

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

FELIPE MERCÊS BIGLIA

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA MINIMIZAÇÃO DA
FORMAÇÃO DE GELO POROSO EM PLACAS PLANAS**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2018

FELIPE MERCÊS BIGLIA

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA MINIMIZAÇÃO DA
FORMAÇÃO DE GELO POROSO EM PLACAS PLANAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Ponta Grossa.

Área de Concentração: Térmica e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves*

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. *Raquel da Cunha Ribeiro da Silva*

PONTA GROSSA

2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa
n.47/18

B593 Biglia, Felipe Mercês

Análise numérico-experimental da minimização da formação de gelo poroso em
placas planas. / Felipe Mercês Biglia. 2018.
111 f.; il. 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Coorientadora: Profa. Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa,
2018.

1. Análise numérica. 2. Gelo. 3. Superfícies (Tecnologia). 4. Refrigeração. I. Alves,
Thiago Antonini. II. Silva, Raquel da Cunha Ribeiro da. III. Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 620.1



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 21/2018

“ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DA MINIMIZAÇÃO DA
FORMAÇÃO DE GELO POROSO EM PLACAS PLANAS”

Por

Felipe Mercês Biglia

Esta dissertação foi apresentada às **9 horas de 24 de agosto de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Térmica e Fluidos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof^a. Dr^a. Fátima Aparecida de Moraes
Lino (FEM - Unicamp)

Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail
(FEM - Unicamp)

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
(DAMEC - UTFPR)

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
(DAMEC - UTFPR) - Orientador



Visto do Coordenador:

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Coordenador do PPGEM
UTFPR - Câmpus Ponta Grossa

- A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NA SECRETARIA
ACADÊMICA -

Dedico este Trabalho aos meus pais Francisco e Rosana, à minha irmã Francine e à minha avó Leni (*in memorian*).

AGRADECIMENTOS

A seção de agradecimentos no início de um trabalho científico não é uma mera formalidade ou exibicionismo, mas, sim, a oportunidade que o autor tem de mencionar e manifestar o devido reconhecimento a pessoas e entidades que de forma direta ou indireta foram indispensáveis para à realização desta obra. Desejo, assim, destacar:

Inicialmente à DEUS, o glorioso Pai, que tem todo o poder e autoridade, e que por vossa infinita graça, concedeu-me a vida, espírito de sabedoria e os meios para realização desta Dissertação. Ao Senhor JESUS CRISTO, filho de Deus, nosso salvador.

Aos meus pais, FRANCISCO ELIAS BIGLIA e ROSANA APARECIDA RABELO BIGLIA, pelo exemplo, amparo e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador e professor THIAGO ANTONINI ALVES, pelo empenho, paciência, exemplo, amizade, confiança e constante disposição em ajudar e proporcionar os meios para realização desta pesquisa.

À minha coorientadora RAQUEL DA CUNHA RIBEIRO DA SILVA, por todo auxílio, companheirismo, confiança e incentivo, que tornaram possível à elaboração deste trabalho.

Aos mestrandos GUILHERME ANTONIO BARTMEYER, GUSTAVO SILVA RODRIGUES e LUÍS VITÓRIO GULINELI FACHINI, por compartilharem seus conhecimentos a respeito do tema.

Aos colegas de mestrado, em especial, aos que optaram pela área de concentração “Térmica e Fluidos”: ADRIANO KOSSOSKI, DOUGLAS PEREIRA VASCONCELLOS, FERNANDA DE OLIVEIRA, GABRIEL NUNES MAIA JUNIOR, LARISSA KRAMBECK, MARCELO CORREA MACHADO FILHO, VICTOR CAMILO LEVARTOSKI, VIVIAN MACHADO e WAGNER BARTH LENZ.

Aos prezados professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica que fizeram parte de minha formação profissional: ANDERSON GERALDO MARENDÁ PUKASIEWICZ, ÂNGELO MARCELO TUSSET, IVANIR LUIZ DE OLIVEIRA, GERSON HENRIQUE DOS SANTOS, LUIZ EDUARDO MELO LIMA, JHON JAIRO RAMIREZ BEHAINNE, THIAGO ANTONINI ALVES e YARA DE SOUZA TADANO.

Ao Senhor JOSÉ LUÍS SCHAMNE por todo apoio e auxílio prestados ao decorrer do curso.

Ao Professor ROMEU MIQUEIAS SZMOSKI pelas dicas e conselhos referentes a utilização de *softwares Open-Source*.

Ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela oportunidade.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

OBRIGADO!

“ O temor do Senhor é o princípio do conhecimento; os loucos desprezam a sabedoria e a instrução. ”

Provérbios 1:7

RESUMO

BIGLIA, Felipe Mercês. **Análise numérico-experimental da minimização da formação de gelo poroso em placas planas**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

O presente trabalho compreende uma análise numérico-experimental do processo de formação de gelo poroso em placas planas com diferentes tratamentos superficiais. Tal fenômeno ocorre quando o escoamento da mistura ar e vapor d'água entra em contato com superfícies que apresentam temperaturas inferiores a 0°C, presentes em diversas aplicações comerciais e industriais que atingem baixas temperaturas, passando diretamente para o estado sólido (mudança de fase por ressublimação), dando origem a uma estrutura porosa, estruturada por cristais irregulares de gelo. Seu acúmulo implica no aumento da demanda energética e diminuição no desempenho de diversos equipamentos envolvidos no processo de refrigeração, reduzindo sua eficiência e tornando necessária sua retirada periódica, resultando em gastos. Neste contexto, foi desenvolvido um aparato experimental de baixo custo, possibilitando uma análise experimental do fenômeno em estudo. As condições ambientais avaliadas são a temperatura da superfície fria, temperatura ambiente, umidade e velocidade do ar. O material das superfícies em estudo são o alumínio, cobre e latão com diferentes acabamentos superficiais, designados como superfície: lisa, ranhurada (hidrofílica) e envernizada (hidrofóbica). A análise numérico-experimental demonstra medições e simulações da espessura, temperatura superficial e velocidade de deposição da camada de gelo poroso em função do tempo transcorrido. Os resultados numéricos tiveram boa concordância com os resultados experimentais, indicando que a superfície envernizada, com características hidrofóbicas, apresenta maior dificuldade em prover o fenômeno.

Palavras-chave: Gelo poroso. Minimização de gelo poroso. Acabamento superficial. Superfície hidrofóbica.

ABSTRACT

BIGLIA, Felipe Mercês. **Numerical-experimental analysis of the minimizing frost formation on flat plates**. 2018. 111 p. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology - Paraná, Ponta Grossa, 2018.

This Master's Dissertation comprises a numerical-experimental analysis of frost formation on flat plates with different surface treatments. This phenomenon occurs when the flow of the air and water vapour mixture comes into contact with surfaces that have temperatures below 0°C, present in several commercial and industrial applications that reach low temperatures, going directly to the solid state (phase transition by resublimation), giving rise to a porous structure, organized by irregular crystals of ice. It's accumulation implies in the increase of energy demand and decrease in the performance of several equipment involved in the refrigeration process, reducing your efficiency and making necessary a periodic withdrawal, resulting in expenses. In this context, an experimental apparatus of low cost was developed, allowing an experimental analysis of the phenomenon under study. The environmental conditions evaluated are the plate surface temperature, ambient temperature, humidity and air velocity. The material of the surfaces under study are aluminum, copper and brass with different surface finishes, designated as: smooth, grooved (hydrophilic) and varnished (hydrophobic). The numerical-experimental analysis demonstrates measurements and simulations of the thickness, surface temperature and deposition velocity of the frost by elapsed time. The numerical results had good agreement with the experimental results, indicating that the varnished surface, with hydrophobic characteristics, presents greater difficulty in providing the phenomenon.

Keywords: Frost. Frost minimization. Surface finish. Hydrophobic surface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferença visual entre (a) gelo poroso e (b) gelo.....	22
Figura 2 - Diagrama de fase da água	23
Figura 3 - Escoamento em um meio poroso aleatório	24
Figura 4 - Tortuosidade através de um meio	24
Figura 5 - Estágios de formação do gelo poroso	25
Figura 6 - Diferentes geometrias de cristais de gelo	27
Figura 7 - Crescimento dos cristais de gelo para diferentes ângulos de contato	29
Figura 8 - Formação de gelo poroso de acordo com o tratamento superficial	32
Figura 9 - Processo de formação das camadas de gelo poroso.....	34
Figura 10 - Modelo unitário do crescimento do cristal de gelo.....	35
Figura 11 - Elemento de volume utilizado no modelo	42
Figura 12 - Fatores F e F_s	49
Figura 13 - Fluxograma do algoritmo de solução do primeiro estágio de formação de gelo poroso	58
Figura 14 - Fluxograma do algoritmo de solução do segundo estágio de formação de gelo poroso	59
Figura 15 - Aparato experimental proposto e obtido.....	61
Figura 16 - Esquematização do aparato experimental.....	62
Figura 17 - Placas utilizadas.....	66
Figura 18 - Espessura da camada de gelo poroso vs. tempo	69
Figura 19 - Crescimento da camada de gelo poroso.....	71
Figura 20 - Projeto base da <i>PCB</i> do sistema de controle e aquisição de dados.....	105

