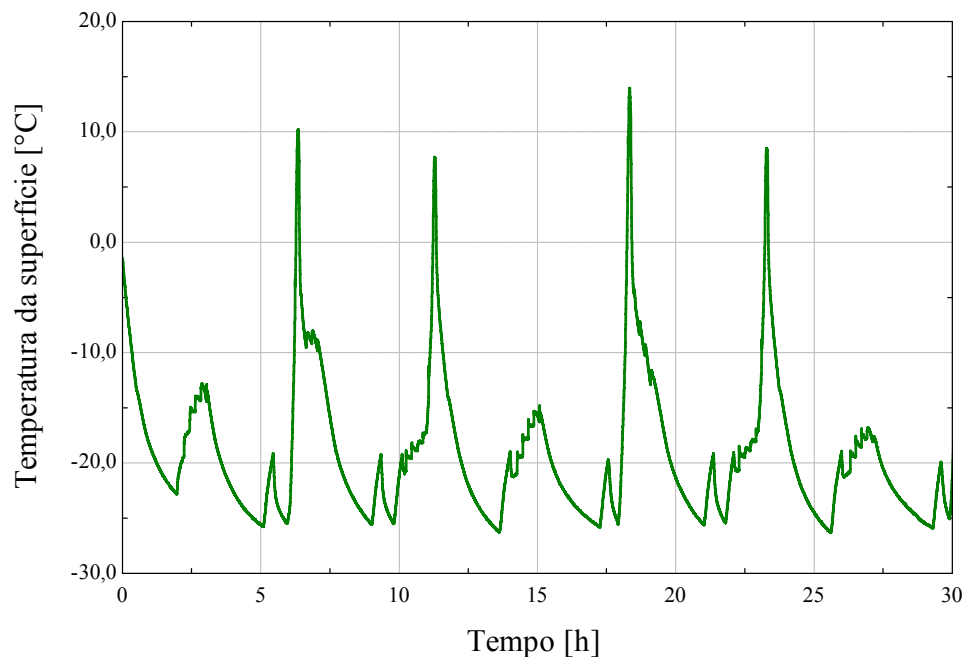
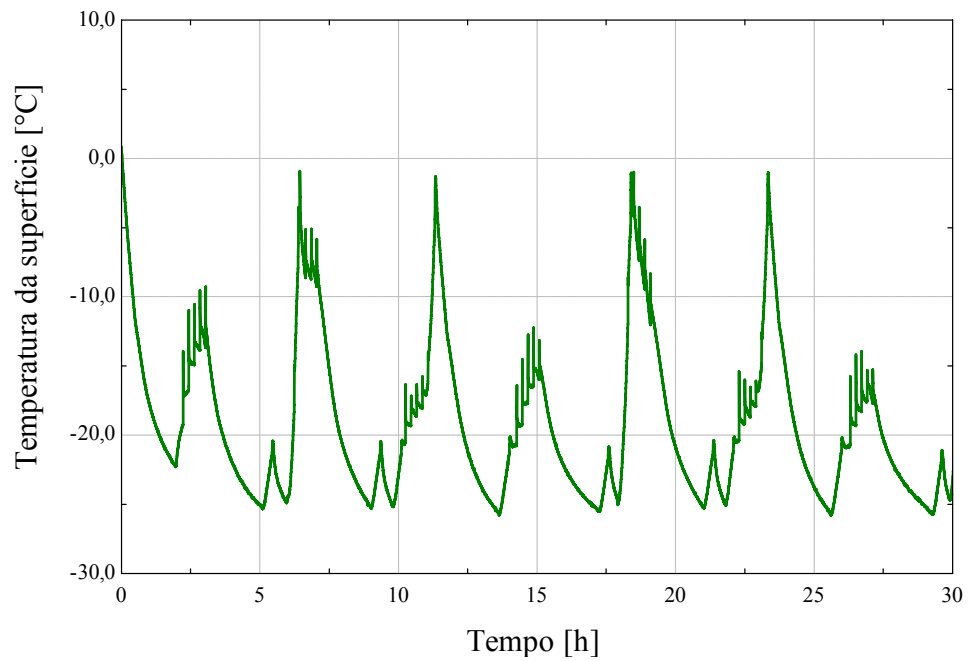


Figura 5.29 – Grau de super-resfriamento na região inferior da capa do *plenum*.

Percebe-se também que ocorreram 4 picos de temperatura nas superfícies, decorrentes dos ciclos de degelo, ao contrário do teste realizado com as portas fechadas, onde somente dois picos foram observados. Isto indica que a lógica de funcionamento do produto foi alterada em função das aberturas de porta.

Figura 5.30 – Temperatura da superfície na região superior da capa do *plenum*.Figura 5.31 – Temperatura da superfície na região mediana da capa do *plenum*.

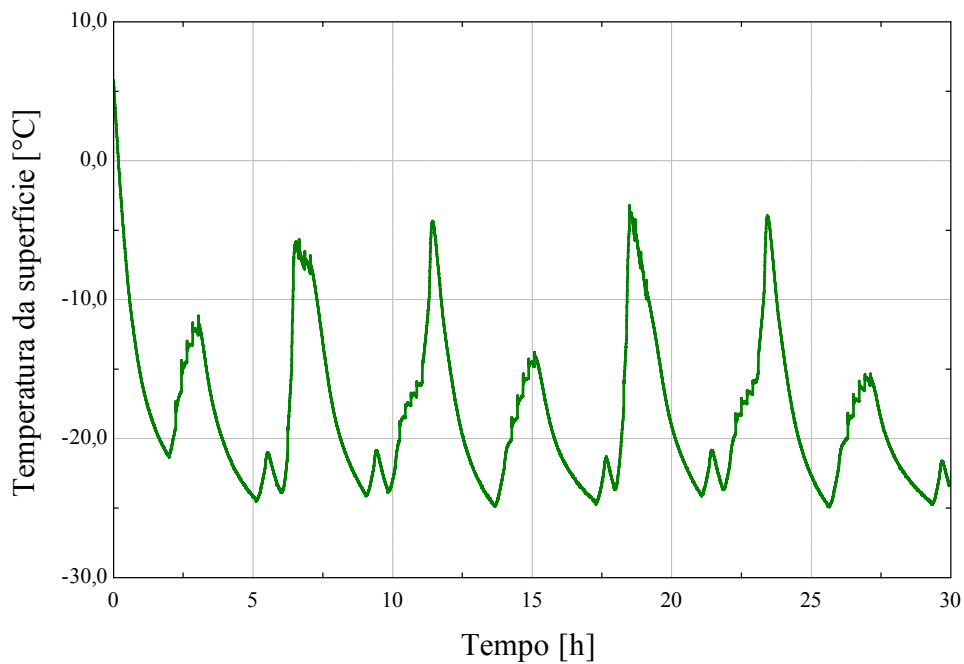


Figura 5.32 – Temperatura da superfície na região inferior da capa do plenum.

As figuras 5.33 e 5.34 ilustram a variação do grau de super-resfriamento nas regiões da porta, onde se pode observar que o limite de dessublimação é superado. Tal condição, associada ao fato de que as temperaturas das superfícies se mantiveram sempre abaixo de 0°C, fornece condições favoráveis à formação de geada. O comportamento da temperatura superficial na porta do compartimento congelador está ilustrado nas figuras 5.35 e 5.36.

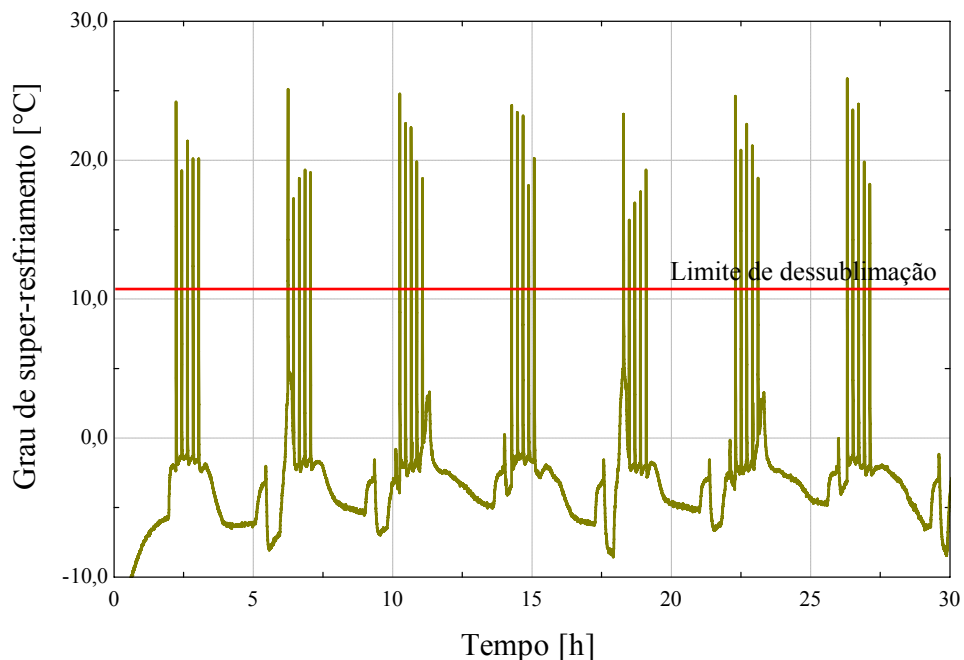


Figura 5.33 – Grau de super-resfriamento na região da superfície interna superior da porta.

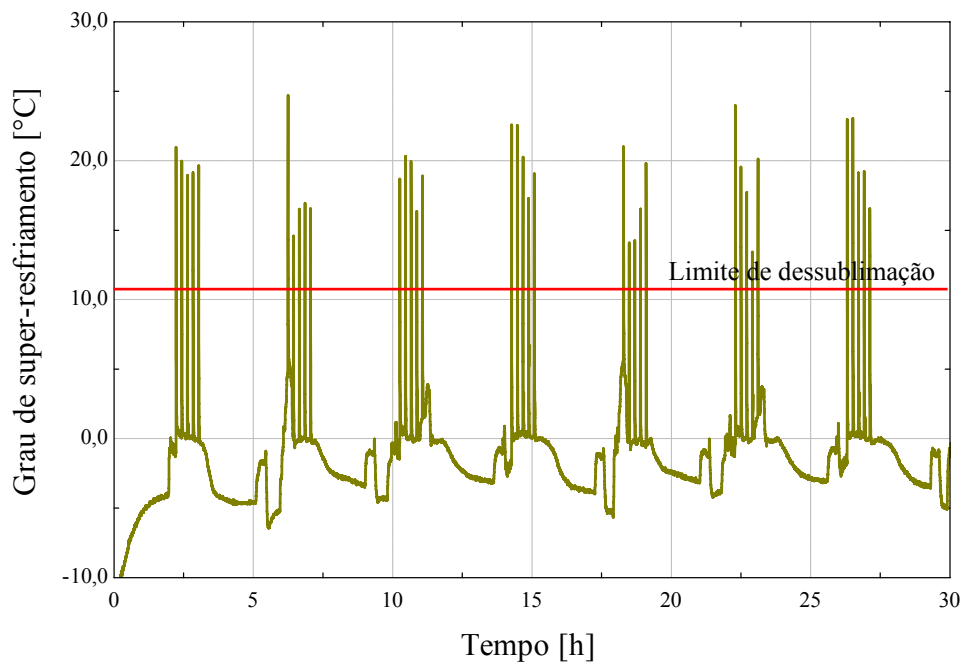


Figura 5.34 – Grau de super-resfriamento na região inferior da prateleira da porta.

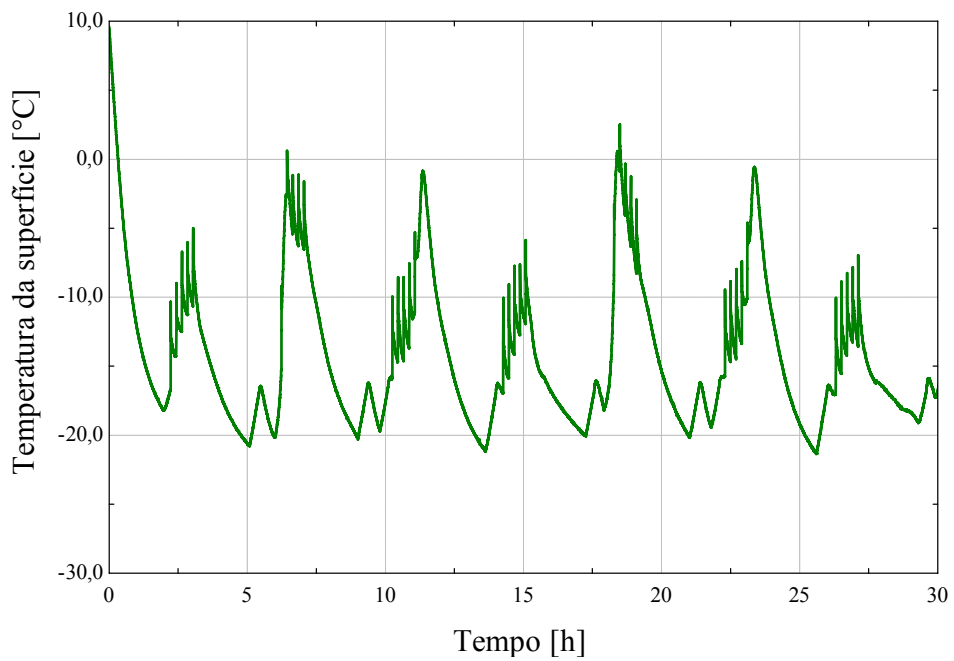


Figura 5.35 – Temperatura da superfície na região interna superior da porta.

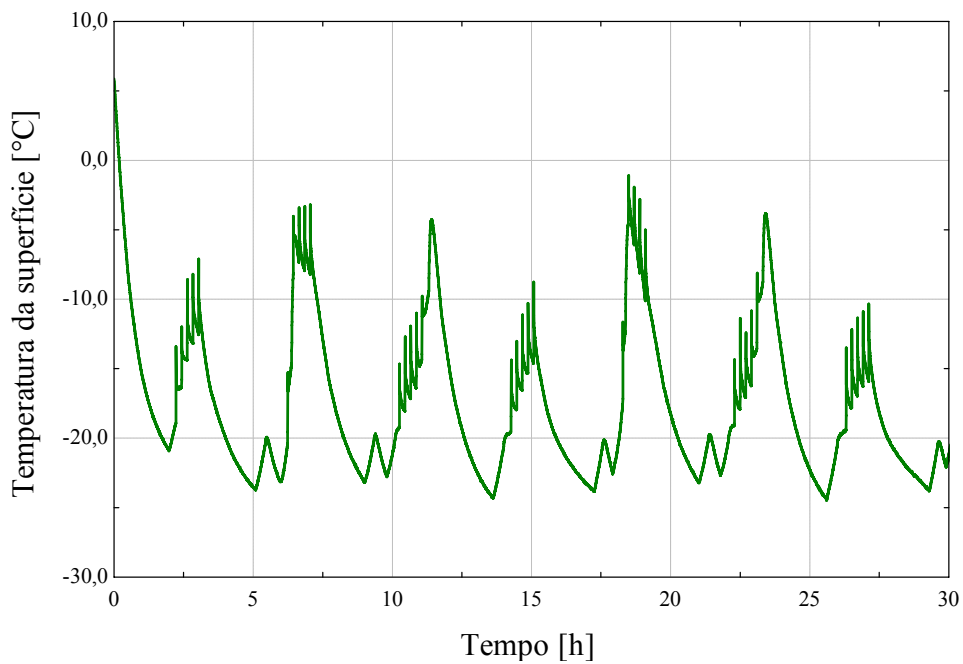


Figura 5.36 – Temperatura da superfície na região da prateleira inferior da porta.