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Aparato Experimental.....	60
Fotografia 2 - Pastilha <i>Peltier</i>	61
Fotografia 3 - Sistema de controle e aquisição de dados.....	62
Fotografia 4 - Dupla Politriz Lixadeira Metalográfica.....	64
Fotografia 5 - Fresamento realizado para obtenção das ranhuras	65
Fotografia 6 - Banho ultrassônico	65
Fotografia 7 - Calibrador <i>Multical 2500</i>	67
Fotografia 8 - Equipamentos utilizados para aquisição de dados.....	67
Fotografia 9 - Sensor <i>DHT22</i>	67
Fotografia 10 - Anemômetro Digital ITAN 720	68
Fotografia 11 - Processo de medição da espessura da camada de gelo poroso	68
Fotografia 12 - Termômetro Infravermelho <i>MinipaTM MT-300</i>	69
Fotografia 13 - (a) <i>LPKFTM ProtoMat S63</i> , (b) Confeção da <i>PCB</i>	105

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação experimental da espessura da camada de gelo poroso - I.....	72
Gráfico 2 - Variação experimental da temperatura da superfície de gelo poroso - I.....	73
Gráfico 3 - Variação experimental da velocidade de deposição - I.....	74
Gráfico 4 - Variação experimental da espessura da camada de gelo poroso - II.....	75
Gráfico 5 - Variação experimental da temperatura da superfície de gelo poroso - II.....	75
Gráfico 6 - Variação experimental da velocidade de deposição - II.....	76
Gráfico 7 - Variação experimental da espessura da camada de gelo poroso -III.....	77
Gráfico 8 - Variação experimental da temperatura da superfície de gelo poroso - III.....	78
Gráfico 9 - Variação experimental da velocidade de deposição - III.....	78
Gráfico 10 - Placas de alumínio.....	79
Gráfico 11 - Placas de cobre.....	79
Gráfico 12 - Placas de latão.....	79
Gráfico 13 - Placa de Alumínio variando T_c	81
Gráfico 14 - Placa de Cobre variando T_c	81
Gráfico 15 - Placa de Latão variando T_c	81
Gráfico 16 - Placa de Alumínio variando T_∞	82
Gráfico 17 - Placa de Cobre variando T_∞	82
Gráfico 18 - Placa de Latão variando T_∞	82
Gráfico 19 - Placa de Alumínio variando v_∞	83
Gráfico 20 - Placa de Cobre variando v_∞	83
Gráfico 21 - Placa de Latão variando v_∞	83
Gráfico 22 - Placa de Alumínio variando \emptyset	84
Gráfico 23 - Placa de Cobre variando \emptyset	84
Gráfico 24 - Placa de Latão variando \emptyset	85
Gráfico 25 - Extrapolação da condutividade térmica efetiva da superfície envernizada (III)..	85
Gráfico 26 - Superfície envernizada variando T_c	86
Gráfico 27 - Superfície envernizada variando T_∞	86
Gráfico 28 - Superfície envernizada variando v_∞	87
Gráfico 29 - Superfície envernizada variando \emptyset	87
Gráfico 30 - Análise numérica e experimental da formação de gelo poroso nas superfícies testadas.....	88
Gráfico 31 - Análise numérico-experimental: Alumínio (I).....	89
Gráfico 32 - Análise numérico-experimental: Cobre (amostra I).....	89
Gráfico 33 - Análise numérico-experimental: Latão (amostra I).....	90
Gráfico 34 - Análise numérico-experimental: Envernizada (amostra III).....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de condutividade térmica e massa específica do gelo e do gelo poroso	23
Tabela 2 - Parâmetros envolvidos na formação de gelo poroso e no estágio de nucleação	28
Tabela 3 - Valores de condutividade térmica dos materiais utilizados	63
Tabela 4 - Relação das amostras e respectivos tratamentos superficiais.....	65
Tabela 5 - Incertezas de medição	70
Tabela 6 - Parâmetros Ambientais - Placa Lisa (I).....	72
Tabela 7 - Parâmetros Ambientais - Placa Ranhurada (II)	75
Tabela 8 - Parâmetros Ambientais - Placa Envernizada (III).....	77
Tabela 9 - Parâmetros ambientais utilizados na análise numérica	80
Tabela 10 - Dados de extrapolação da condutividade térmica efetiva da superfície envernizada (III)	86
Tabela 11 - Resumo dos componentes utilizados.....	106

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área de contato dos embriões com a superfície	[mm ²]
Bi	Número de Biot	[-]
Bim	Número de Biot referente a transferência mássica	[-]
c_p	Calor específico a pressão constante	[J/(kgK)]
c_1, \dots, c_7	Constantes empíricas	[-]
D	Coefficiente de difusão do vapor d'água no ar	[m ² /s]
Dn	Comprimento do núcleo	[m]
F	Fator de Difusão	[-]
Fo	Número de Fourier	[-]
G	Energia livre de Gibbs	[J]
h_c	Coefficiente convectivo - transferência de calor	[W/(m ² K)]
h_m	Coefficiente convectivo - transferência de massa	[m/s]
h_{sg}	Entalpia de sublimação	[kJ/mol]
Ja	Número de Jacob	[-]
k	Condutividade Térmica	[W/(mK)]
ℓ	Comprimento (espaçamento) entre os núcleos	[m]
Le	Número de Lewis	[-]
\dot{m}	Taxa de mudança de fase do vapor de água	[-]
Nu	Número de Nusselt	[-]
P	Pressão	[Pa]
q	Fluxo de calor	[W/m ²]
r	Fator de relaxação	[-]
R_a	Constante dos gases para o ar seco	[J/(kgK)]
Re_x	Número de Reynolds	[-]
R_v	Constante dos gases para o vapor	[J/(kgK)]
Sh_x	Número de Sherwood	[-]
T	Temperatura	[K] ou [°C]

t	Tempo	[s]
u, v	Velocidade do ar	[m/s]
V_G	Volume de água na gotícula	[mm ³]
w	Umidade absoluta do ar	[kg _{água} /kg _{arseco}]
x	Coordenada cartesiana na direção paralela ao fluxo de ar	[m]
z	Coordenada cartesiana na direção normal à placa plana	[m]

Letras Gregas

α	Difusividade térmica	[m ² /s]
γ	Energia de superfície	[J/m ²]
δ	Espessura (altura) do gelo	[mm]
ε	Porosidade - Fração Volumétrica	[-]
θ	Ângulo de contato de superfície	[°]
μ	Viscosidade Dinâmica	[Pa.s]
ρ	Massa Específica	[kg/m ³]
σ	Energia Interfacial	[kJ/m ²]
φ	Termo Fonte	[J]
∂	Derivada parcial	[-]
λ	Fator referente à turbulência do escoamento	[-]
τ	Tortuosidade	[-]
ν	Viscosidade Cinemática	[m ² /s]
\emptyset	Umidade relativa do ar	[%]

Subscritos

ar	ar
β	fase Sólida
c	frio
$conv$	convecção
dz	diferencial da coordenada no eixo normal a placa plana
γ	fase Gás

f	gelo poroso (<i>frost</i>)
S	superfície da camada de gelo poroso
tp	ponto triplo
tr	tempo de transição
z	coordenada no eixo vertical a placa plana
o	referencial inicial
∞	ambiente (ar)

Superescritos

\cdot	Taxa
$*$	Dimensional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 MOTIVAÇÃO.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 FENÔMENO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO	22
2.2 ESTÁGIOS DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO	24
2.3 TIPOS DE CRISTAIS DE GELO	26
2.4 PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DE GELO POROSO	27
2.5 MINIMIZAÇÃO DA CAMADA DE GELO POROSO	30
3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	33
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO	33
3.2 MODELAGEM DO PRIMEIRO ESTÁGIO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO.....	35
3.2.1 Equações Governantes	35
3.2.2 Equações de acoplamento entre os dois estágios	40
3.3 MODELAMENTO DO SEGUNDO ESTÁGIO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO.....	41
3.3.1 Equações Governantes	42
3.3.2 Equações Governantes Dimensionais	42
3.3.3 Equações Governantes Adimensionais	44
3.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES.....	47
4 ANÁLISE NUMÉRICA	53
4.1 ANÁLISE NUMÉRICA DO PRIMEIRO ESTÁGIO.....	53
4.1.1 Discretização das Equações Governantes do Primeiro Estágio	53
4.2 ANÁLISE NUMÉRICA DO SEGUNDO ESTÁGIO.....	54
4.2.1 Discretização das Equações Governantes do Segundo Estágio	55
4.3 FLUXOGRAMAS DOS ALGORITMOS DE RESOLUÇÃO	58
5 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	60
5.1 APARATO EXPERIMENTAL.....	60
5.1.1 Procedimento Experimental	62
5.2 SUPERFÍCIES DE TESTE	63
5.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	66
5.3.1 Medição dos parâmetros ambientais	66

5.3.2 Medição da espessura da camada de gelo poroso	68
5.3.3 Medição da temperatura da camada de gelo poroso	69
5.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS	70
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	71
6.1.1 Placa Lisa	72
6.1.2 Placa Ranhurada.....	74
6.1.3 Placa Envernizada	76
6.1.4 Comparativo dos resultados experimentais.....	78
6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS	80
6.3 ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL.....	87
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
7.1 CONCLUSÕES.....	91
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
REFERÊNCIAS	93
APÊNDICE A - DESENHOS TÉCNICOS: SEÇÃO DE TESTES.....	97
APÊNDICE B - SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS	104
APÊNDICE C - DESENHO TÉCNICO: PLACA RANHURADA	107
APÊNDICE D - CÁLCULO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.....	109

1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos utilizados nos mais diversos tipos de segmentos de refrigeração, seja comercial ou industrial, trabalham com temperaturas de evaporação próximas a -10°C , favorecendo a geração e o acúmulo de gelo poroso (*frost*) sobre a superfície dos dispositivos utilizados no processo de resfriamento (SILVA, 2012).

A formação de gelo poroso é um fenômeno físico que ocorre quando o fluxo da mistura formada por ar e vapor de água entra em contato com superfícies que apresentam temperaturas abaixo de 0°C . Exemplos de aplicações onde ocorrem esse fenômeno são asas de aviões, evaporadores de sistemas de refrigeração, rotores de compressores, transferência e armazenamento de líquidos criogênicos e muitos outros (SILVA, 2014).

Em sistemas de refrigeração o acúmulo de gelo resulta no aumento da demanda energética do sistema, por isso tornando-se necessária sua retirada periódica. O processo de degelo ou *defrost* gera gastos, além disso, se feito de maneira inadequada pode resultar em danos aos produtos nele armazenados (SILVA, 2005).

No caso de evaporadores, cuja função é transferir o calor do ambiente refrigerado para o fluido refrigerante em circulação para manter a temperatura desejada, em algumas situações a camada de gelo poroso aumenta tanto, ao ponto de bloquear completamente o fluxo de ar no equipamento (LIU et al., 2007). Logo, evitar o acúmulo de gelo na superfície é essencial para o bom funcionamento do sistema

De acordo com Lee e Ro (2001), a camada de gelo poroso atua, inicialmente, como uma aleta, melhorando a condução de calor. Simultaneamente, o crescimento da camada de gelo poroso aumenta a resistência térmica provocando a redução da taxa de transferência de calor, aumentando o consumo energético.

Portanto, é de suma importância sua retirada periódica, que em geral, se dá por meio de três métodos de degelo (FISCHER et al., 1994):

- i) Desligamento do Sistema de Refrigeração: consiste em desligar o sistema de refrigeração até retirar o gelo formado, por equilíbrio termodinâmico.
- ii) Aquecimento Elétrico: aquecedores elétricos são instalados na entrada do evaporador aquecendo o ar circulante, fundindo o gelo. Este método é considerado como um dos métodos mais efetivos de degelo, embora tenha um consumo de energia extremamente alto.
- iii) Circulação de Gás Quente: desvia-se uma pequena quantidade de gás da descarga dos compressores e faz-se atravessar gás quente por uma serpentina do evaporador,

aquecendo-o. Este método pode remover o gelo com velocidade maior dentre os acima citados, porém, é o mais caro, devido à grande demanda de tubulações e sistemas de controle em seu gerenciamento.

Para realizar a avaliação completa do crescimento de gelo poroso é necessário a utilização de modelos a partir de equações que governam os fenômenos de transferência de calor e massa, aliados aos fatores operacionais e geométricos envolvidos no processo, obtendo assim, resultados e estimativas mais coerentes (SILVA, 2014).

1.1 MOTIVAÇÃO

Evitar a formação e acúmulo de gelo na superfície dos equipamentos utilizados em sistemas de refrigeração é essencial para se obter um bom desempenho, possibilitando assim o bom funcionamento do conjunto.

Atualmente, a exigência referente a utilização racional e eficiente das fontes de energias vem aumentando, principalmente, por intermédio de ações feitas por programas governamentais de eficiência e pelo estímulo gerado pela aquisição de produtos com elevado desempenho (SILVA, 2012).

A formação de gelo poroso em superfícies frias em contato com ar úmido provoca a diminuição do desempenho em muitos equipamentos de refrigeração (diminuindo sua eficiência). Isso gera gastos energéticos desnecessários, danificando o equipamento de refrigeração e, em consequência, gera grandes prejuízos com as pertinentes paradas dos equipamentos para manutenção.

Para evitar o bloqueio do evaporador e a consequente perda da capacidade de funcionamento, o gelo deve ser removido de tempos em tempos, por meio de degelos periódicos, os quais impõem restrições ao sistema térmico.

O degelo contribui para o aumento da carga térmica, pelo fato que parte é usada para derreter o gelo e, outra parte entra no ambiente resfriado. Além disso, o sistema de degelo, normalmente instalado sobre o evaporador, gera um aumento na perda de carga em relação ao lado do ar.

Scalon (1993) indica que a perda de energia se dá por meio da transferência de calor, desviada para solidificar as gotículas de água presentes no ar úmido, e, em razão ao aumento da perda de carga nos evaporadores, devido à diminuição na área de fluxo provocada pelo aumento da espessura da camada de gelo que se acumula.

Tais fatores contribuem para um aumento no consumo de energia global do sistema de refrigeração, ou seja, o acúmulo de gelo poroso se mostra diretamente proporcional a diminuição no desempenho de diversos equipamentos envolvidos no processo de refrigeração, reduzindo sua eficiência e gerando gastos energéticos que poderiam ser evitados, além de danificá-los.

Portanto, a formação e acúmulo de gelo poroso resulta em prejuízos com paradas periódicas para remoção do gelo. Logo, o conhecimento sobre a formação de gelo poroso aliado ao entendimento de como minimizar ou evitar esse fenômeno pode ajudar no aumento da eficiência nos sistemas de refrigeração.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é realizar uma análise numérico-experimental do uso de revestimentos em superfícies planas para averiguar a minimização da formação da camada de gelo poroso.

Os objetivos específicos são:

- i) Instrumentar uma bancada de testes compacta e de baixo custo.
- ii) Monitorar o crescimento da camada de gelo poroso.
- iii) Validar os resultados numéricos, comparando-os com os experimentais.
- iv) Analisar qual dos revestimentos, dentre os testados, fornece a menor formação de gelo poroso.

1.3 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação está dividida em sete capítulos e quatro apêndices. Neste capítulo inicial, são apresentados a introdução, a motivação e os objetivos.

O Capítulo 2 contém o embasamento teórico referente à formação de gelo poroso (*frost*), como estágios de formação, tipos de cristais, parâmetros envolvidos e uma revisão da literatura técnica, a qual fornece uma perspectiva mais ampla do que já foi considerado em estudos anteriores.

O Capítulo 3 apresenta a formulação matemática do fenômeno de formação de gelo poroso em placas planas, com as equações que definem o primeiro e o segundo estágios, baseadas nos modelos desenvolvidos por Sedano (1996) e Tao et al. (1993).

No Capítulo 4 é mostrada a análise numérica, contendo a discretização realizada nas equações que modelam os dois estágios de formação de gelo poroso, de acordo com as características do tratamento numérico de fronteira móvel e de interpolação desenvolvida por Sedano (1996) e Silva (2014), para placas planas e cilindros com arranjo triangular, respectivamente.

O Capítulo 5 tem como objetivo expor a análise experimental, mostrando todos os equipamentos a serem utilizados, assim como o aparato experimental, os procedimentos e as análises realizadas.

Os resultados e discussões são mostrados no Capítulo 6, relativos a análise experimental, numérica e sua validação.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões desta pesquisa, sugestões para trabalhos futuros que se utilizem do aparato experimental desenvolvido nessa Dissertação.

Os apêndices A, B, C e D, têm documentos e informações referentes aos desenhos técnicos relativos ao aparato experimental (A), informações do projeto do sistema de controle e aquisição de dados (B), desenho técnico referente a placa ranhurada (C), e por fim, o cálculo das incertezas (D).

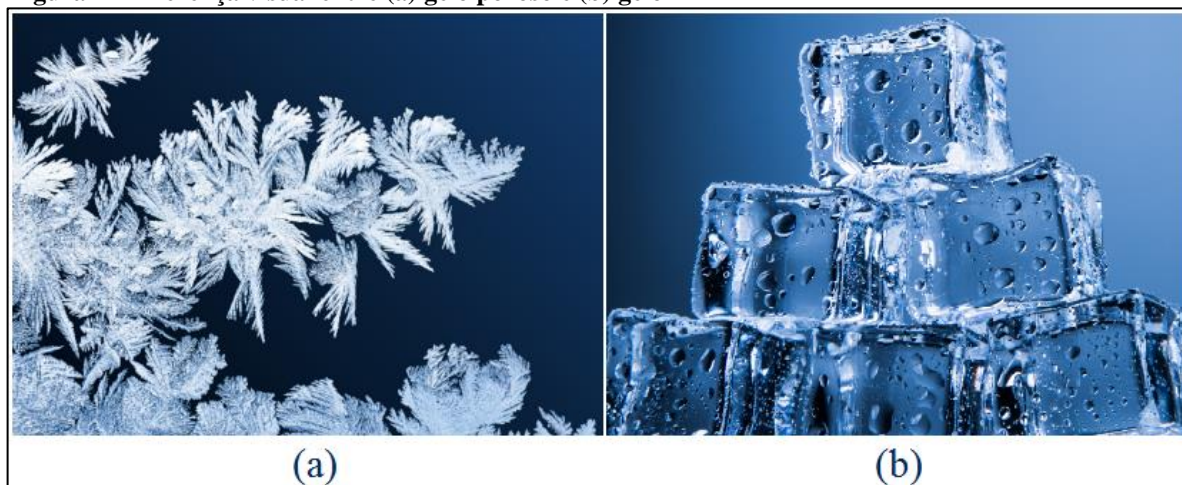
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este Capítulo contém o embasamento teórico referente à formação de gelo poroso (*frost*) e uma revisão dos trabalhos científicos presentes na literatura, que permitem uma visão crítica do Estado da Arte relacionado aos assuntos específicos desta pesquisa.