Na prateleira mediana e na capa da gaveta de resfriamento rápido ocorrem situações semelhantes às verificadas nas superfícies da porta, ou seja, picos de 25°C no grau de super-resfriamento (ver figuras 5.37 e 5.38), que se devem à incidência de ar proveniente do ambiente externo. Tais condições, associadas à temperatura de superfície abaixo de 0°C , (ver figuras 5.39 e 5.40), propiciam a dessublimação do vapor d'água, ocasionando a formação de uma camada de geada.

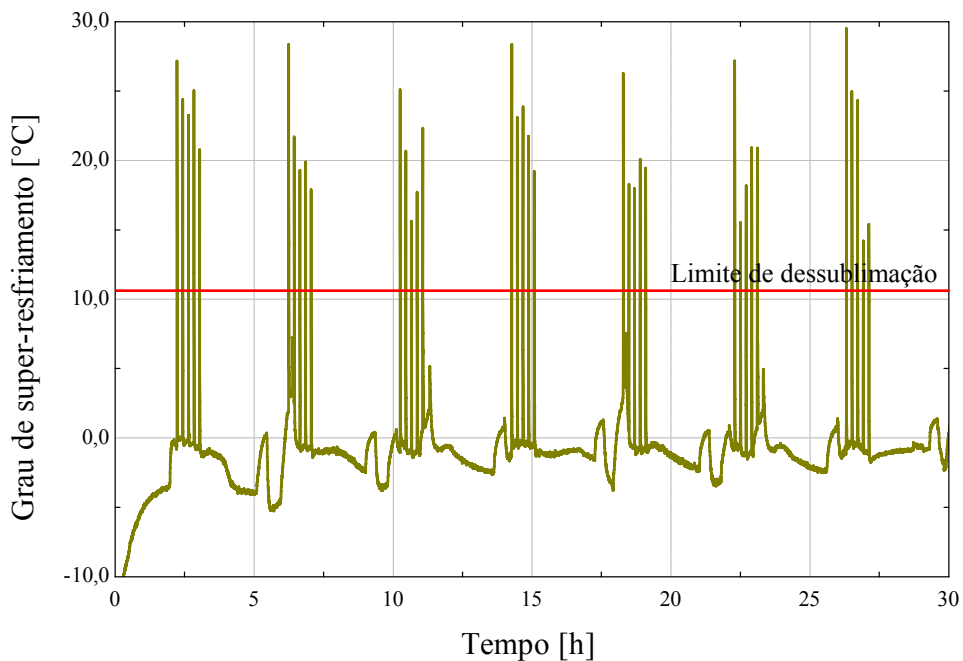


Figura 5.37 – Grau de super-resfriamento na região da prateleira mediana.

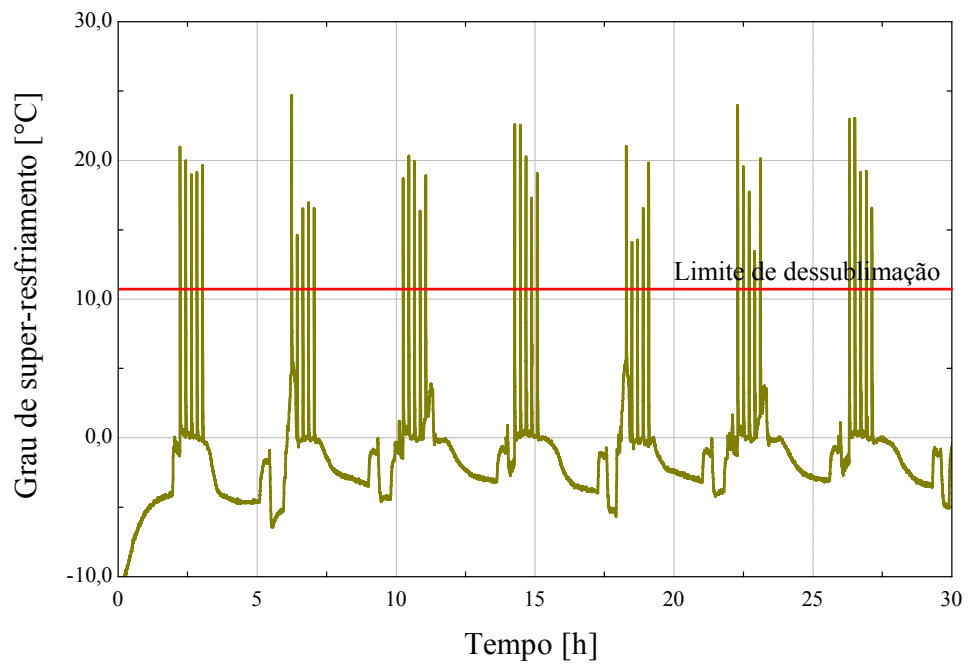


Figura 5.38 – Grau de super-resfriamento na região da capa da gaveta de resfriamento rápido.

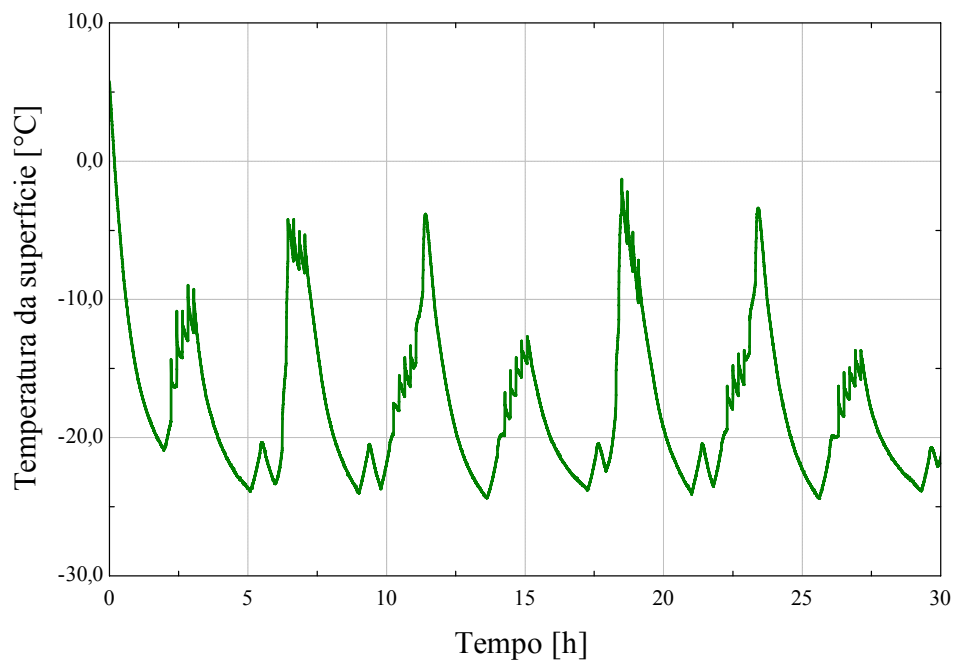


Figura 5.39 – Temperatura da superfície na região da prateleira mediana.

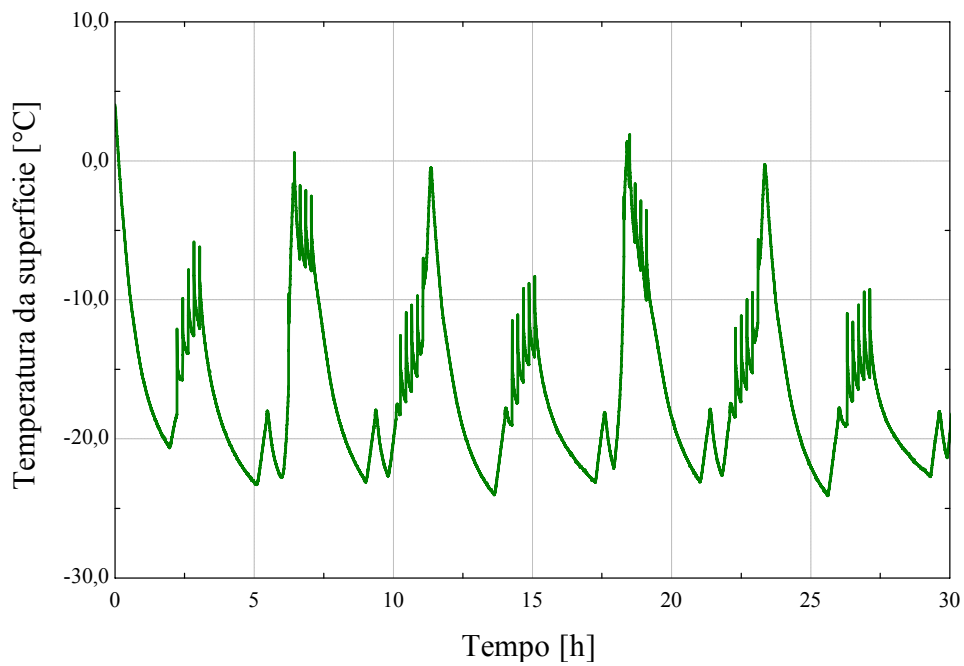


Figura 5.40 – Temperatura da superfície na região da capa da gaveta de resfriamento rápido.

A região inferior do reservatório de água, por estar enclausurada, é de difícil acesso para o ar que entra no refrigerador durante a abertura de portas. Isso explica o comportamento do grau de super-resfriamento nesta região (ver figura 5.41), que se assemelha muito ao observado durante o ensaio com as portas fechadas. Em alguns momentos, a temperatura dessa superfície se aproximou de 0°C , porém sempre se manteve abaixo deste valor, como se pode verificar na figura 5.42.

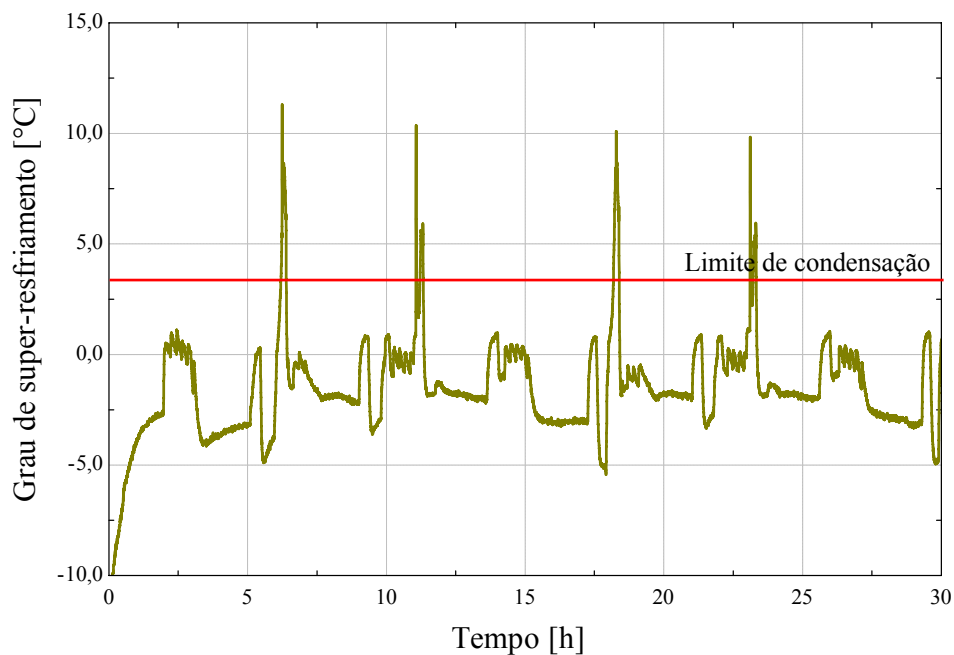


Figura 5.41 – Grau de super-resfriamento na região inferior do reservatório de água.

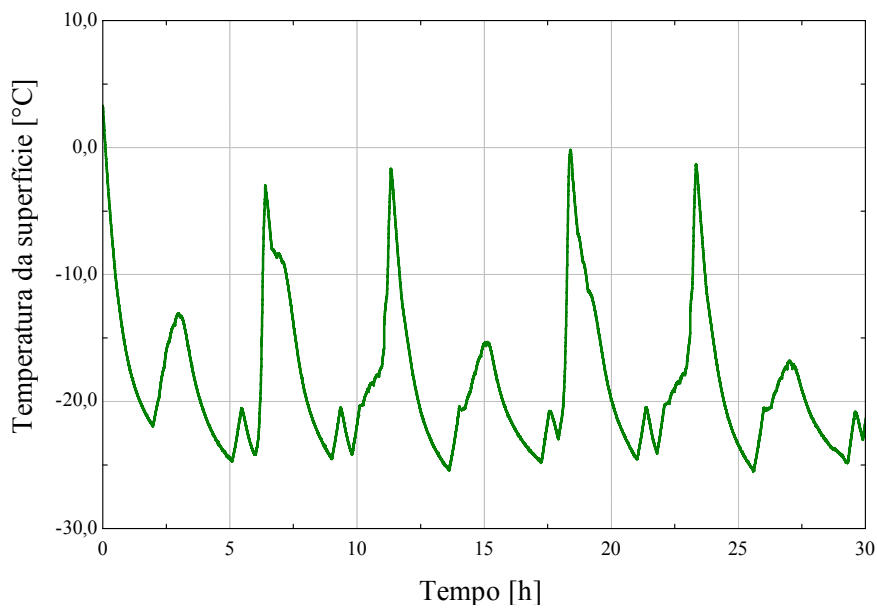


Figura 5.42 – Temperatura da superfície na região inferior do reservatório de água.

A figura 5.43 mostra que o grau de super-resfriamento na região lateral do compartimento congelador variou consideravelmente durante o ensaio. Durante o primeiro ciclo de aberturas de portas, não se observou qualquer variação desse parâmetro. No segundo ciclo, observou-se um pico de aproximadamente 15°C. Nos ciclos seguintes, observou-se valores diferentes dos observados nos dois primeiros. Isto deve-se provavelmente à combinação dos períodos de abertura de porta com os ciclos de degelo. A temperatura da superfície na lateral do congelador se manteve sempre abaixo de 0°C (ver figura 5.44), o que propicia a formação de gelo.