2.1 FENÔMENO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO

Os termos “gelo” e “gelo poroso” não se referem à mesma substância, possuindo diferentes estruturas e propriedades físicas. A diferença entre eles pode ser observada na Figura 1, na qual, ilustra os respectivos aspectos visuais do (a) gelo poroso e (b) gelo.

Figura 1 - Diferença visual entre (a) gelo poroso e (b) gelo

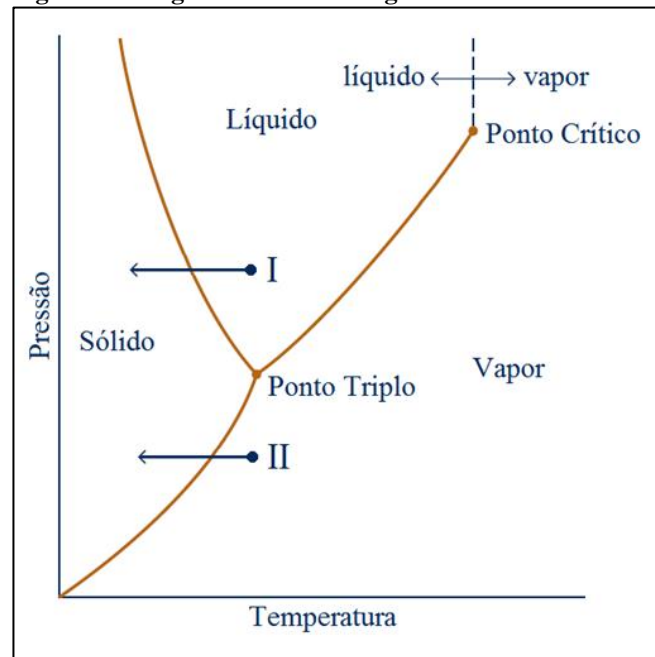


Fonte: (a) Adaptado de Koshkina (2017); (b) Adaptado de Hodan (2017).

Através da análise do diagrama de mudança de fase da água, ilustrado pela Figura 2, pode-se obter um melhor entendimento relativo a suas diferenças. O gelo pode ser definido como a fase sólida resultante do processo de mudança de fase representada pelo trajeto I, no qual, a água faz a transição direta do estado líquido para o estado sólido (solidificação).

O processo de mudança de fase indicado pelo trajeto II, na Figura 2, promove o fenômeno de formação de gelo poroso, onde por meio do processo de ressublimação, o vapor de água passa diretamente para o estado sólido, dando origem a uma estrutura porosa, estruturado por cristais irregulares de gelo.

Figura 2 - Diagrama de fase da água



Fonte: Adaptado de Moran et al. (2010).

Tal diferença provoca mudanças significativas nas propriedades do sólido resultante, uma vez que o gelo apresenta uma estrutura praticamente maciça. Enquanto o gelo poroso, uma estrutura porosa formada por cristais de gelo irregulares, tem normalmente estrutura dendrítica ou fractal, com pequenas bolsas de ar (PIUCCO, 2008).

O gelo e o gelo poroso, tem propriedades físicas diferentes, dentre as quais pode-se citar os valores da condutividade térmica (k) e massa específica (ρ), mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de condutividade térmica e massa específica do gelo e do gelo poroso

Grandeza	Gelo	Gelo Poroso
k [W / m . K]	2,1	0,2
ρ [kg / m ³]	917	211

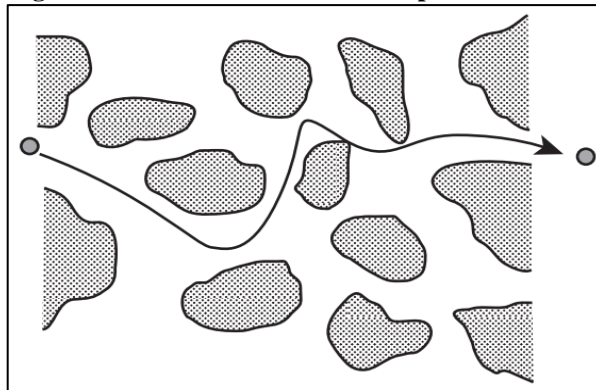
Fonte: Silva (2014).

A condutividade térmica do gelo é aproximadamente dez vezes superior que a do gelo poroso. Por outro lado, a densidade do gelo poroso equivale aproximadamente a um quinto a do gelo, ou seja, a massa de gelo poroso ocupa um volume maior para a mesma quantidade de massa de gelo, proporcionando uma redução drástica na área de passagem do ar em sistemas de refrigeração.

De acordo com as propriedades vistas na Tabela 1, os processos de transferência de calor e massa, na camada de gelo poroso, dependem diretamente de parâmetros como a porosidade (ϵ) e a tortuosidade (τ) do meio.

A porosidade pode ser definida como o parâmetro que representa a razão entre o volume de espaços, ditos “vazios”, e o volume total presentes em uma matriz sólida (meio). Como o escoamento de um fluido através de um meio poroso ocorre somente através dos poros interconectados, ilustrado pela Figura 3, define-se também a porosidade efetiva, que representa a razão entre o volume dos poros interconectados e o volume total da matriz sólida (SILVA, 2012). De acordo com Nascimento Junior (2013), ela se mostra proporcional a taxa de transferência de massa e calor.

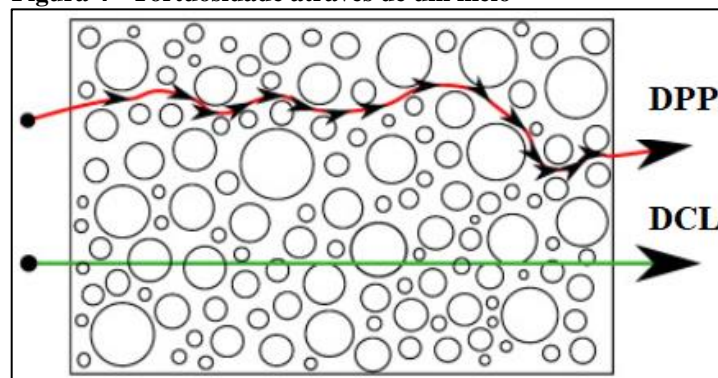
Figura 3 - Escoamento em um meio poroso aleatório



Fonte: Adaptado de Welty et al. (2008).

O parâmetro tortuosidade, ilustrado pela Figura 4, representa a razão entre a distância percorrida por uma partícula (DPP), no interior de um meio poroso, e a distância correspondente a uma linha reta (DCL) que une as extremidades desse mesmo caminho (SILVA, 2012).

Figura 4 - Tortuosidade através de um meio



Fonte: Adaptado de Brus et al. (2014).

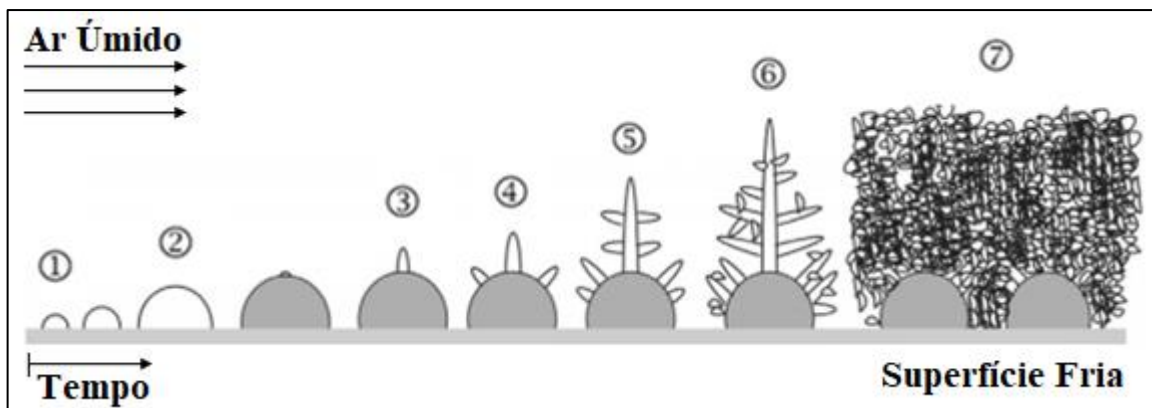
2.2 ESTÁGIOS DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO

O fenômeno de formação de gelo poroso é extremamente complexo, principalmente, devido a fatores como (SILVA, 2014):

- i) Movimento na fronteira da interface gelo-ar devido a formação das camadas de gelo poroso ao longo do tempo.
- ii) Variação na temperatura da superfície do gelo poroso em relação a sua camada.
- iii) Condições de escoamento variáveis com o aumento da espessura da camada de gelo poroso.
- iv) Propriedades transiente que variam tanto no espaço quanto no tempo de acordo com as condições do ar que está escoando ao seu redor.
- v) Transferência de calor e massa se envolvem simultaneamente durante o processo de formação do gelo poroso.

A Figura 5 ilustra o processo de formação de gelo poroso. O primeiro estágio de formação é conhecido como período de nucleação (estágio 1, Figura 5), no qual, um embrião (moléculas de vapor de água aglomeradas) atinge um grau de super resfriamento, necessário para que ocorra o processo de mudança de fase (PIUCCO, 2008).

Figura 5 - Estágios de formação do gelo poroso



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2018).

Em seguida, mais cristais de gelo se formam sobre estes núcleos (estágio 2, Figura 5), o embrião cresce por meio de adesão de novas moléculas, e durante seu crescimento, seu volume e área lateral aumentam, exigindo maior quantidade de energia para sustentar seu crescimento. Este estágio chega ao fim quando é formada uma fina camada de gelo poroso sobre a superfície de deposição (CHENG; SEKI, 1991).

De acordo com Piucco (2008), o embrião deixa de crescer no momento em que a quantidade de energia supera a energia de nucleação, resultando em uma nova nucleação sobre ele mesmo (estágio 3, Figura 5).

O novo embrião cresce (estágio 4, Figura 5), aumentando seu volume e sua área externa sucessivamente, assim, novas nucleações ocorrem sobre o embrião desenvolvido e este

estágio continua, originando novos cristais que vão se ramificando (estágios 5 e 6, Figura 5), formando uma camada porosa e uniforme devido às ramificações presentes nos cristais de gelo (PIUCCO, 2008).

A transferência de massa aumenta, à medida que os poros são preenchidos com ar úmido e a taxa de transferência de calor cai proporcionalmente a intensificação da deposição. Assim, a camada de gelo poroso se comportará como um isolante térmico, dificultando a transferência de calor neste meio (CHENG; SEKI, 1991).

Quando a temperatura da superfície de gelo poroso se aproxima da temperatura do ponto triplo da água, começa o estágio de crescimento intensivo. Nesta situação, o vapor de água não pode ser cristalizado, uma vez que a energia de superfície disponível não fornece novas ramificações, por isso, começa a se condensar sobre a camada de gelo poroso e, uma vez que se concentra sobre a camada, é absorvido pela estrutura porosa presente (CHENG; SEKI, 1991).

Posteriormente, esse vapor de água se congela formando uma camada de gelo (estágio 7, Figura 5). Esse congelamento do vapor causa um aumento drástico na densidade da camada e uma redução na resistência térmica (CHENG; SEKI, 1991). Neste último estágio, um processo cíclico de fusão, congelamento e crescimento, promoverá de forma acelerada o crescimento da camada de gelo poroso.

2.3 TIPOS DE CRISTAIS DE GELO

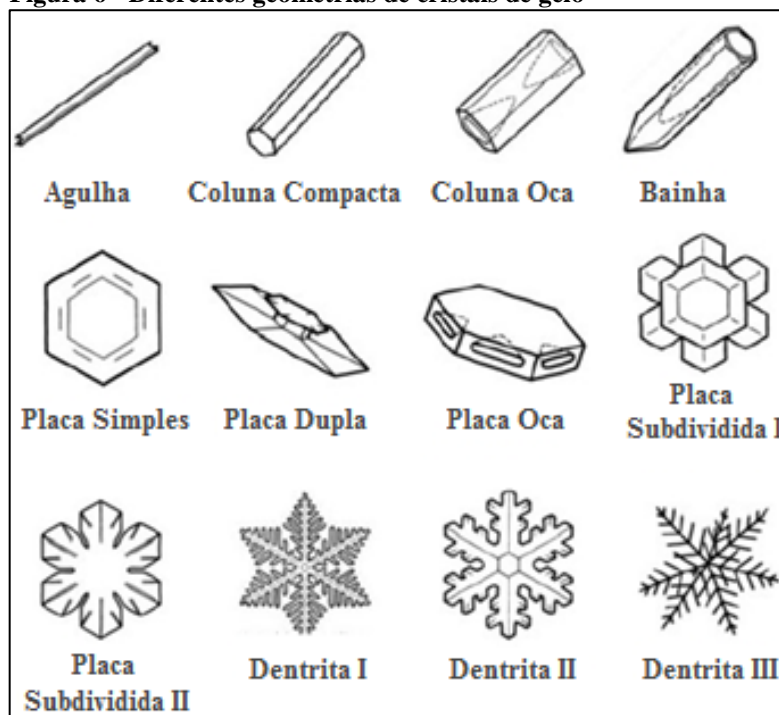
As fases de formação de gelo poroso (*frost*), no ponto de vista microscópico, consideram os vários parâmetros ambientais envolvidos nesse processo. Kobayashi (1958) indica que, a forma que o cristal de gelo irá assumir depende diretamente da temperatura do ambiente, sendo que, a densidade do vapor de água, impõe a direção preferencial de crescimento do cristal de gelo.

As principais geometrias de cristais de gelo podem ser visualizadas na Figura 6. De acordo com Kobayashi (1958), as possíveis formas que o cristal de gelo poroso pode assumir, dependem da temperatura de superfície.

Para uma temperatura ambiente acima de -4°C , a direção preferencial de nucleação será lateral e terá uma geometria em placa, ilustrada na Figura 6. Para o intervalo de temperaturas entre -10°C e -4°C e -20°C e -10°C , a direção preferencial de nucleação será vertical para ambos, porém, para o primeiro, a geometria do cristal será em bainha, agulha ou

colunas, e, para o segundo, em placas subdividida ou dentrita. Por fim, para temperaturas abaixo de -20°C , a direção preferencial de nucleação será lateral e, a forma do cristal será uma geometria em colunas ocas ou compactas.

Figura 6 - Diferentes geometrias de cristais de gelo



Fonte: Adaptado de Kobayashi (1958).

2.4 PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DE GELO POROSO

Na tentativa de entender o fenômeno de formação de gelo poroso, bem como a influência dos parâmetros envolvidos neste fenômeno, inúmeros estudos analíticos e experimentais foram realizados. Desta forma, a Tabela 2 apresenta os principais parâmetros envolvidos neste processo, assim como os relativos ao estágio de nucleação. Tais parâmetros são utilizados nos próximos capítulos.

Liu et al. (2008) acreditam que o processo de deposição de gelo surgiria com a condensação de vapor numa superfície fria, visto que, após a condensação há o congelamento, iniciando o processo de deposição, indicando que a transição de fase da água ocorrerá apenas se houver diminuição na energia livre de Gibbs no sistema. Caso o tamanho inicial da gotícula de água seja maior que seu raio crítico, a energia livre de Gibbs diminui à medida que ela cresce.

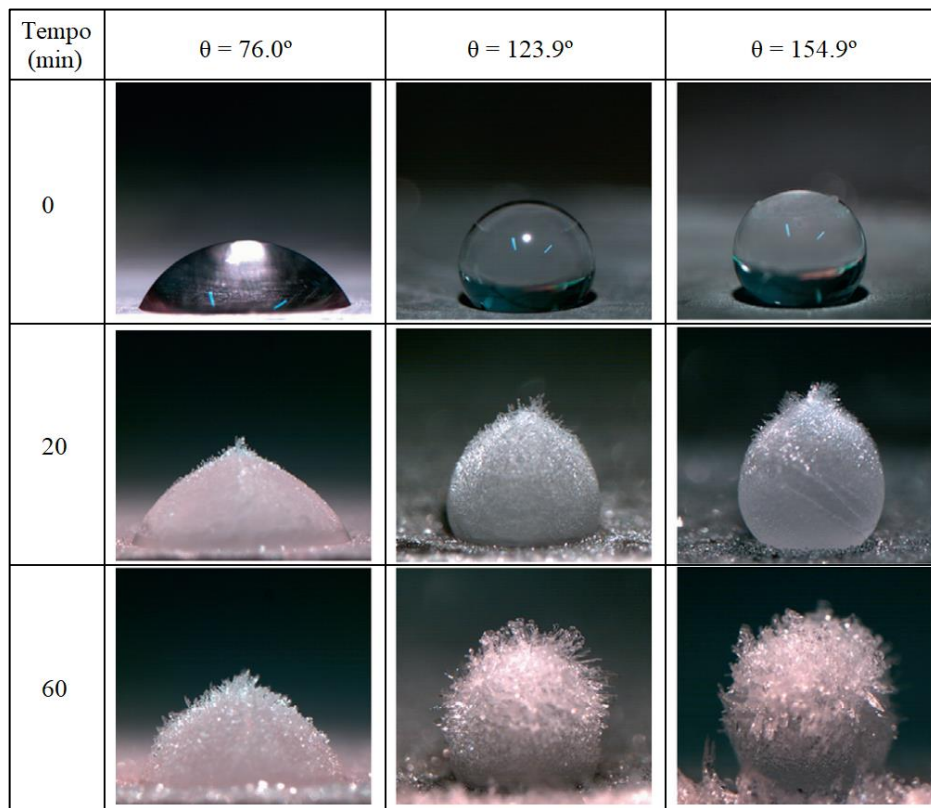
Huang et al. (2012) estudaram a influência do ângulo de contato no processo de congelamento de gotículas de água sobre superfície frias sob convecção natural. Verificou-se que ele afeta de forma efetiva na maneira como cresciam os cristais de gelo, bem como no

tempo de congelamento, sendo diretamente proporcionais, como visto na Figura 7. O ângulo de contato é um parâmetro macroscópico que determina a microestrutura que o gelo assumirá na camada porosa (WANG et al. 2016).

Tabela 2 - Parâmetros envolvidos na formação de gelo poroso e no estágio de nucleação

Processo	Símbolo	Descrição	Unidade
Formação	T_{∞}	Temperatura do ar	°C ou K
	T_c	Temperatura da superfície fria	°C ou K
	v_{∞}	Velocidade do ar	m/s
	ϕ	Umidade relativa do ar	%
	w_{∞}	Umidade absoluta do ar	kg _{água} /kg _{arseco}
	δ	Espessura do Cristal de Gelo	mm
	ε	Porosidade da camada de gelo	-
	θ	Ângulo de contato de superfície	°
	ρ	Massa específica do meio poroso	kg/m ³
Nucleação	A_c	Área de contato dos embriões com a superfície	mm ²
	V_G	Volume de água na gotícula	mm ³
	r_c	Raio crítico do embrião de gelo com a superfície	mm
	ttr_1	Tempo de espera até o início do congelamento dos embriões	s
	δ_f	Altura dos embriões de água	mm
	G	Energia livre de Gibbs	J
	γ	Energia de superfície	J/m ²
	σ	Energia interfacial	kJ/m ²

Fonte: Adaptado de Silva (2014).