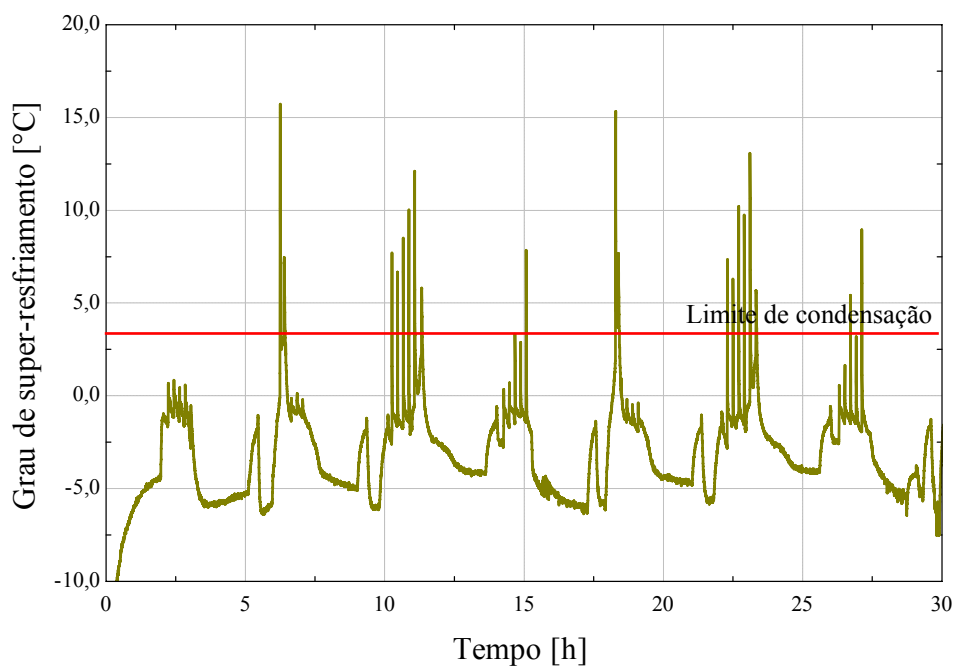


Figura 5.43 – Grau de super-resfriamento na região lateral esquerda do compartimento congelador.

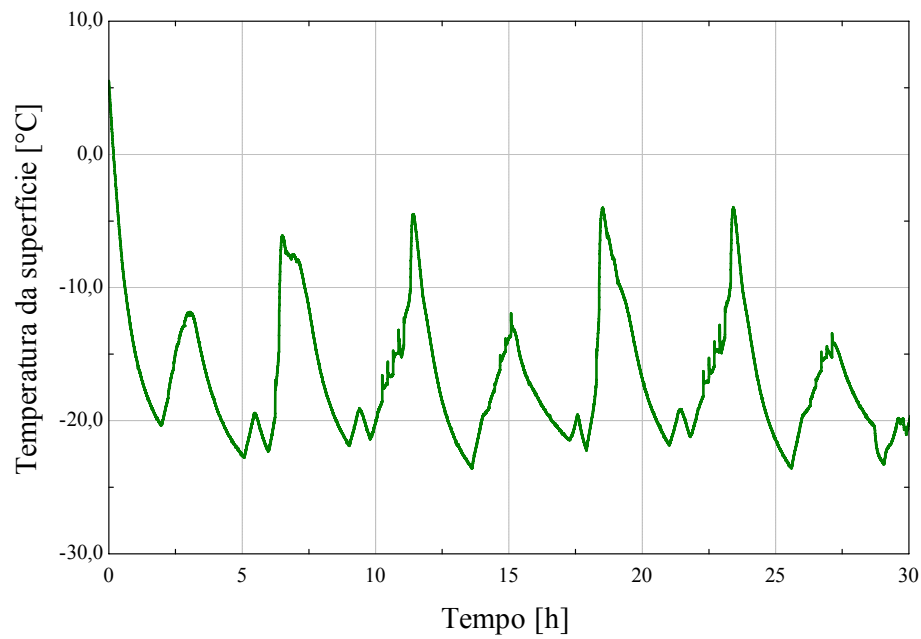


Figura 5.44 – Temperatura da superfície na região lateral esquerda do compartimento congelador.

Em resumo, a abertura das portas do refrigerador durante o seu funcionamento proporciona condições favoráveis à formação de gelo e geada sobre a maioria das superfícies analisadas. Apesar de críticas, tais condições, entretanto, são mantidas durante curtos períodos de tempo. No próximo capítulo a metodologia de análise será explorada em maiores detalhes.

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS

O presente trabalho envolveu investigações teóricas e experimentais dos processos de nucleação, crescimento e adensamento da geada. Neste capítulo, os dados experimentais e os resultados numéricos são comparados, analisados e discutidos.

6.1. Nucleação

No Capítulo 4, foram realizados experimentos com cinco superfícies, todas de texturas diferentes, com intuito de identificar os limites de nucleação, os quais são aqui comparados com as previsões do modelo numérico, apresentado no Capítulo 2.

Tal comparação é mostrada na figura 6.1, onde além de uma razoável concordância, se observa que o limite de nucleação é na realidade o limite de condensação.

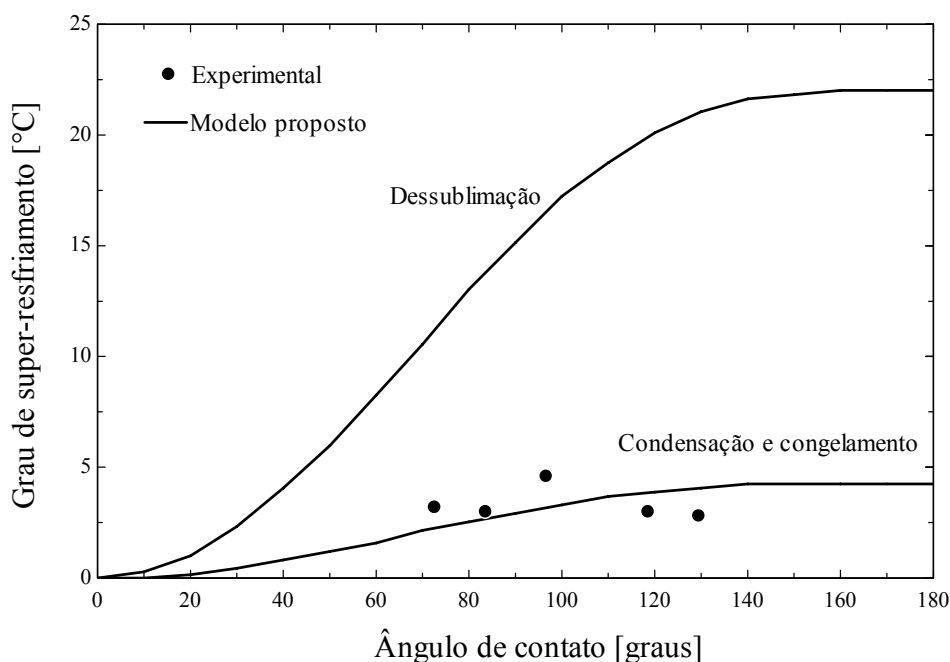


Figura 6.1 – Comparação entre os resultados numéricos e experimentais.

De uma maneira geral, percebe-se que o modelo tende a superestimar os dados experimentais para ângulos de contato mais elevados e subestimá-los para menores ângulos de contato. Uma possível causa para tal comportamento pode ser os efeitos da rugosidade, não levados em conta pelo modelo. De todo modo, observa-se que o modelo numérico apresenta resultados satisfatórios em relação aos dados experimentais, especialmente quando se leva em conta a complexidade do fenômeno envolvido.

O modelo desenvolvido no presente trabalho foi também comparado com os dados experimentais obtidos por Na e Webb (2003), como se pode observar na figura 6.2. Nota-se que o modelo proposto por esses autores não apresenta concordância com os próprios resultados experimentais, indicando um possível erro de formulação matemática. O modelo apresentado nesta dissertação, por outro lado, mostrou resultados próximos dos valores experimentais.

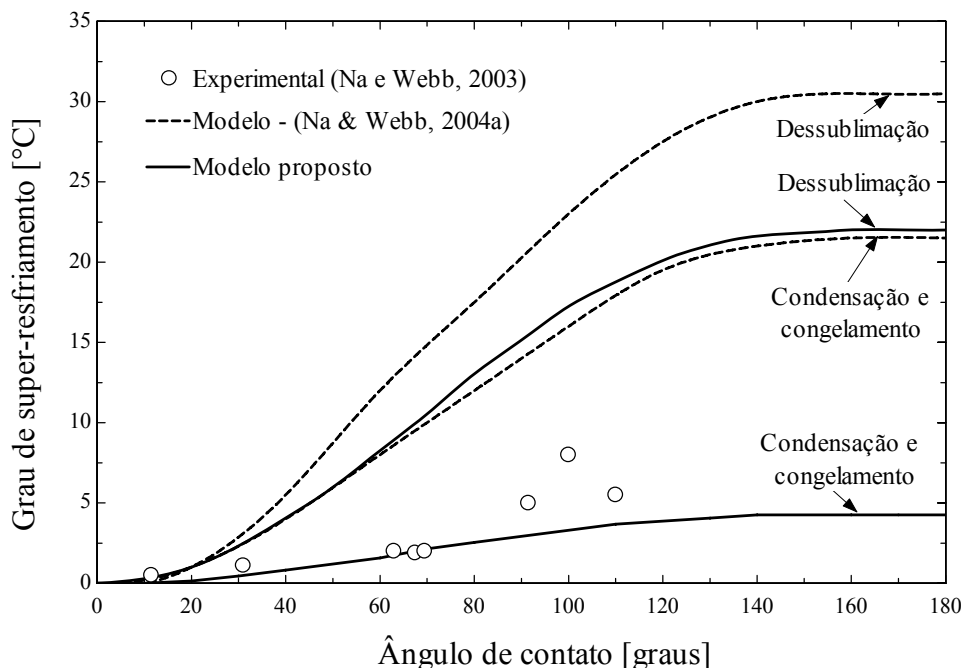


Figura 6.2 – Comparação entre os resultados dos experimentos de Na e Webb (2004a) com os modelos de nucleação desenvolvidos por Na e Webb (2004a) e com o modelo proposto no presente trabalho.

Comparando os dados experimentais obtidos no Capítulo 5 com as previsões do modelo proposto no presente trabalho, verifica-se que quando as portas estão fechadas, existem condições favoráveis à formação de gelo sobre todas as superfícies, com exceção da superfície III (ver figura 6.3).

Quando as portas são abertas percebe-se que existem condições para a formação de gelo sobre as superfícies I e VIII e de geada sobre as demais (ver figura 6.4).

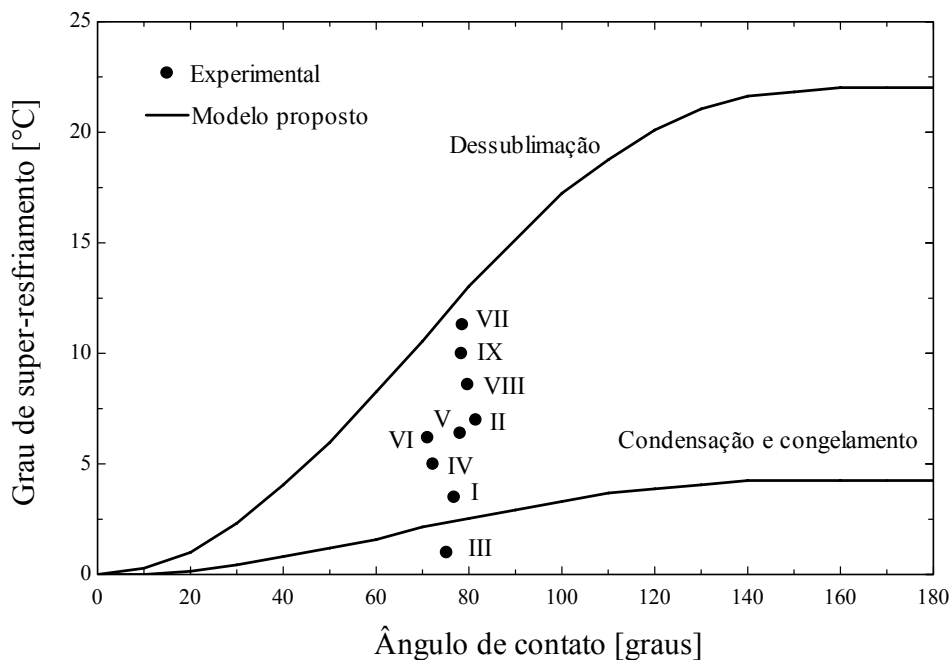


Figura 6.3 – Comparação entre os resultados dos experimentos realizados no produto com a porta fechada e o modelo proposto.

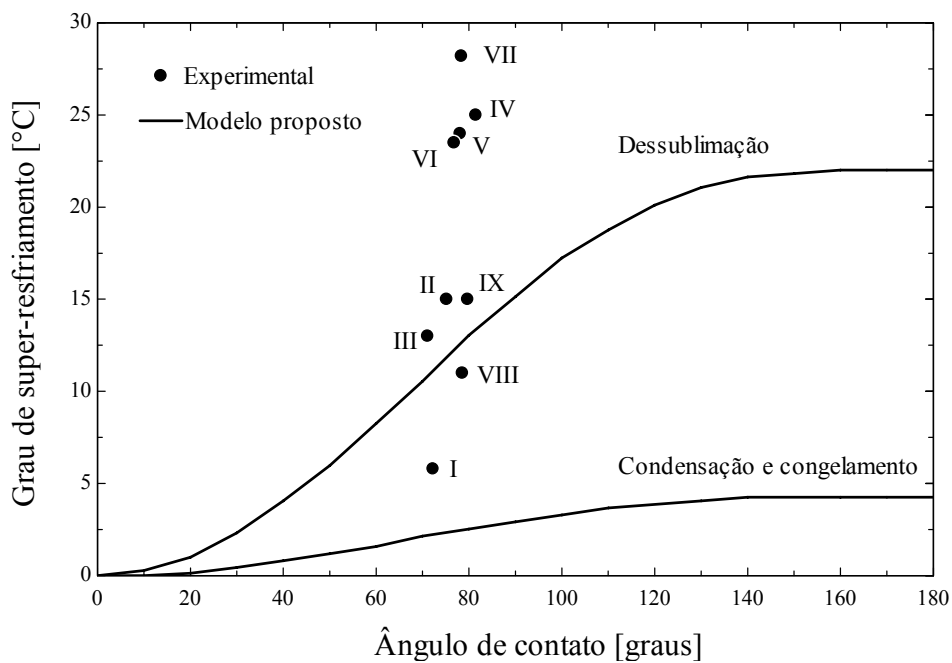


Figura 6.4 – Comparação entre os resultados dos experimentos aplicados realizados com abertura das portas e o modelo proposto.

Ao término do teste de abertura de portas, as superfícies foram fotografadas para comprovar a existência de gelo ou geada (ver figura 6.5). Ao contrário das expectativas não se observou gelo sobre a superfície I, talvez porque o grau de super-resfriamento era apenas levemente superior ao limite de condensação. Por outro lado observou-se a presença de uma grande quantidade de gelo sobre a superfície inferior do reservatório de água (superfície VIII).

Uma forte formação de geada foi observada sobre as superfícies VI, II, e III, enquanto que uma camada de geada relativamente fina foi encontrada sobre as superfícies VII, IV, V e IX. A partir dos resultados mostrados na figura 6.4, fica evidente que o modelo pode ser empregado para estabelecer uma metodologia de projeto para eliminar eventuais focos de gelo ou geada sobre uma determinada superfície. As linhas gerais dessa metodologia são apresentadas na figura 6.6.

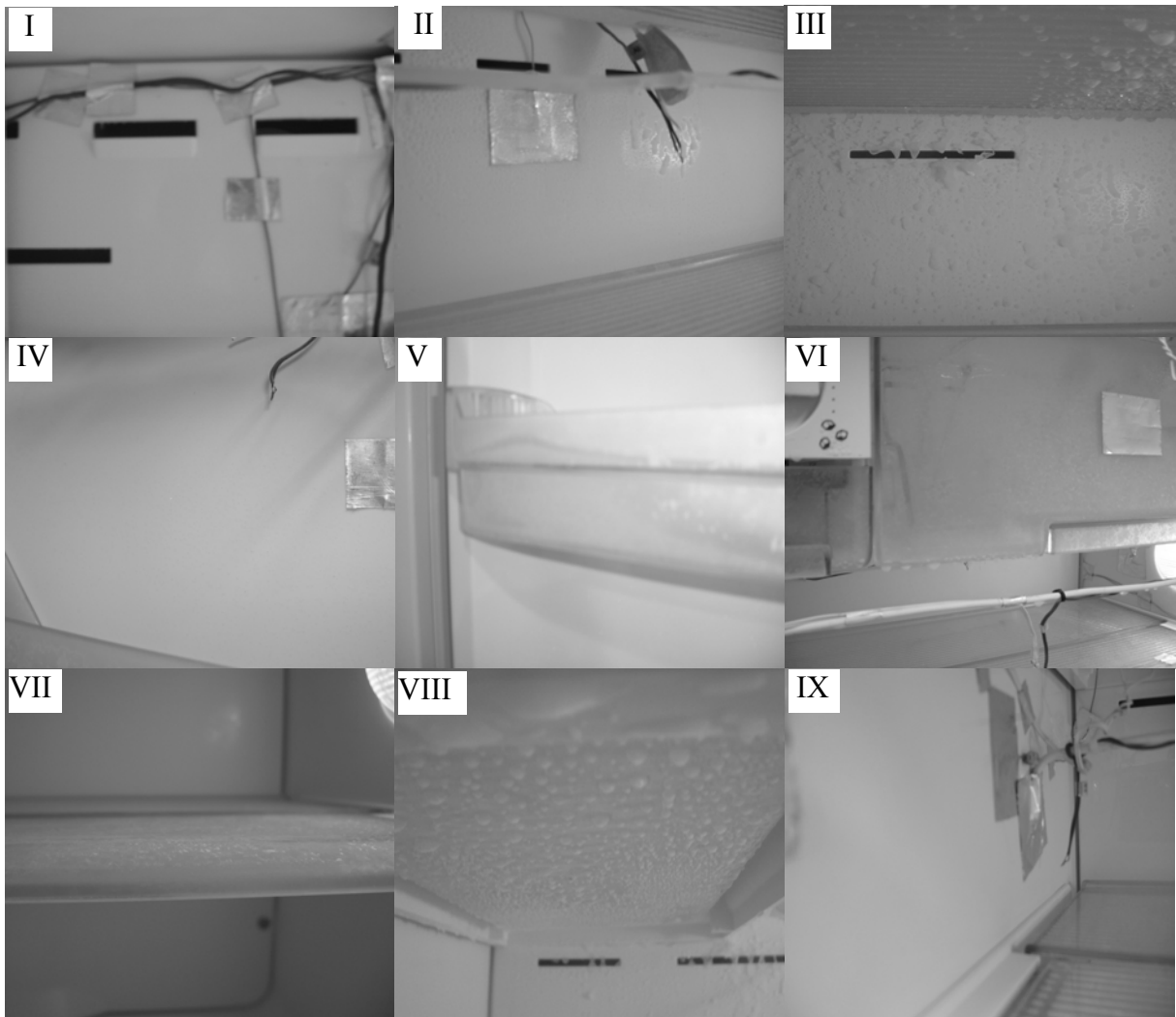


Figura 6.5 – Visualização da formação de gelo e geada no interior do compartimento congelador.

Primeiramente identifica-se as superfícies onde existem focos de gelo ou geada. Em seguida mede-se o grau de super-resfriamento e o ângulo de contato de tais superfícies. Os resultados então obtidos podem ser comparados com as previsões do modelo de nucleação. Com base nessa comparação são então introduzidas modificações no refrigerador (ângulo de contato e condições de operação) com o intuito de eliminar o foco de gelo ou geada. Introduzidas as modificações, o refrigerador é novamente testado para verificar se as modificações tiveram ou não efeito. Tal processo iterativo continua até que o foco de gelo ou geada seja eliminado.

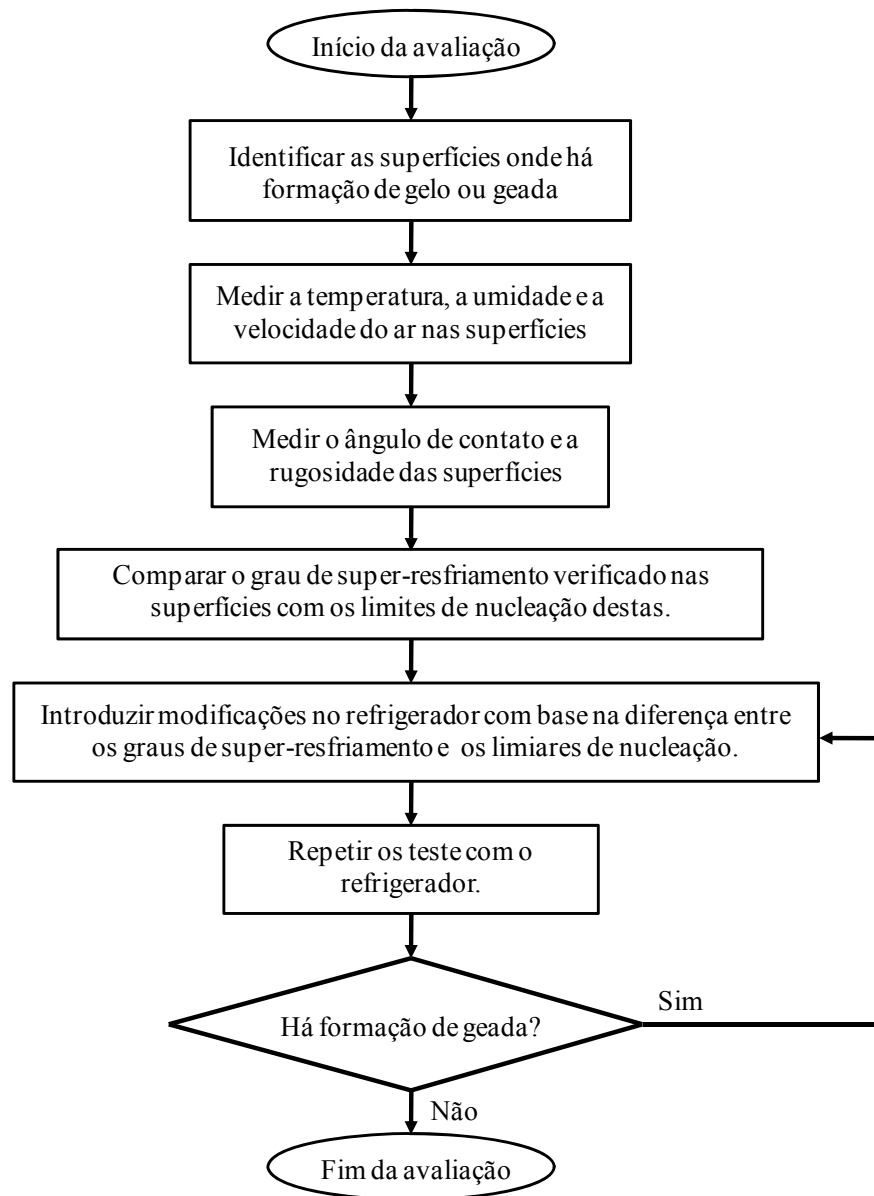


Figura 6.6 – Representação esquemática da metodologia para eliminação de gelo ou geada das superfícies de refrigeradores domésticos.

6.2. Crescimento e adensamento

6.2.1. Validação do modelo

A figura 6.7 mostra uma comparação entre a espessura da camada de geada obtida experimentalmente, com as previsões do modelo de crescimento e adensamento. Percebe-se que o modelo consegue prever os resultados experimentais dentro de uma banda de erros de $\pm 10\%$, com exceção dos pontos obtidos durante os momentos iniciais dos experimentos, onde a incerteza de medição é elevada. De uma forma geral, verificou-se um erro RMS (*Root Mean Square*) de 9,3 %, o que mostra a qualidade do modelo semi-empírico proposto. A sensibilidade do modelo em relação às condições experimentais é explorada a seguir.

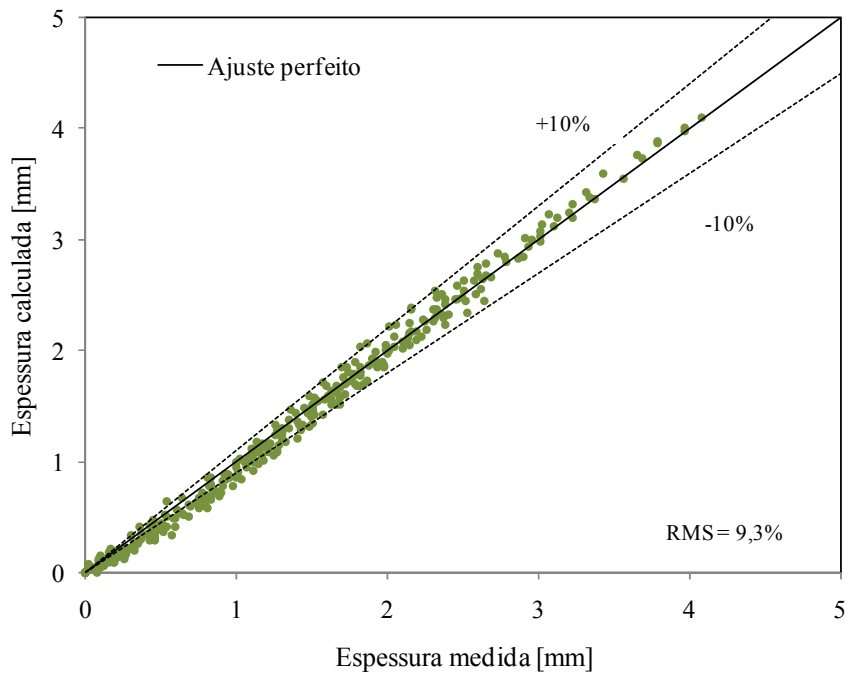


Figura 6.7 – Comparação entre os valores calculados e experimentais para a espessura da geada.

A figura 6.8 mostra a evolução da espessura da camada de geada ao longo do tempo, para quatro temperaturas da placa fria. Percebe-se que o modelo consegue reproduzir bastante bem os dados experimentais e que a espessura da camada aumenta com a diminuição da temperatura da superfície, pois isso aumenta o grau de super-resfriamento e conseqüentemente o fluxo total de massa de vapor (ver figura 6.9). Além disso, ocorre uma diminuição da densidade da geada (ver figura 6.10).

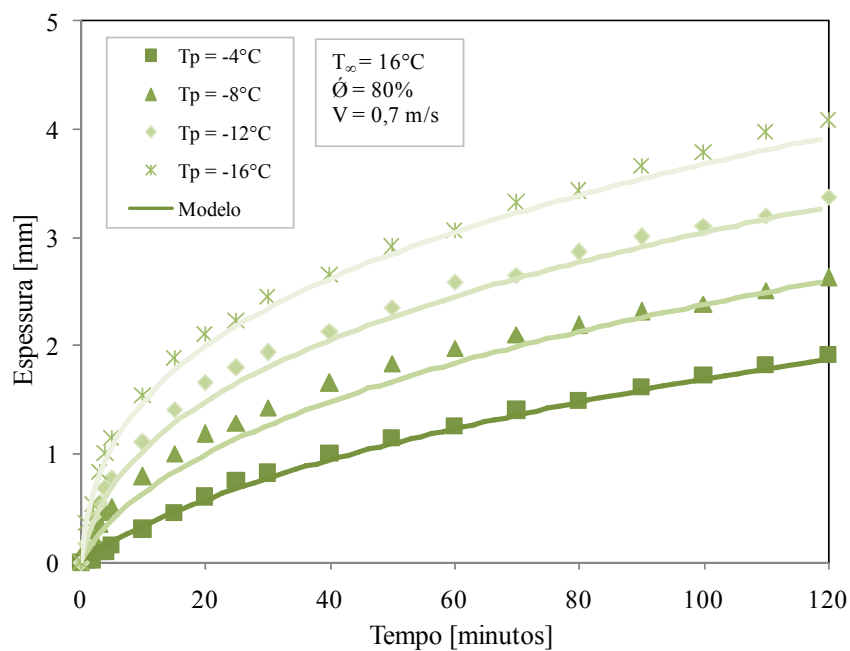


Figura 6.8 – Validação do modelo para a variação da temperatura da placa fria.

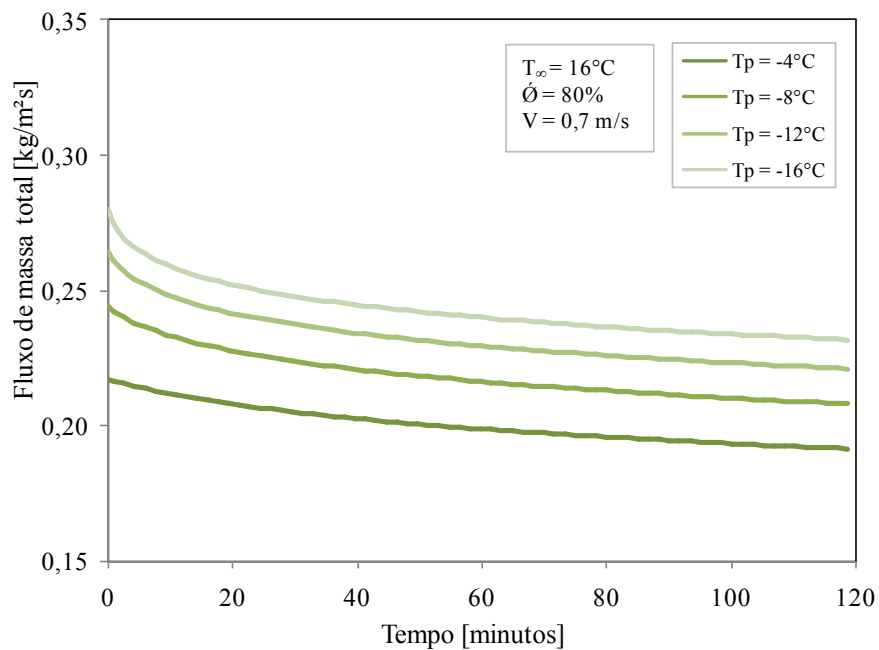


Figura 6.9 – Variação do fluxo de massa total de vapor.

Nota-se que o fluxo de massa total de vapor d'água diminui ao longo do tempo, especialmente no início do processo de formação de geadas. Isso ocorre em decorrência da redução do grau de super-resfriamento, provocado pelo aumento da temperatura da superfície da geadas, efeito esse que é tanto mais forte quanto mais baixa a temperatura da placa (ver figura 6.11).