Figura 7 - Crescimento dos cristais de gelo para diferentes ângulos de contato

Fonte: Adaptado de Huang et al. (2012).

O estudo realizado por Na e Webb (2003) propõem um novo entendimento em relação aos modelos de crescimento de gelo poroso publicados anteriormente, no qual, para que o processo de nucleação possa ocorrer, a mistura de ar úmido na superfície de gelo poroso deve ser supersaturada quando atinge a temperatura da superfície fria. Desta forma, as gotículas de água devem superar a barreira de energia de Gibbs, por meio da supersaturação da mudança de fase da água. A energia livre de Gibbs é afetado pela energia de superfície associada ao ângulo de contato, sendo diretamente proporcionais. Desta forma os autores sugerem a possibilidade do desenvolvimento de superfícies que retardam o processo de formação de gelo poroso, como revestimentos ou a própria rugosidade superficial que permitem alterar a energia de superfície.

Liu et al. (2007) concluíram em seus estudos que mudanças na energia de superfície da placa resfriada é uma viável maneira de alterar as propriedades do gelo poroso e modificar a formação dos cristais, podendo dar origem a camadas de gelo mais fracas ou soltas, facilmente removidas.

Conforme visto na investigação realizado por Na e Webb (2004), a taxa de transferência de massa do vapor de água é o parâmetro mais importante para modelar a formação de gelo poroso, pois, afeta diretamente a taxa de crescimento dos cristais de gelo.

Essa afirmação indiretamente relaciona-se ao trabalho de Liu et al. (2008), no qual, argumentam que o ângulo de contato afeta o tempo necessário para o início da fase de nucleação dos cristais.

Liu et al. (2016) estudaram experimentalmente a formação de gelo poroso sobre uma placa de cobre em temperaturas criogênicas, de cerca de -165°C . A realização de testes em temperaturas criogênicas, de acordo com os autores, se baseia no fato de que a maioria dos estudos realizados sobre a ocorrência desse fenômeno são com temperaturas negativas desprezíveis, ligeiramente inferiores a -10°C . Verificou-se que em temperaturas criogênicas, a formação de gelo poroso é intensificada aumentando a distância entre as gotículas de água na superfície de deposição, ocorrendo uma deposição do gelo desuniforme. Conseqüentemente, o trabalho deles evidencia o efeito da temperatura da superfície fria nesse fenômeno e deixa o questionamento se fatores ambientais como temperatura ambiente e umidade relativa do ar, quando alterados, também podem apresentar efeitos específicos sobre o comportamento da camada de gelo gerada.

2.5 MINIMIZAÇÃO DA CAMADA DE GELO POROSO

Nesta seção é apresentada uma revisão dos trabalhos científicos, presentes na literatura, que investigam técnicas para minimizar a formação de gelo poroso em superfícies frias.

Kinsara et al. (1997) investigaram a possível redução na formação de gelo poroso em evaporadores, desumidificando o ar, por meio de um sistema de desumidificação, usando uma substância higroscópica capaz de absorver água. Eles chegaram à conclusão de que o sistema sob investigação era de certa forma inviável, por apresentar elevado custo para aplicações de menor porte.

Cai et al. (2010) estudaram os efeitos da energia de superfície na mudança de fase do vapor de água no primeiro estágio do crescimento de gelo poroso, realizando testes em duas superfícies revestidas, por cobre e cera, respectivamente, com o objetivo de encontrar um método eficaz de restringir o crescimento das geadas. Os resultados indicam que o revestimento com cera restringe o crescimento da camada de gelo poroso, apresentando menor altura e densidade quando comparado à superfície revestida com cobre.

No esforço de constatar a influência de campos elétricos na formação dos cristais de gelo, diversos estudos foram realizados, conforme apresentado a seguir.

Ma e Peterson (1995) demonstraram que campos elétricos diminuem a pressão de saturação nos cristais na superfície da camada de gelo poroso, aumentando a força motriz de sublimação, reduzindo a espessura da camada de gelo poroso, tornando-o de fácil remoção.

Swanson e Libbrecht (2001) indicam que o campo elétrico possui influencia no caminho da difusão das moléculas de água na superfície da camada de gelo, atraídas na direção do campo elétrico aplicado. Assim, formam-se cristais de gelo finos e longos, quebrando por ação do próprio peso.

Wang et al. (2004) estudaram o efeito da polaridade do campo elétrico de corrente contínua sobre a formação de gelo poroso. Constatou-se que a mesma desempenha papel significativo no crescimento da camada de gelo, no caso de polaridades negativas, a espessura da camada de gelo poroso foi de 30% a 50% maior do que as com polaridade positiva.

Tudor e Ohadi (2006) investigaram o efeito de campos elétricos com corrente alternada de frequências fixas sobre o crescimento de gelo poroso. Verificou-se uma redução de até 46% na camada de gelo obtida quando a frequência fixada foi de 370 Hz a 7,5 kHz, enquanto a tensão aplicada era de 14,5 kV.

Zhang et al. (2016) examinaram se campos elétricos perpendiculares a superfície de deposição, poderiam influenciar a etapa de nucleação dos cristais de gelo. Os resultados mostraram que na presença de campos elétricos inferiores a 0,1 MV/m, a nucleação aumenta, independentemente da direção do campo, sem qualquer efeito direto dos campos elétricos na redução de formação de gelo poroso.

Outros estudos investigaram a aplicação de revestimentos feitos de substâncias hidrofóbicas (que não se dissolvem em água ou que a repelem) e substâncias hidrofílicas (que possuem afinidade com a água, sendo solúveis nela), como métodos para evitar a formação de gelo poroso.

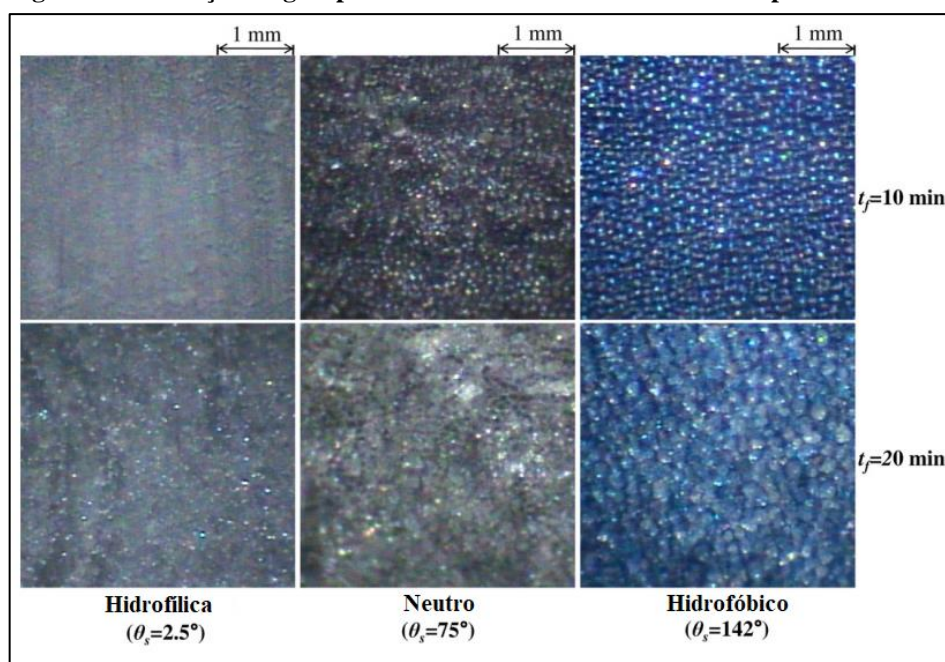
Okoroafor e Newborough (2000) verificaram se o crescimento de gelo poroso em superfícies frias expostas a correntes de ar úmido quente poderiam reduzir significativamente por meio de revestimentos poliméricos hidrofílicos de estrutura reticulada. Constatando-se uma redução na taxa de crescimento e posteriormente na espessura da camada de gelo poroso na faixa de 10% a 30%.

Liu et al. (2006) investigaram experimentalmente o desempenho *anti-frosting* de uma tinta constituída de substâncias hidrofílicas e poliméricas. Monitorou-se o crescimento da camada de gelo poroso, tendo como superfície fria uma placa metálica, na qual metade estava coberta pela tinta. Os resultados mostraram que o início da fase de nucleação foi retardado em

15 minutos com redução de pelo menos 40% na espessura da camada de gelo poroso, provando a eficácia do revestimento proposto.

Kim e Lee (2011) investigaram as características da formação de gelo poroso comparando superfícies com revestimentos hidrofílicos (resina de poliácrlato), hidrofóbicos (resina fluorada) e sem revestimento (neutra). Os autores concluíram que os revestimentos forneceram um retardamento na formação de gelo poroso em ambas as superfícies, porém, no caso da superfície hidrofóbica, o efeito foi desprezível, enquanto que para a hidrofílica, obteve-se uma camada de gelo mais fina e densa (Figura 8).

Figura 8 - Formação de gelo poroso de acordo com o tratamento superficial



Fonte: Adaptado de Kim e Lee (2011).