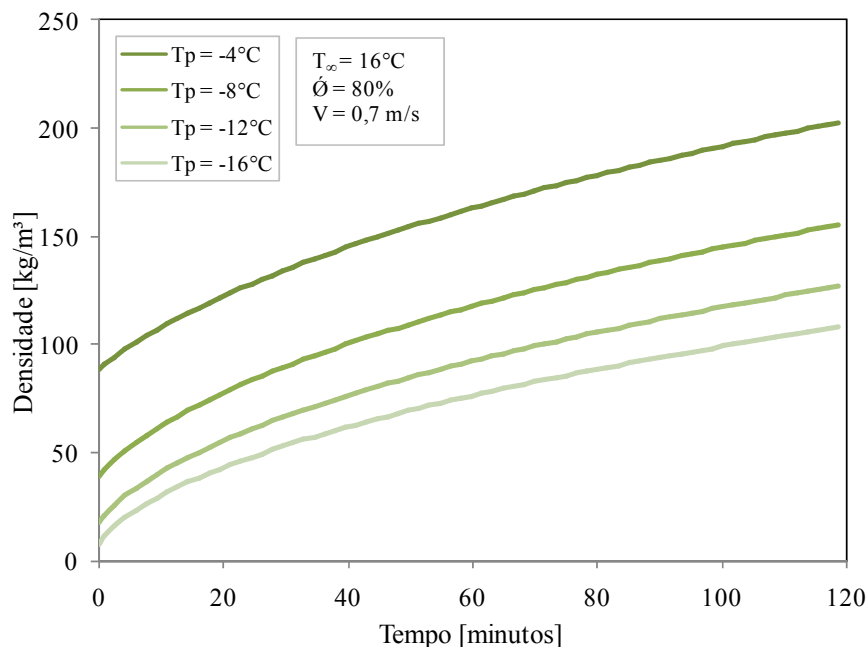


Figura 6.10 – Variação da densidade da geadas.

O comportamento ilustrado na figura 6.11 está diretamente relacionado com o da figura 6.8, ou seja, quanto menor a temperatura da placa, maior a variação da espessura da geadas e conseqüentemente maior a variação da temperatura da superfície da geadas.

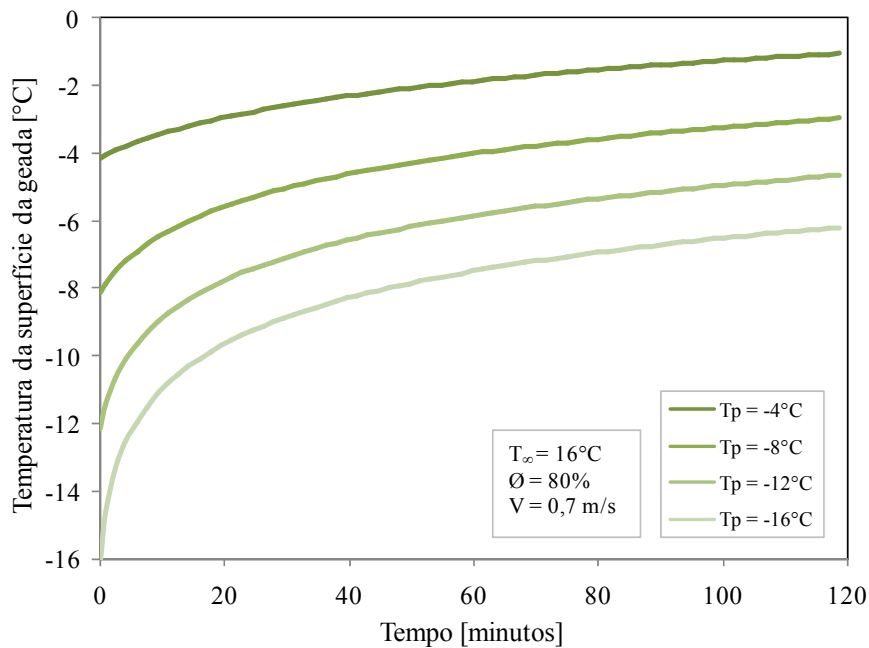


Figura 6.11 – Variação da temperatura da superfície da geada.

Além de reduzir o fluxo de massa de vapor d'água, o aumento da temperatura da superfície da geada reduz o fluxo de calor sensível para a superfície (ver figura 6.12), principalmente nos instantes iniciais do processo. Tal redução é consideravelmente maior quanto menor a temperatura da placa fria.

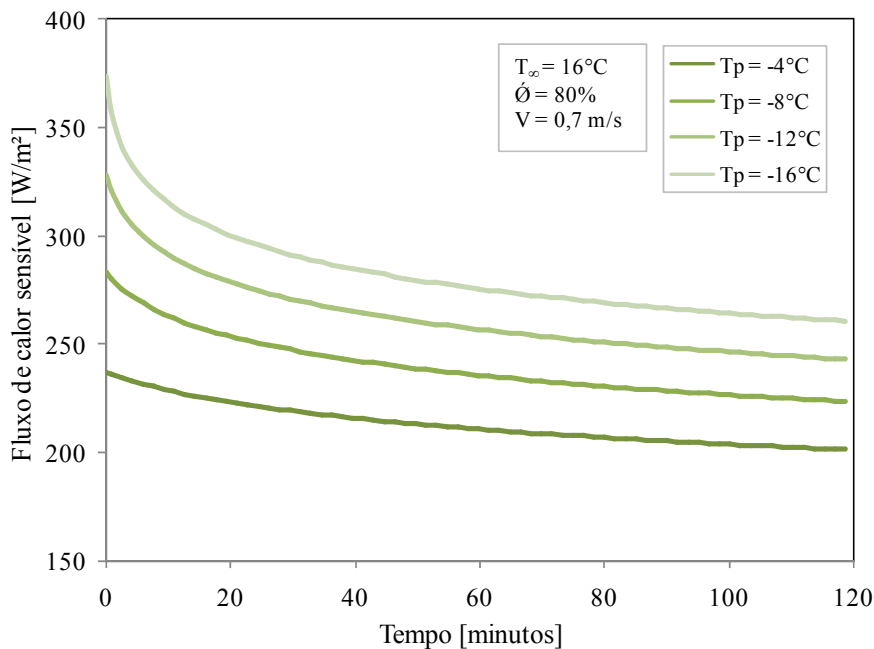


Figura 6.12 – Variação do fluxo de calor sensível.

A diminuição da temperatura da placa fria aumenta o fluxo de massa de vapor d'água para a camada de geada e, como consequência, aumenta o fluxo de calor latente (ver figura 6.13). Da mesma forma como o fluxo de massa total, o fluxo de calor latente diminui ao longo

do tempo, de maneira mais acentuada nos instantes iniciais e quando a temperatura da placa é mais fria.

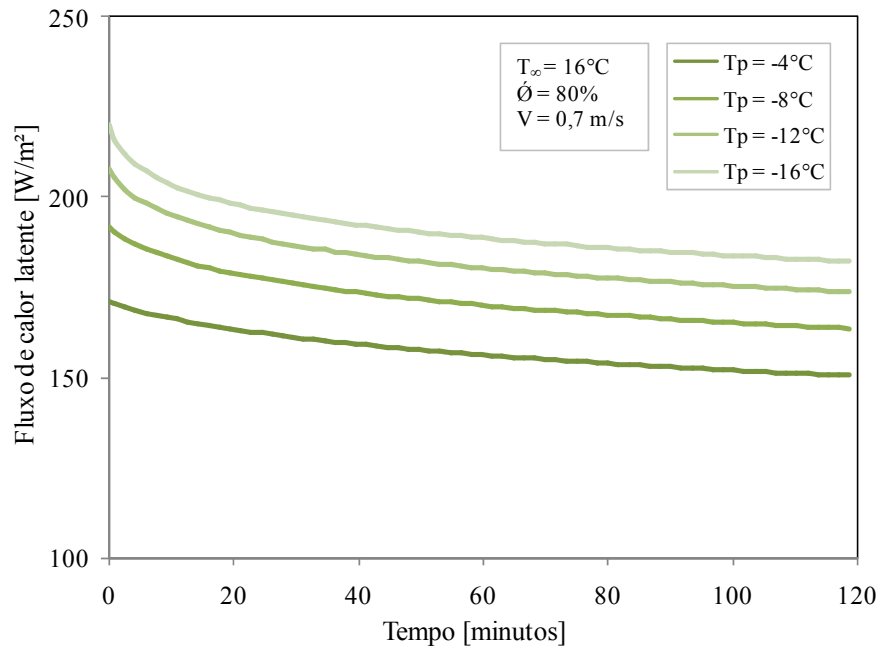


Figura 6.13 – Variação do fluxo de calor latente.

Os fluxos de massa responsáveis pelo crescimento e pelo adensamento da geada, indicados respectivamente nas figuras 6.14 e 6.15, apresentam comportamentos opostos ao longo do tempo. Em função de aspectos morfológicos, a geada tende a crescer de maneira mais uniforme quando a superfície se encontra mais quente e com menor grau de supersaturação. Ao contrário, formas de cristal não-uniformes, que originam em uma camada de geada mais porosa, são encontradas em superfícies mais frias e com maiores graus de supersaturação. Em decorrência destas particularidades, foram observados fluxos de massa de crescimento menores quando a placa fria foi submetida a temperaturas mais baixas. Por outro lado, foram verificados maiores fluxos de massa de adensamento nos casos em que a superfície foi mantida mais fria. Em suma, graus de supersaturação maiores provocam o crescimento acelerado e de maneira isolada dos cristais de geada. O crescimento rápido desses cristais deixa espaços vazios entre eles, o que facilita a difusão do vapor d'água para o interior da camada de geada, e por consequência aumenta o fluxo de massa de adensamento. Como apenas poucos cristais crescem simultaneamente, um fluxo de massa de crescimento menor foi observado nos casos onde a placa foi mantida mais fria.

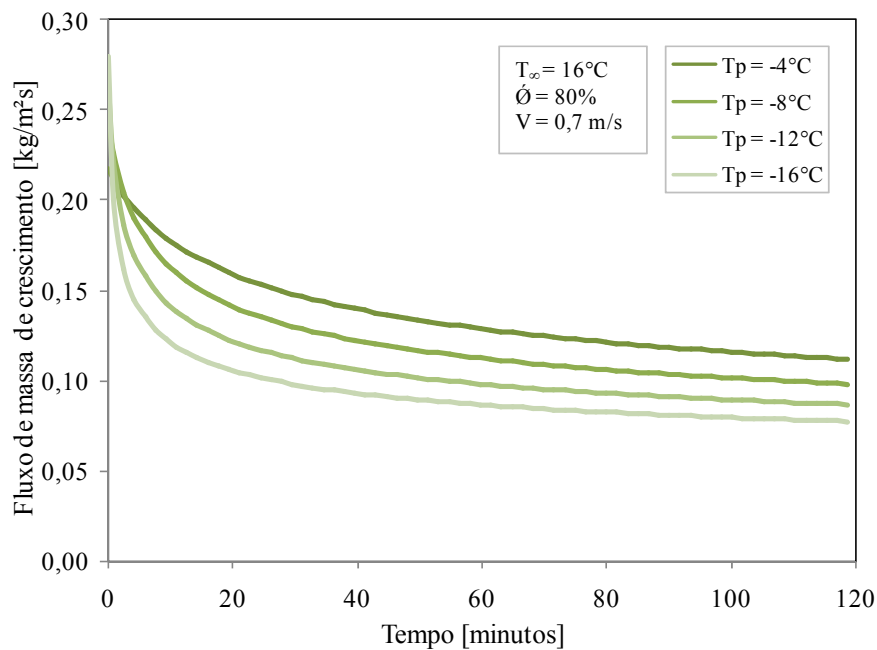


Figura 6.14 – Variação do fluxo de massa de crescimento.

Como se pode observar na figura 6.10, a densidade da geada varia ao longo do tempo, principalmente nos instantes iniciais, em virtude do aumento no fluxo de massa de adensamento e da redução do fluxo de massa de crescimento. Nos instantes finais, o fluxo de massa de adensamento praticamente estabiliza, porém o fluxo de massa de crescimento continua a reduzir, fazendo com que a densidade da geada continue a crescer. Como se pode verificar na figura 6.8, a geada cresce mais rapidamente nos instantes iniciais, e mais lentamente no decorrer do processo de formação da camada devido à redução no fluxo de massa de crescimento ao longo do tempo.

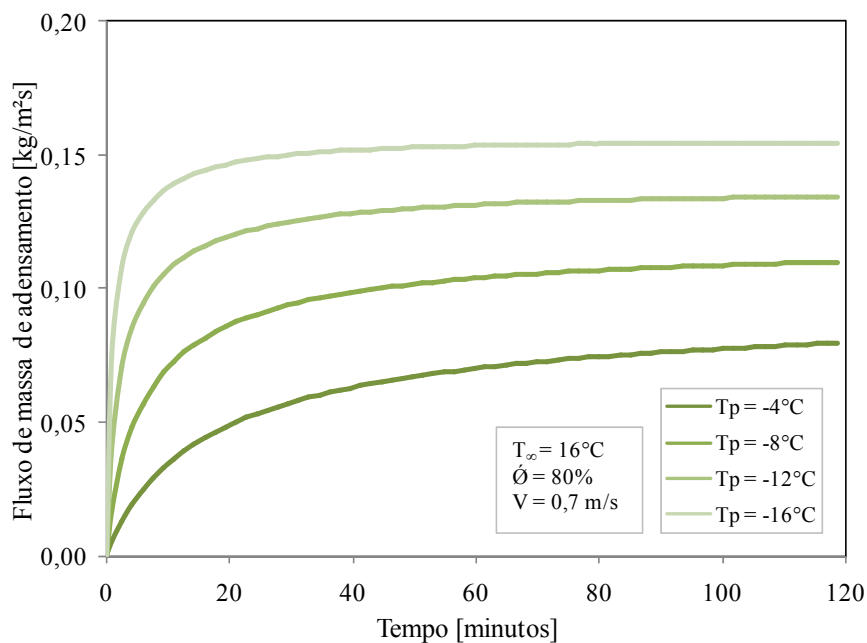


Figura 6.15 – Variação do fluxo de massa de adensamento.

O efeito da temperatura da placa fria foi também avaliado para uma velocidade de 1,0 m/s, mantendo-se as demais condições constantes. A figura 6.16, mostra que o comportamento da espessura da geada ao longo do tempo é bastante similar ao obtido com uma velocidade de 0,7 m/s, o que indica que o efeito da temperatura da placa sobre o crescimento da camada de geada praticamente independe da velocidade do ar.

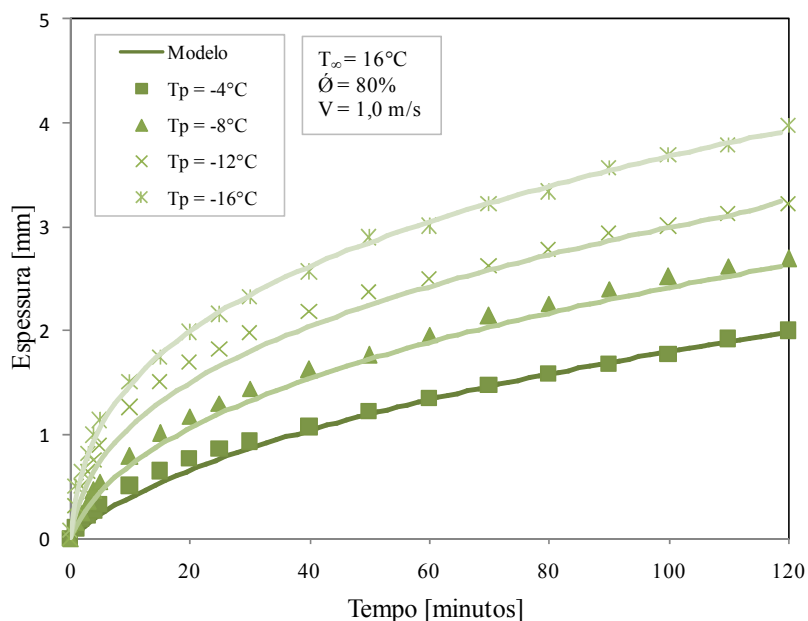


Figura 6.16 – Validação do modelo para a variação da temperatura da placa fria.

A figura 6.17 mostra que a elevação da velocidade do ar de 0,4m/s para 1,0m/s afeta muito levemente a espessura da camada de geada, apesar do fluxo de massa total ser maior para velocidade mais elevadas (ver figura 6.18). Tal fato deve-se à variação na densidade da geada ao longo do tempo em função da velocidade do ar, como ilustrado na figura 6.19.

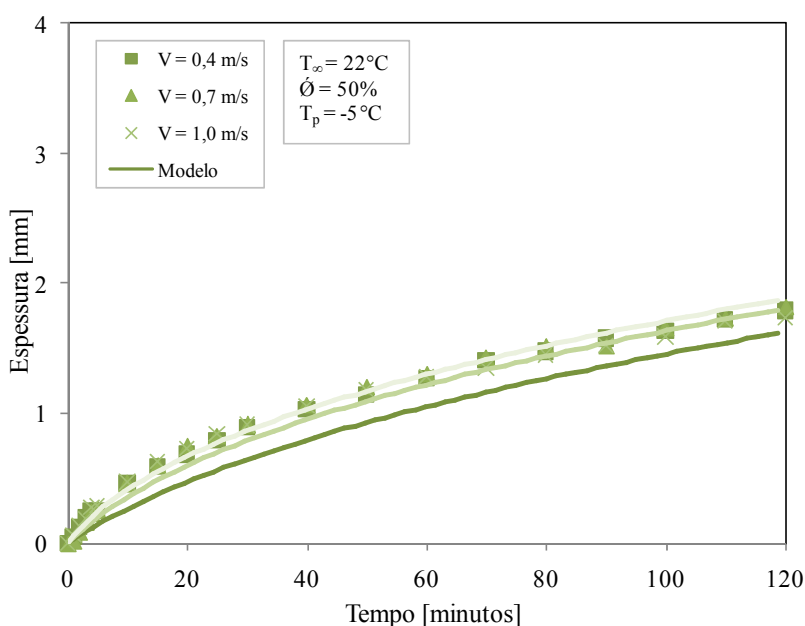


Figura 6.17 – Validação do modelo para a variação da velocidade.

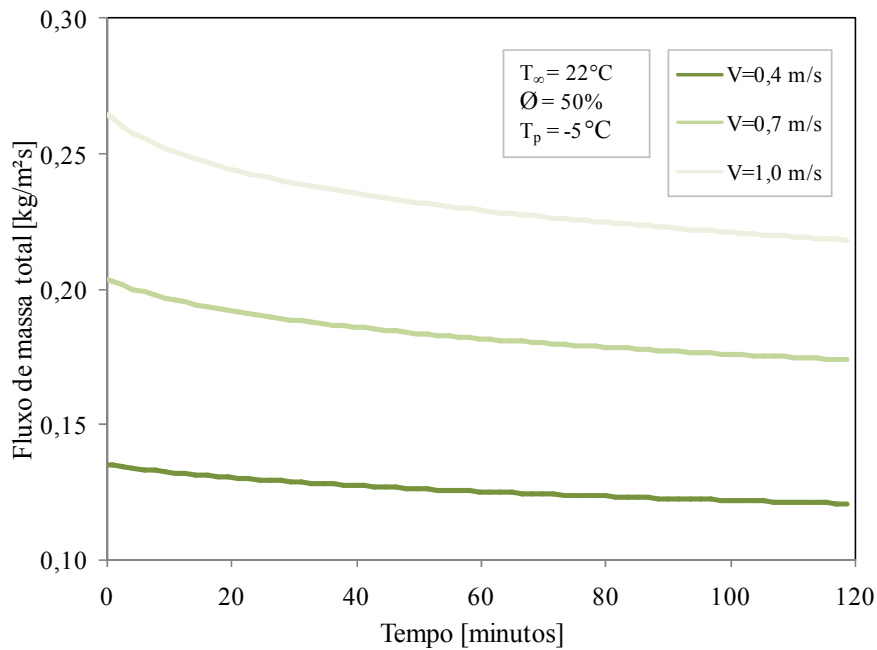


Figura 6.18 – Variação do fluxo de massa total de vapor.

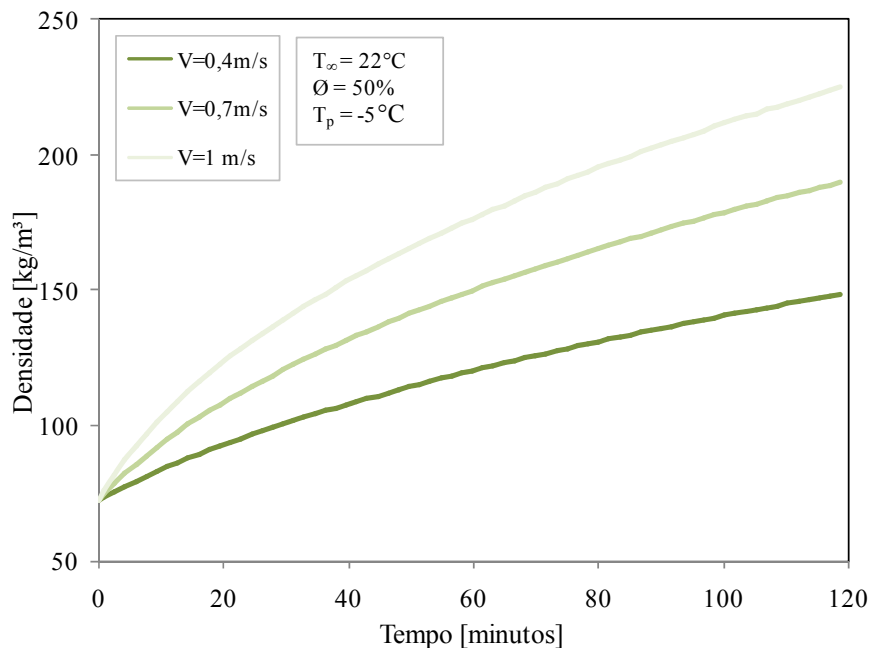


Figura 6.19 – Variação da densidade da gead.

O fluxo de massa total se reduz ao longo do tempo, devido a redução do grau de super-resfriamento na superfície da gead, provocado pela elevação da temperatura superficial (ver figura 6.20). Tal redução é mais acentuada quanto maior for a velocidade do ar, em função da maior elevação da temperatura da superfície da gead.

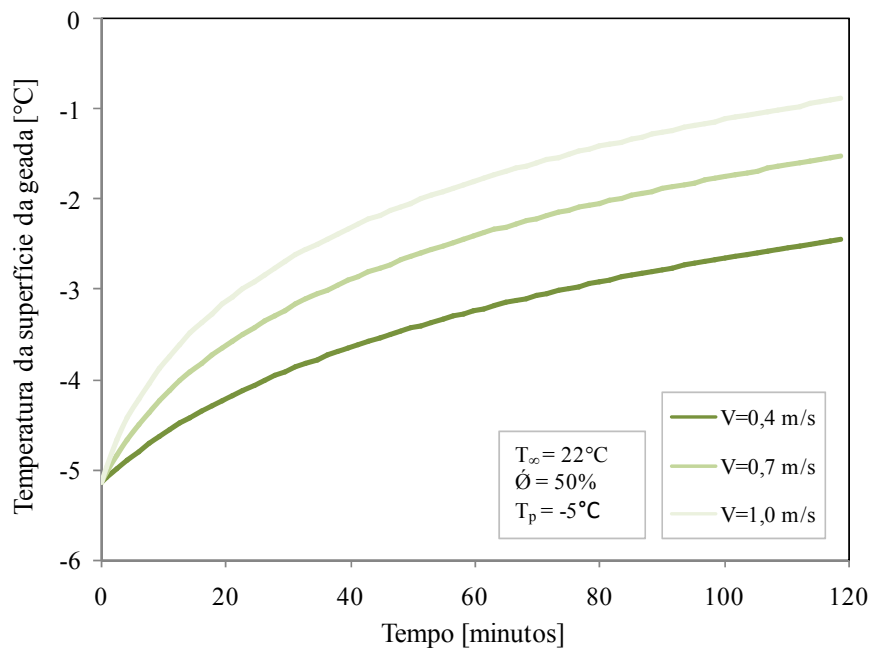


Figura 6.20 – Variação da temperatura da superfície da geada, com a placa fria em -5°C .

A figura 6.21 mostra que o aumento da velocidade do ar provoca um aumento no fluxo de calor sensível, o que se deve ao aumento no coeficiente de transferência de calor.

Como indicado na figura (6.19), a variação da densidade da geada é maior quando a velocidade do ar é mais elevada. Isso se deve ao maior fluxo de massa de adensamento em velocidades maiores (ver figura 6.22). Nesta figura percebe-se que a variação do fluxo de massa de adensamento é mais intensa no início do processo, em razão da maior taxa de transferência de massa.

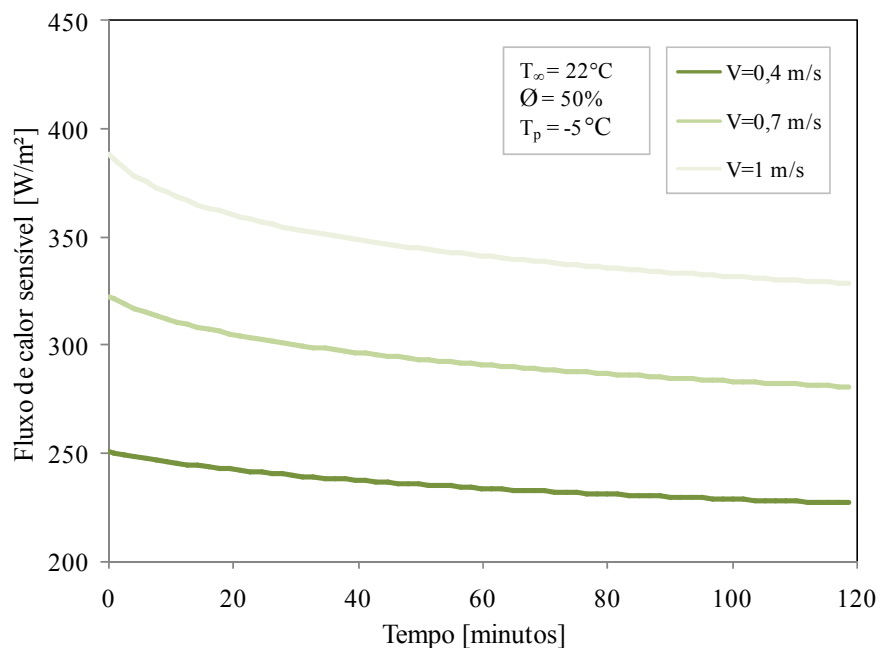


Figura 6.21 – Variação do fluxo de calor sensível.

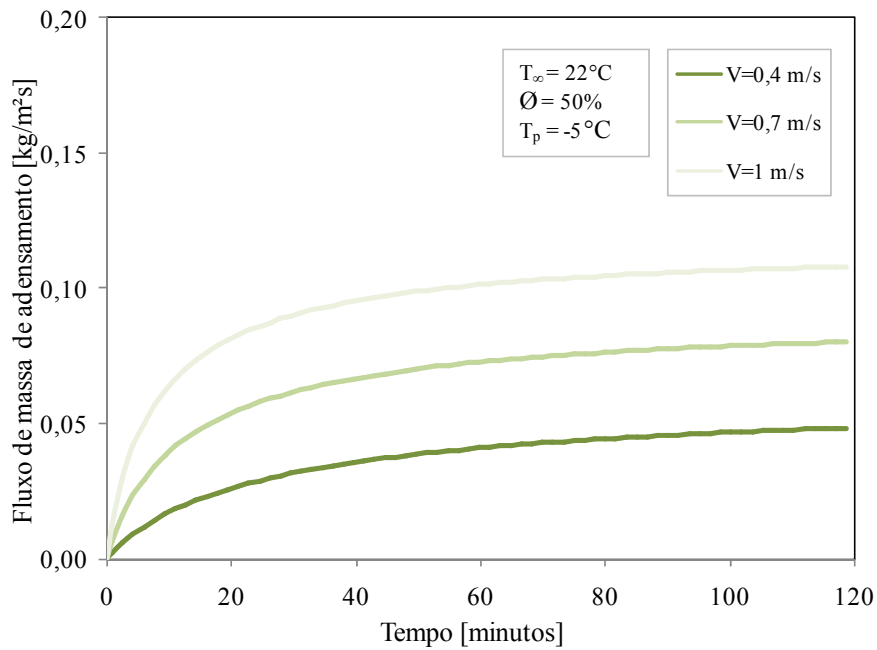


Figura 6.22 – Variação do fluxo de massa de adensamento.

A exemplo do fluxo de massa de adensamento, o fluxo de massa de crescimento é também maior em velocidades mais elevadas (ver figura 6.23). As variações, no entanto, são pouco significativas devido ao aumento significativo da densidade.

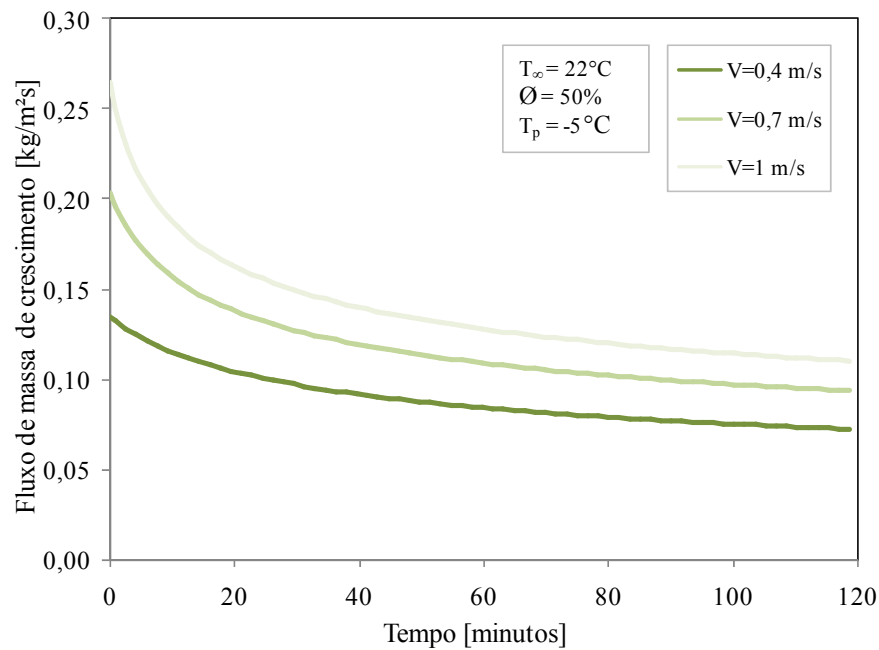


Figura 6.23 – Variação do fluxo de massa de crescimento.