Kim et al. (2016) salientam que uma superfície aletada revestida com substâncias hidrofóbicas e super-hidrofóbicas, usando polipropileno isotático, poderiam retardar o fenômeno de formação de gelo poroso sobre a superfície resfriada. Tal atraso ocorreu devido ao prolongamento do estágio de nucleação dos cristais de gelo. No entanto, ambos os tipos de revestimentos são eficazes apenas quando as superfícies estão super-resfriadas, entre -20°C e -40°C .

Em resumo, percebe-se que um grande número de estudos fora realizado nos últimos anos, com o objetivo de caracterizar o fenômeno de formação e acúmulo de gelo poroso. Contudo, constata-se que os mecanismos de minimização ainda não são totalmente conhecidos e que novas tentativas e suposições devem ser feitas, afim de avaliar-se a real efetividade do uso de revestimentos ou métodos de minimização.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

No presente Capítulo, é apresentada a formulação matemática do fenômeno de formação de gelo poroso (*frost*) em placas planas, tendo como base os modelos desenvolvidos por Sedano (1996) e Tao et al. (1993).

As equações que modelam o primeiro estágio de formação desse fenômeno são definidas inicialmente e, posteriormente, as equações do segundo estágio.

Por fim, são mostradas as correlações empíricas presentes na literatura que serão utilizadas para avaliação das propriedades do gelo poroso.

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO

A formação de gelo poroso pode ser dividida em três estágios:

- i) Período de crescimento de cristais.
- ii) Período de crescimento da camada de gelo poroso.
- iii) Período de crescimento intenso da camada de gelo poroso.

Contudo, especificamente para a modelagem matemática, Tao et al. (1993) subdividem o processo de formação com base nos dois últimos estágios, como:

- i) Crescimento unidimensional dos cristais.
- ii) Ramificação dos cristais e formação da camada porosa.

Utiliza-se para realizar a formulação matemática desse fenômeno o parâmetro denominado tempo de transição (t_{tr}), que estabelece o início e o fim de cada estágio e indicando a transição entre eles.

Ele pode ser subdividido em duas etapas:

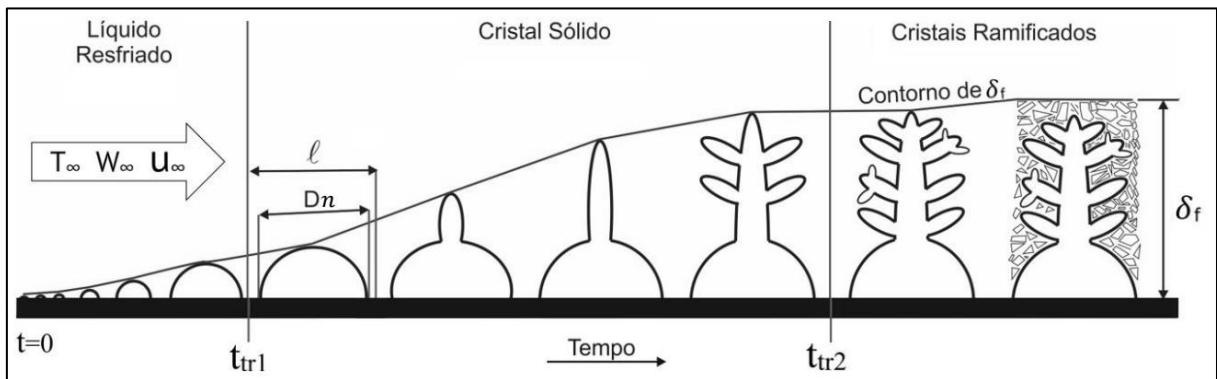
i) Formação dos núcleos de gelo: ocorre desde o instante inicial do fenômeno ($t = 0$) até o momento da formação dos núcleos de gelo ($t = t_{tr1}$), gerado pelas gotículas de água sobre a superfície. A duração desta etapa pode ser representada pelo par $t = 0$ e $t = t_{tr1}$, que são respectivamente os instantes inicial e final dessa fase. Os dados utilizados na modelagem desta etapa são obtidos de Tao et al. (1992 apud SEDANO, 1996).

ii) Crescimento unidimensional: ocorre desde o instante final da fase de formação dos núcleos de gelo ($t = t_{tr1}$) até o momento do crescimento dos cristais de gelo na direção

perpendicular à superfície ($t = t_{tr2}$). A identificação do segundo tempo de transição (t_{tr2}) pode causar conflitos durante sua determinação, devido à grande dificuldade em realizar sua medição (SEDANO, 1996). A duração desta etapa pode ser representada pelo par $t = t_{tr1}$ e $t = t_{tr2}$.

O tempo de transição ($t = t_{tr1}$ e $t = t_{tr2}$) estabelece que, ao seu final, haja uma transição de um estado para outro. A Figura 9 ilustra a relação desse parâmetro no processo de formação de gelo poroso. No intervalo $t = 0$ e $t = t_{tr1}$ tem-se a presença de líquido resfriado sobre a superfície resfriada e, a partir de t_{tr1} , as gotículas de água passam para a fase cristal sólida até que t_{tr2} seja atingido, caracterizando a fase de ramificação dos cristais de gelo.

Figura 9 - Processo de formação das camadas de gelo poroso



Fonte: Adaptado de Tao et al. (1992).

Percebe-se pela Figura 9 que os núcleos de gelo formados sobre a superfície fria, neste caso (placa plana), equivalem à uma floresta de elementos de gelo, sobre os quais tem-se ar úmido escoando, onde o comprimento do núcleo (Dn) e o espaçamento entre os núcleos (l) são fixos e determinados. Constata-se que as alturas dos cristais de gelo (δ_f) variam ao longo do tempo formando uma curva de contorno de δ_f .

A fase de ramificação dos cristais inicia-se a partir de t_{tr2} e sua duração pode ser representada pelo par $t = t_{tr2}$ e $t = t$. Nela os cristais vizinhos começam a interagir entre si, formando uma rede porosa e complexa. No presente trabalho os tempos de transição utilizados são obtidos por meio de Tao et al. (1992).

Cada etapa tem uma modelagem matemática específica (diferente). Na segunda fase, onde ocorre a ramificação dos cristais, considera-se o gelo como poroso, aumentando a complexidade do modelamento. Para resolver as equações que regem esse estágio, utiliza-se a técnica de média volumétrica desenvolvida por Whitaker (1977) para modelagem de processo

de secagem em meios porosos, presente no estudo desenvolvido por Tao et al. (1992) e Sedano (1996).

3.2 MODELAGEM DO PRIMEIRO ESTÁGIO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO

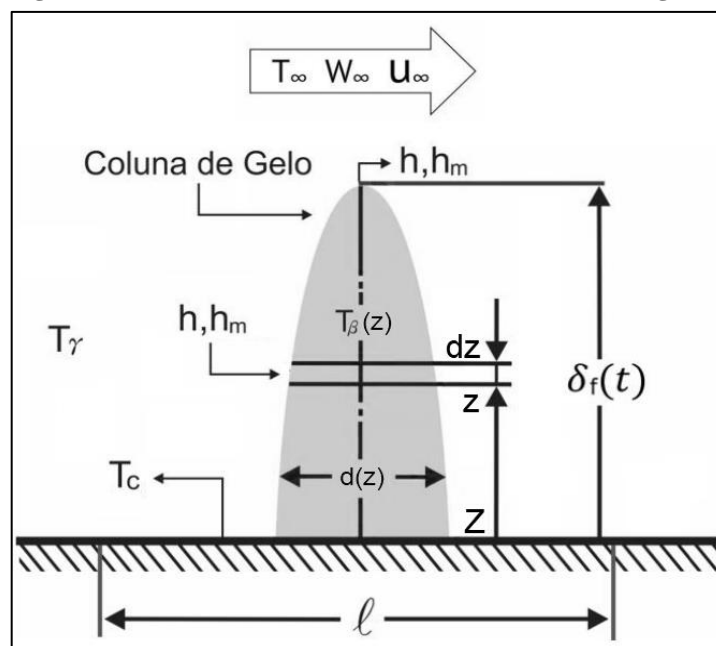
No primeiro estágio da formação de gelo poroso ocorre a formação de núcleos, com crescimento unidimensional na direção perpendicular à superfície. A curta duração deste estágio não diminui a sua importância na modelagem matemática do processo de formação, sendo um requisito que deve ser cumprido para chegar ao segundo estágio, cuja influência será perceptível somente na segunda fase.

No processo de formação desse fenômeno acontece de forma simultânea a transferência de calor e de massa, conseqüentemente, as equações governantes para este estágio são obtidas de balanços de calor e de massa.

3.2.1 Equações Governantes

Nessa seção realizam-se os balanços de calor e massa em um modelo unitário do crescimento do cristal de gelo, ilustrado pela Figura 10, para obter-se as equações governantes que regem este fenômeno.

Figura 10 - Modelo unitário do crescimento do cristal de gelo



Fonte: Adaptado de Tao et al. (1992).

i) Equação da Energia:

Considerando a escala dz da Figura 10, efetua-se o balanço de energia, no qual a soma da variação da energia interna com o calor latente devido à mudança de fase na fronteira, será igual à diferença entre os fluxos de calor entrando e saindo no volume. Tal balanço é expresso pela Equação (1).

$$\rho_{\beta} c_{p\beta} \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\pi}{4} d^2 dz - \rho_{\beta} h_{sg} \frac{\pi}{4} \left[\left(d + \frac{\partial d}{\partial t} dt \right)^2 - d^2 \right] dz = q_z + q_{conv} - q_{z+dz} \quad (1)$$

onde: ρ_{β} é a massa específica (fase sólida); $c_{p\beta}$ é o calor específico a pressão constante (fase sólida); T é a temperatura; t é o tempo; d é o diâmetro da superfície da camada de gelo poroso; h_{sg} é a entalpia de sublimação; q_z é o fluxo de transferência de calor por condução em z ; q_{conv} é o fluxo de transferência de calor por convecção; q_{z+dz} é o fluxo de transferência de calor por condução em $z + dz$.