A figura 6.24 mostra que o fluxo de calor latente aumenta com o aumento na velocidade do ar. Isso decorre da variação do fluxo de massa total (ver figura 6.18).

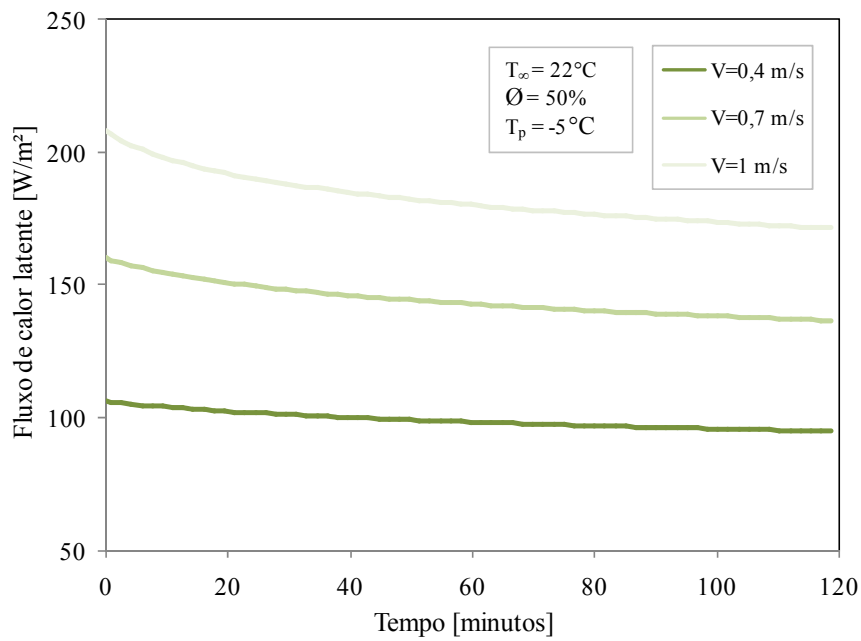


Figura 6.24 – Variação do fluxo de calor latente.

O efeito da umidade relativa do ar sobre o crescimento da geada foi também explorado. As figuras 6.25 e 6.26 mostram que tanto a espessura da camada de geada como o fluxo de massa de crescimento são afetadas apenas levemente pela umidade relativa.

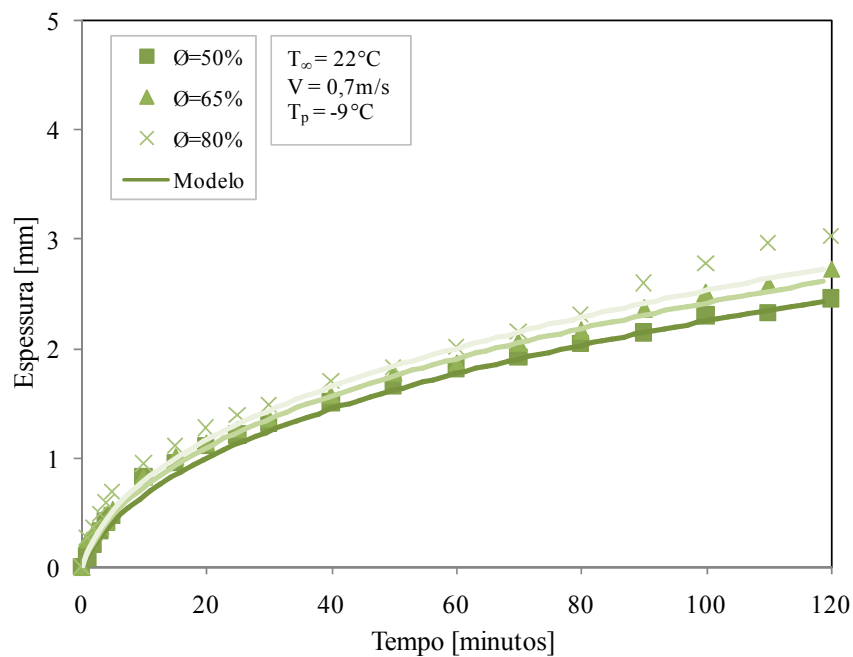


Figura 6.25 – Validação do modelo para a variação da umidade relativa.

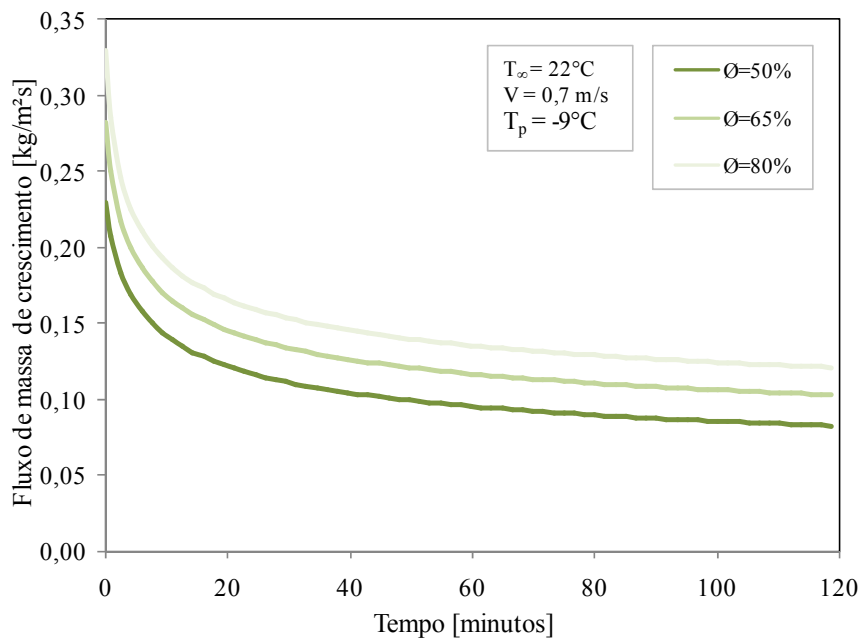


Figura 6.26 – Variação do fluxo de massa de crescimento.

Elevando a umidade relativa, mas mantendo as demais condições inalteradas, observa-se que o grau de supersaturação, e por conseqüência, o fluxo de massa total de vapor aumentam, como ilustrado na figura 6.27. Na figura 6.28, observa-se que a temperatura da superfície da geada aumenta ao longo do tempo, provocando um decréscimo nos fluxos de massa total e de crescimento.

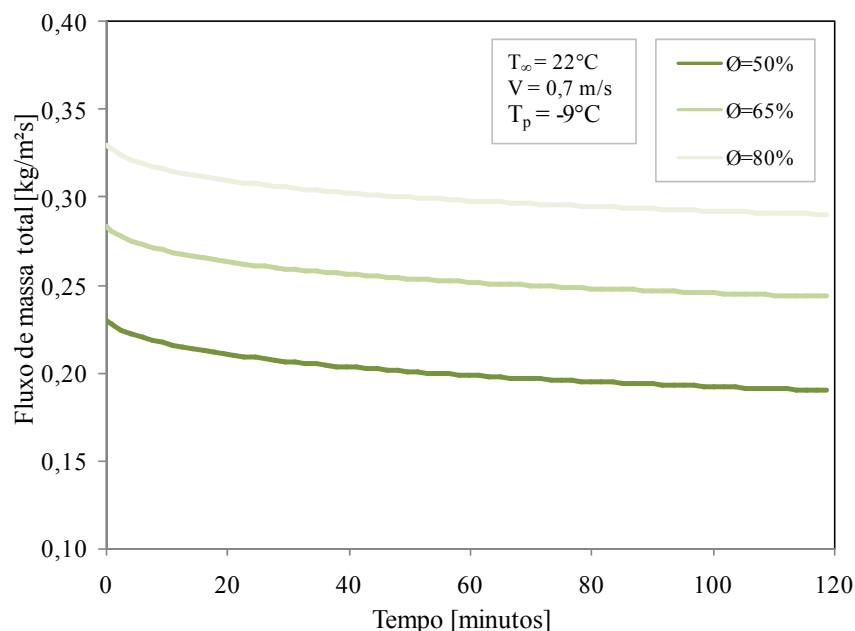


Figura 6.27 – Variação do fluxo de massa total.

Quanto mais alta a umidade relativa, maior a variação da temperatura da superfície da geada e, por conseguinte, maior a redução no fluxo de massa ao longo do tempo. Nota-se que, tanto o fluxo de massa total como o fluxo de massa de crescimento diminuem de maneira

mais acentuada nos instantes iniciais, em função da maior variação na temperatura da superfície, e de uma forma mais suave no decorrer do tempo, quando a temperatura da superfície da geada passa a variar menos.

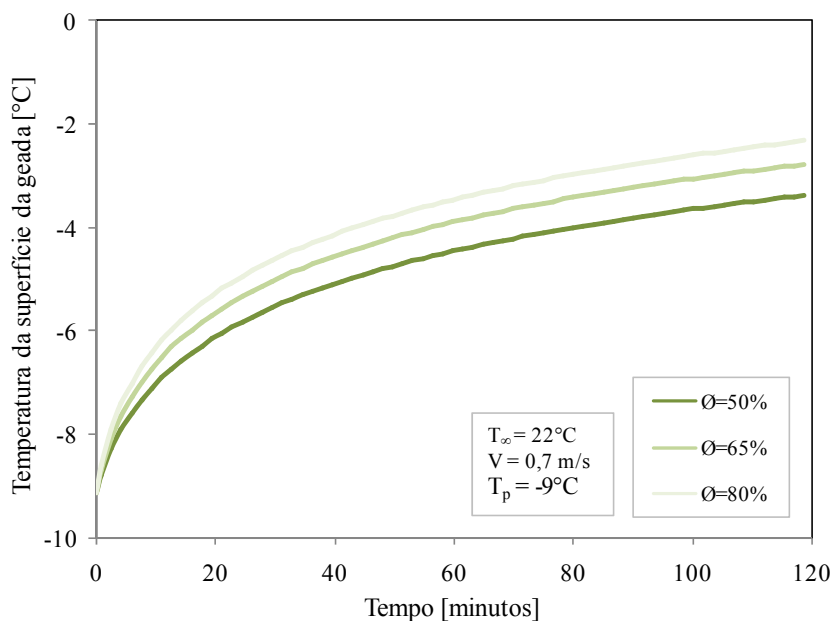


Figura 6.28 – Variação da temperatura da superfície da geada.

Umidades relativas mais elevadas originam fluxos de massa de adensamento mais elevados, como ilustrado na figura 6.29, o que torna a camada de geada mais densa (ver figura 6.30). Nota-se ainda que o aumento no fluxo de massa de adensamento ao longo do tempo é maior nos instantes iniciais, e diminui gradativamente em função da redução no gradiente de umidade entre a corrente de ar e a superfície da geada.

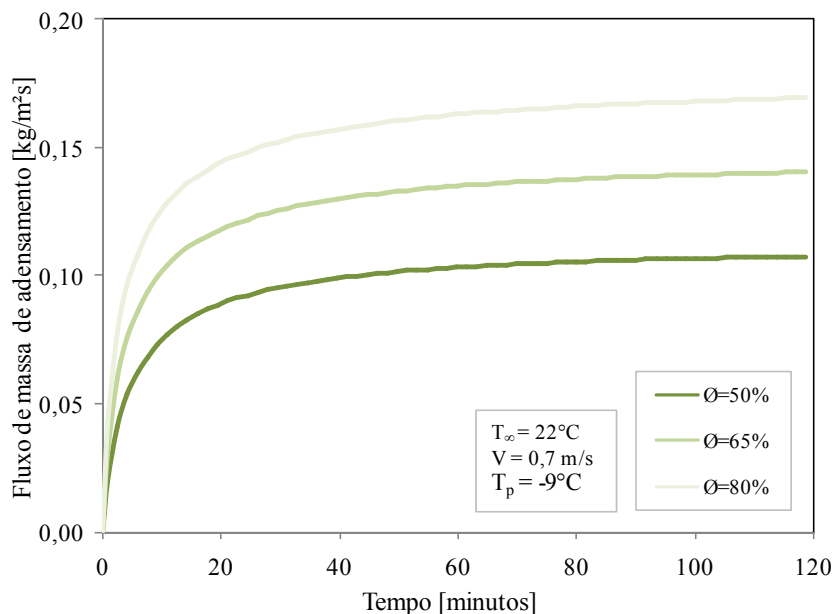


Figura 6.29 – Variação do fluxo de massa de adensamento.

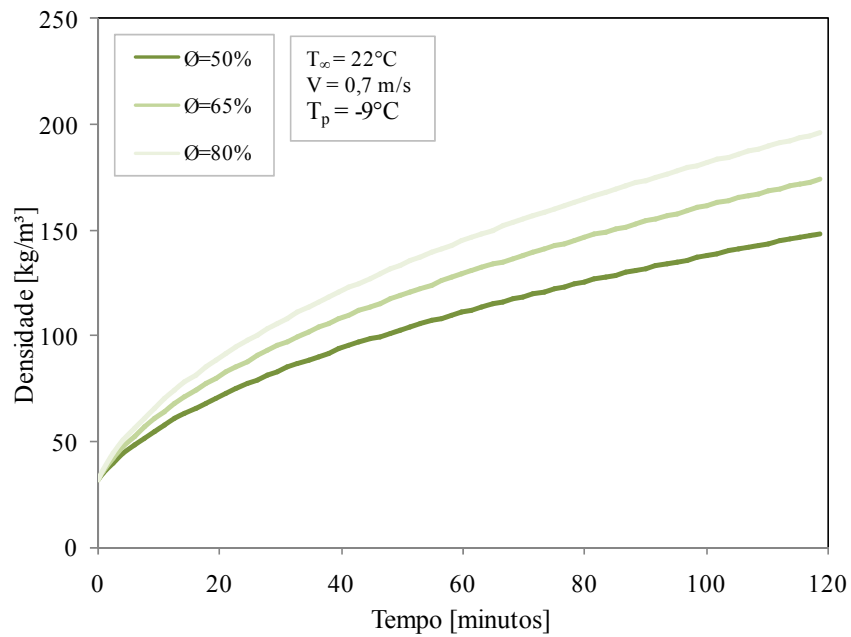


Figura 6.31 – Variação da densidade da geada.

O fluxo de calor sensível é pouco afetado pela umidade relativa, pois a temperatura da superfície da geada também é pouco afetada por esse parâmetro (ver figura 6.28).

Em resumo, nota-se que a temperatura da placa fria exerce a maior influência sobre a taxa de crescimento da geada, pois altera diretamente o grau de super-resfriamento. Tal efeito, quando combinado com um aumento na velocidade da corrente de ar ou na umidade relativa, afeta também a taxa de adensamento da geada.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

7.1. Conclusões finais

Tanto a importância como a necessidade de um estudo com foco na formação de geada sobre as superfícies internas de um refrigerador doméstico foram enfatizadas e discutidas. Através da revisão de alguns trabalhos disponíveis na literatura, identificou-se que o grau de super-resfriamento, o ângulo de contato e a rugosidade são os principais parâmetros que afetam a nucleação e o crescimento de cristais de geada sobre uma superfície plana.

Os fundamentos da nucleação da geada foram investigados, o que resultou num modelo numérico capaz de prever o limite de nucleação de uma determinada superfície em função do seu ângulo de contato. Ainda com base nos conceitos fundamentais de nucleação, verificou-se qualitativamente que um aumento na rugosidade facilita a nucleação da geada sobre a superfície. Adicionalmente, os princípios básicos dos processos de crescimento e adensamento da geada foram estudados.

Um aparato experimental foi construído especificamente para conduzir os experimentos de nucleação, crescimento e adensamento da geada. Um sistema de aquisição e tratamento de imagens foi empregado para visualizar a formação de geada sobre as amostras. Diversas amostras de um material polimérico utilizado na fabricação de componentes estruturais de refrigeradores domésticos foram submetidas à diferentes acabamentos superficiais e à medições de ângulo de contato e rugosidade. Tais superfícies foram submetidas à diversas condições de operação, quando se constatou que um aumento no ângulo de contato aumenta o limite de nucleação, tornando a superfície mais robusta à formação de geada.

Um refrigerador da marca Brastemp, modelo BRX48, foi posicionado num ambiente com temperatura e umidade relativa controladas e submetido a ensaios com abertura de portas. Durante o experimento a temperatura superficial e a temperatura de orvalho em diversas posições do compartimento congelador foram monitoradas. Observou-se que existem condições favoráveis a formação de gelo em alguma superfícies, principalmente no reservatório de água e na capa do *plenum*, mesmo quando as portas permanecem fechadas. Durante o ensaio com abertura de portas, foram observadas condições favoráveis à formação

de geada nas prateleiras e na porta do congelador. Tais resultados foram comparados com as previsões do modelo numérico, e comprovados através de observações visuais no final do experimento.

Um modelo semi-empírico, para prever a variação da espessura de uma camada de geada ao longo do tempo, foi desenvolvido com base em conceitos fundamentais. Uma correlação empírica para a densidade da geada foi derivada a partir de dados experimentais gerados no presente trabalho. Tal correlação prevê a densidade inicial da geada em função da temperatura do substrato, o que representa um avanço em relação a maioria dos modelos encontrados na literatura, onde a densidade inicial é arbitrada.

O modelo foi validado contra resultados experimentais obtidos através de um aparato especialmente construído para tal finalidade, quando se observou um razoável nível de concordância. O efeito de alguns parâmetros operacionais sobre a taxa de crescimento da geada foi também analisado, quando se observou que a temperatura da placa é um fator com maior efeito sobre a taxa de crescimento da espessura da geada. Constatou-se ainda que a umidade relativa e a velocidade do ar são fatores que afetam a taxa de adensamento da geada.

7.2. Sugestão para trabalhos futuros

Observou-se que um aumento no ângulo de contato pode aumentar o limite de nucleação, desde que se mantenha ou diminua a rugosidade da superfície. As técnicas utilizadas no presente trabalho para alterar o ângulo de contato, provocam também alterações na rugosidade. Portanto, caso se deseje aumentar o ângulo de contato de uma determinada superfície buscando um aumento no limite de nucleação, deve-se utilizar métodos um pouco mais sofisticados, como o PECVD (do inglês, *Plasma Chemical Enhanced Vapor Deposition*), utilizado por Wu et al. (2006). Mediante tal método, os autores aumentaram o ângulo de contato para até 150°, sem alterar a rugosidade.

Durante os experimentos aplicados, constatou-se que algumas superfícies com graus de super-resfriamento superiores ao limite de nucleação não apresentavam formação de geada ao final do ensaio. Tal fenômeno foi creditado ao fluxo de ar elevado sobre tais superfícies, que, a princípio, poderia permitir a sublimação da geada. Para melhor compreender esse fenômeno, sugere-se a realização de experimentos específicos através do aparato construído no presente trabalho.

Finalmente sugere-se que os conhecimentos adquiridos no presente trabalho sejam utilizados para investigar o processo de formação de geada em evaporadores *no-frost*.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAEHR, H. D., STEPHAN, K., **Heat and mass transfer**. 2ª ed. Berlin: Springer Verlag, 1996, pp. 237 – 240.
- BECKER, R., DORING, W., 1935, **Annals of Physics**, Vol. 24, pp. 719.
- CHENG, C.H., CHENG, Y.C., 2001, **Predictions of frost growth on a cold plate in atmospheric air**, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 28, Issue 7, pp. 953-962.
- CHENG, C.H., SHIU, C.C., 2002, **Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 4289–4303.
- ELETROS, 2007, **Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Eletroeletrônicos**, <http://www.eletros.org.br>.
- FLETCHER, N.H., 1970, **The Chemical Physics of Ice**. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- FRITZEN, F.A., 2006, **Long Duration Test Robustness**, Internal Report of Whirlpool SA, Joinville, Brazil.
- GOSNEY, W.C., 1982, **Principles of refrigeration**, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- HAYASHI, Y., AOKI A., ADASHI, S., HORI, K., 1977, **Study of frost properties correlating with frost formation types**. ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 99, pp. 239-245.
- JACOBUS, D.W., 1967. **Household refrigerator including defrost control means**. United States Patent Office, USA, US Patent Number 3309887.
- KOBAYASHI, T., 1958. **On the habit of snow crystals artificially produced at low pressures**. Journal of the Meteorological Society of Japan, Japan, Vol. 36, pp. 193-208.

- LEE, H., SHIN, J., HA, S., CHOI, B., LEE, J., 2004. **Frost formation on a plate with different hydrophilicity.** International Journal of Heat and Mass Transfer, USA, Vol. 47, pp. 4881-4893.
- LEE, J.S., JHEE, S., PARK, JK., KIM, J.S., LEE, K.S., 2005. **Frost formation on thermally conductive plastic plain plate.** 5th International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-compact Heat Exchanger Science, Engineering and Technology, Hoboken, NJ, USA.
- LEE, K.S., KIM, W.S., LEE, T.H., 1997. **A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface.** International Journal of Heat and Mass Transfer, USA, Vol. 40, pp. 4359-4365.
- LEE, Y.B., 2003. **Studies on the growth of the frost layer based on heat and mass transfer through porous media.** PhD thesis, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, 2003
- LIU, Z., WANG, H., ZHANG, X., MENG, S., MA, C., 2005a. **An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface by use of an anti-frosting paint. Part I. Anti-frosting performance and comparison with uncoated metallic surface.** International Journal of Refrigeration, USA, Vol 29, pp. 229 – 236.
- LIU, Z., WANG, H., ZHANG, X., MENG, S., MA, C., 2005b. **An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface by use of an anti-frosting paint. PartII. Long-term performance, frost layer observation and mechanism analysis.** International Journal of Refrigeration, USA, Vol 29, pp. 237 – 242.
- LIU, Z., WANG, H., ZHANG, X., MENG, S., CHENG, S., 2006. **Influences of surface hydrophilicity on frost formation on a vertical cold plate under natural convection conditions.** Experimental Thermal and Fluid Science, USA.
- LE GALL, R, GRILLOT, J. M., 1996, **Modeling of frost growth and densification.** International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40, No. 13, pp. 3177-3187.
- NA, B., WEBB, R., 2003. **A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation.** International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 3797 – 3808.
- NA, B., WEBB, R., 2004a. **New model for frost growth rate.** International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp 925 – 936.
- NA, B., WEBB, R., 2004b. **Mass transfer on and within a frost layer.** International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp 899 – 911.

- NBR ISO 4287, 2002, **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, BR.
- NIKON INSTRUMENTS INC., 2007, **NIS Elements Basic Reseach**, Nikon Inc., Melville, USA.
- O'NEAL, D.L., 1982, **The effects of frost formation on the performance of a parallel plate heat exchanger**. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- SAMI, S. M., DUONG, T., 1989. **Mass and heat transfer during frost growth**. ASHRAE Transactions, USA, Winter Meeting, pp. 158–165.
- TAO, Y. X., BESANT, R.W., MAO, Y., 1993. **Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period**. ASHRAE Transactions: Symposia, CH-93-2-2, pp. 746-753.
- TAYLOR, W., 2006. **Talysurf Intra Contour Analysis Software**. Taylor-Hobson Development Center, Leicester, England.
- VOLMER, M., FLOOD, H., 1934, Z. Phys. Chem. A, 170, 273.
- WILCOX, C.D., DOVE, S.B., MCDAVID, W D., GREER, D.B., 2002, **UTHSCSA Image tool**. Diagnostic Science at The University of Texas Health Science Center, San Antonio, TX, USA.
- WU, Y., KOUNO, M., SAITO, N., NAE, F.A., INOUE, Y., TAKAI, O., 2006, **Patterned hydrophobic–hydrophilic templates made from microwave-plasma enhanced chemical vapor deposited thin films**. Thin Solid Films.
- YAMAKAWA, N., TAKAHASHI, N., OHTANI, S., 1972, **Forced convection heat and mass transfer under frost condition**. Heat transfer Japanese Research, 1, pp. 1 – 10.

APÊNDICE I - INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

As incertezas de medição da espessura e da densidade da geada podem ser divididas em diretas e operacionais. As últimas existem em função dos erros induzidos pelas condições de operação do aparato experimental sobre o crescimento e o adensamento da geada. As incertezas diretas são funções dos equipamentos de medição da espessura e da massa da geada, bem como da área da superfície de teste.

A espessura da geada ao longo do tempo é medida através de um software de tratamento de imagens, calibrado através de uma escala analógica com divisões de 10µm, cuja incerteza de medição corresponde à metade da menor divisão de escala, MDE. A massa é medida através de uma balança digital com incerteza de medição, Δm , de $\pm 0,02g$. As incertezas de medição das condições de operação do aparato experimental e as demais incertezas de medição estão relacionadas na tabela I.1.

Tabela I.1 – Incertezas operacionais de medição.

MDE	ΔT_p	ΔT_∞	ΔV_∞	$\Delta \Phi$	ΔT_s	Δm	ΔA
[mm]	[°C]	[°C]	[m/s]	[%]	[°C]	[g]	[mm²]
0,01	0,2	0,2	0,1	1,0	1,0	0,02	0,06

A nucleação da geada é uma função direta do ângulo de contato, da rugosidade e do grau de super-resfriamento da superfície, que é resultado de um cálculo que envolve a temperatura da superfície, a temperatura do ar e a umidade relativa. Somando-se as parcelas de erro de cada variável, a incerteza de medição do grau de super-resfriamento é determinada da seguinte forma,

$$I_{\Delta T_{sup}}^2 = \left(\Delta T_p \frac{\partial(\Delta T_{sup})}{\partial T_p} \right)^2 + \left(\Delta T_\infty \frac{\partial(\Delta T_{sup})}{\partial T_\infty} \right)^2 + \left(\Delta \Phi \frac{\partial(\Delta T_{sup})}{\partial \Phi} \right)^2 \quad (I.1)$$

A tabela I.2 mostra o efeito das parcelas de erro operacional sobre o grau de super-resfriamento, e o valor absoluto da incerteza de medição para esta variável.

Tabela I.2 – Incertezas de medição do grau de superresfriamento.

$\partial(\Delta T_{sup})/\partial T_p$	$\partial(\Delta T_{sup})/\partial T_\infty$	$\partial(\Delta T_{sup})/\partial \Phi$	$I_{\Delta T_{sup}}$
[°C/°C]	[°C/°C]	[°C/%]	[°C]
1,0	0,2	0,3	0,5

A incerteza operacional da espessura da camada de geada, engloba as incertezas de medição das temperaturas do ar e do substrato, da umidade relativa e da velocidade do ar, podendo ser expressa da seguinte forma,

$$I_{o,x}^2 = \left(\Delta T_p \frac{\partial x_s}{\partial T_p} \right)^2 + \left(\Delta T_\infty \frac{\partial x_s}{\partial T_\infty} \right)^2 + \left(\Delta \Phi \frac{\partial x_s}{\partial \Phi} \right)^2 + \left(\Delta V_\infty \frac{\partial x_s}{\partial V_\infty} \right)^2 \quad (I.2)$$

A incerteza operacional da densidade da geada é determinada através da seguinte equação,

$$I_{o,\rho}^2 = \left(\Delta T_p \frac{\partial \rho_g}{\partial T_p} \right)^2 + \left(\Delta T_\infty \frac{\partial \rho_g}{\partial T_\infty} \right)^2 + \left(\Delta \Phi \frac{\partial \rho_g}{\partial \Phi} \right)^2 + \left(\Delta V_\infty \frac{\partial \rho_g}{\partial V_\infty} \right)^2 \quad (I.3)$$

Convém observar que a incerteza operacional varia com os valores da espessura e da densidade e, portanto, não há um valor absoluto para ela. Considerando-se as parcelas diretas e operacionais, a incerteza de medição propagada da espessura é determinada da seguinte forma,

$$I_x^2 = \left(\frac{\text{MDE}}{2} \right)^2 + I_{o,x}^2 \quad (I.4)$$

A tabela I.3 mostra as incertezas absolutas e relativas, para alguns valores de espessura. Convém observar que a incerteza relativa aumenta para espessuras menores e diminui para espessuras maiores.

Tabela I.3 – Incertezas propagadas de medição da espessura.

Espessura	$\partial x/\partial T_p$	$\partial x/\partial T_\infty$	$\partial x/\partial V$	$\partial x/\partial \Phi$	I_x	I_x
[mm]	[mm/°C]	[mm/°C]	[mm/m/s]	[mm/%]	[mm]	[%]
0,1	-0,02	0,006	0,06	0,001	0,009	8,74
1,0	-0,10	0,015	0,07	0,005	0,023	2,25
2,0	-0,13	0,005	-0,12	0,007	0,030	1,50
3,0	-0,15	-0,015	-0,32	0,008	0,045	1,50

De forma semelhante, determina-se a incerteza de medição da densidade da geada,

$$I_{\rho,m}^2 = \left(\Delta m \frac{\partial \rho_{g,m}}{\partial m} \right)^2 + \left(\Delta A \frac{\partial \rho_{g,m}}{\partial A} \right)^2 + \left(\Delta x_s \frac{\partial \rho_{g,m}}{\partial x_s} \right)^2 + I_{o,\rho}^2 \quad (I.5)$$

A tabela I.4 apresenta as incertezas absolutas e relativas, determinadas para alguns valores de densidade. Diferentemente da espessura, a incerteza total de medição da densidade é praticamente constante para diferentes valores de densidade.

Tabela I.4 – Incertezas propagadas de medição da densidade.

Densidade	$\partial\rho_{g,m}/\partial T_p$	$\partial\rho_{g,m}/\partial T_\infty$	$\partial\rho_{g,m}/\partial V$	$\partial\rho_{g,m}/\partial \emptyset$	$\partial\rho_{g,m}/\partial m$	$I_{\rho,m}$	$I_{\rho,m}$
[kg/m ³]	[kg/m ³ /°C]	[kg/m ³ /°C]	[kg/m ³ /m/s]	[kg/m ³ /‰]	[kg/m ³ /g]	[kg/m ³]	[%]
90,0	19,4	0,1	0,2	0,01	35,2	3,9	4,4
120,0	17,0	4,0	31,0	0,6	0,2	4,7	3,9
150,0	16,5	7,5	52,0	1,1	0,1	6,4	4,3
180,0	16,5	10,5	70,0	1,6	0,1	8,2	4,5
210,0	16,0	13,0	85,0	2,0	0,1	9,7	4,6