Substituindo os termos de fluxo de calor na Equação (1) e rearranjando-a obtém-se a Equação (2).

$$\rho_{\beta} c_{p\beta} d \frac{\partial T}{\partial t} = k_{\beta} d \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + 2k_{\beta} \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial d}{\partial z} - 4h_c(T - T_{\gamma}) + 2\rho_{\beta} h_{sg} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (2)$$

onde: k_{β} é a condutividade térmica (fase sólida); h_c é o coeficiente convectivo de transferência de calor; T_{γ} é a temperatura na fase gás.

ii) Equação da Difusão:

Através da equação da difusão, pode-se realizar o balanço de massa, sendo, a variação de massa, igual, a taxa de transferência de massa, expresso pela Equação (3).

$$\rho_{\beta} \frac{\partial d}{\partial t} = 2h_m(w_{\gamma} - w_{\beta}) \quad (3)$$

onde: h_m é o coeficiente convectivo de transferência de massa; w_{γ} indica a concentração avaliada na temperatura da fase gás (T_{γ}) e w_{β} na temperatura da fase sólida (T_{β}).

As Equações (2) e (3) representam a modelagem matemática do primeiro estágio do processo de formação de gelo poroso, que é considerado como unidimensional. Suas soluções analíticas podem ser encontradas através das seguintes condições iniciais e de contorno.

3.2.1.1 Condições de Contorno

Desta forma, as Equações (2) e (3) estão sujeitas às seguintes condições de contorno:

i) $z = \delta$:

Considerando $z = \delta$ (espessura do gelo poroso) na superfície do gelo poroso, enquanto ocorre a transferência de massa, tem-se que o diâmetro da superfície da camada de gelo poroso (d) é igual a d_0 (diâmetro da superfície da camada de gelo poroso no referencial inicial), assim a solução será dada pelas Equações (4) a (6).

$$d = d_0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{\delta} = \frac{h_c}{k_\beta} (T_\infty - T_s) + \frac{\rho_\beta h_{sg}}{k_\beta} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{h_m}{\rho_\beta} (w_\infty - w_\delta) \quad (6)$$

onde: T_∞ é a temperatura da vizinhança; w_∞ é a concentração avaliada na temperatura da vizinhança; w_δ é a concentração avaliada em $z = \delta$.

ii) $z = 0$:

Na superfície da placa plana, o diâmetro da superfície da camada de gelo poroso (d) novamente será considerado como d_0 e a temperatura da superfície do gelo (T_s) é igual à temperatura de evaporação (T_e), resultando nas Equações (7) e (8).

$$T_s = T_e \quad (7)$$

$$\frac{\partial d}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

iii) Condições iniciais do fenômeno:

As condições iniciais são expressas pelas Equações (9) a (11).

$$\delta(t_{tr1}) = \delta_0 \quad (9)$$

$$d(z, t_{tr1}) = d_0 \quad (10)$$

$$T(z, t_{tr1}) = T_C \quad (11)$$

3.2.1.2 Equações Governantes Adimensionais

A adimensionalização das equações governantes é realizada através das variáveis adimensionais expressas pelo grupo de Equações (12).

$$\text{Bim}_\beta^* = \frac{h_m \delta_0 c_{p\beta}}{k_\beta} \quad (12.a)$$

$$\text{Bi}_\beta^* = \frac{h_c \delta_0}{k_\beta} \quad (12.b)$$

$$\text{Ja}^* = \frac{c_{p\beta} \Delta t}{h_{sg}} \quad (12.c)$$

$$\alpha^* = \frac{k_\beta}{\rho_\beta c_{p\beta}} \quad (12.d)$$

$$d^* = \frac{z}{\delta_0} \quad (12.e)$$

$$z^* = \frac{z}{\delta_0} \quad (12.f)$$

$$\delta_f^* = \frac{\delta_f}{\delta_0} \quad (12.g)$$

$$\rho_v^* = \frac{\rho_v}{\rho_{of}} \quad (12.h)$$

$$t = \frac{t^* \cdot \alpha^*}{\delta_0^2} \quad (12.i)$$

onde: α é a difusividade térmica; δ_0 é a espessura do gelo poroso no referencial inicial; δ_f é a espessura do gelo poroso; Bim é o número de Biot para transferência de massa; Bi é o número de Biot; Ja é o número de Jacob; Δt é o intervalo de tempo.

Fazendo-se as simplificações necessárias, tem-se:

i) Equação da Energia, dada pela Equação (13):

$$d \frac{\partial T}{\partial t} = d \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + 2 \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial d}{\partial z} - 4Bi_{\beta}^*(T - T_{\gamma}) + \frac{2}{Ja^*} \frac{\partial d}{\partial t} \quad (13)$$

ii) Equação da Difusão, dada pela Equação (14):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = 2Bim_{\beta}^*(w_{\gamma} - w) \quad (14)$$

iii) Condições de Contorno, expressas pelas Equações (15) a (18):

$$\frac{d\delta_f}{dt} = Bim_{\beta}^*(w_{\infty} - w) \quad (15)$$

$$\frac{\partial T(\delta_f, t)}{\partial z} = Bi_{\beta}^*(T_{\infty} - T) + \frac{1}{Ja^*} \frac{d\delta_f}{dt} \quad (16)$$

$$T(\delta_f, t) = T_c \quad (17)$$

$$\frac{\partial d(0, t)}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

iv) Condições Iniciais:

As condições iniciais continuam sendo expressas pelas Equações (9) a (11).

iv) Considerações Importantes:

Sendo a temperatura da fase gasosa (T_{γ}) compreendida entre a temperatura ambiente (T_{∞}) e a temperatura da placa fria (T_c). A temperatura da fase gasosa pode ser encontrada através da aproximação dada pela Equação (19).

$$T_\gamma = \lambda T_\infty + (1 - \lambda)T_C \quad (19)$$

onde: o fator λ varia entre 0 e 1, para valores de Reynolds baixos e altos, respectivamente.

Os valores do diâmetro da superfície e da espessura da camada de gelo poroso no referencial inicial (d_0 e δ_{fo}) são obtidos de medições experimentais e testes numéricos realizadas por Tao et al. (1992).

Para determinar o coeficiente de transferência de calor Sedano (1996) utiliza a expressão dada pela Equação (20).

$$Nu_x = 0.05Re_x^{0.8}Pr^{1/3} \quad (20)$$

onde: Nu é o número de Nusselt; Re_x o número de Reynolds e Pr o número de Prandtl.

Já coeficiente de transferência de massa é encontrado baseado na analogia de transferência de calor e de massa, dado pela Equação (21).

$$h_m = \frac{h}{c_{p\beta}^* Le^{1/3}} \quad (21)$$

onde: Le é o número de Lewis.

3.2.2 Equações de acoplamento entre os dois estágios

Na aplicação do modelamento matemático de um estágio para outro, é necessário tratar apropriadamente os resultados obtidos no primeiro estágio, para utilizá-los no próximo. Tal tratamento consiste em que para cada uma das “i” subdivisões a fração volumétrica ($\epsilon_{\beta i}$), determinada pela Equação (22), será avaliada em função do diâmetro inicial (d_i) e da largura (l) (TAO et al., 1992).

$$\epsilon_{\beta i} = \frac{\pi d_i^2}{4l^2} \quad (22)$$

A temperatura inicial (T_i) é dada pela Equação (23).

$$T_i = \epsilon T_{\beta i} + (1 - \epsilon_{\beta i}) T_{\gamma} \quad (23)$$

Desta forma, no estágio seguinte, os valores de massa específica (ρ_{fi}) e calor específico (c_{pfi}) do gelo poroso serão encontrados em função de $\epsilon_{\beta i}$ e T_i .

3.3 MODELAMENTO DO SEGUNDO ESTÁGIO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE GELO POROSO

Na modelagem dessa etapa utiliza-se o modelo desenvolvido por Whitaker (1977) para meios porosos, baseado na média volumétrica local. A formulação matemática do fenômeno de formação de gelo poroso no segundo estágio é desenvolvida a partir das equações básicas que regem o fenômeno de transporte de calor e de massa. Este modelo já foi utilizado por Tao et al. (1993), Sedano (1996) e Silva (2014) para modelar o meio poroso do estágio final, evitando, desta forma simplificações.

Para a formulação das equações governantes deste estágio são necessárias as restrições e hipóteses mencionadas a seguir (SILVA, 2014):

i) Restrições:

1. Equilíbrio termodinâmico entre a fase sólida (β) e líquida ($T_{fasesólida} = T_{faselíquida}$).
2. Processo de difusão mais significativo que o processo convectivo no meio poroso.
3. Entalpia independente da pressão, $h = h(T)$ para as fases β (sólida) e γ (gasosa).
4. C_p das fases são constantes, $h = c_p T + C$ para as fases β e γ .
5. Condutividade térmica constante para as fases β e γ .
6. A fase β só tem uma componente.
7. Não ocorre reação química na fase γ .
8. Trabalho de compressão e dissipação para as fases β e γ desprezíveis.
9. Sem termo fonte ($\varphi = 0$).

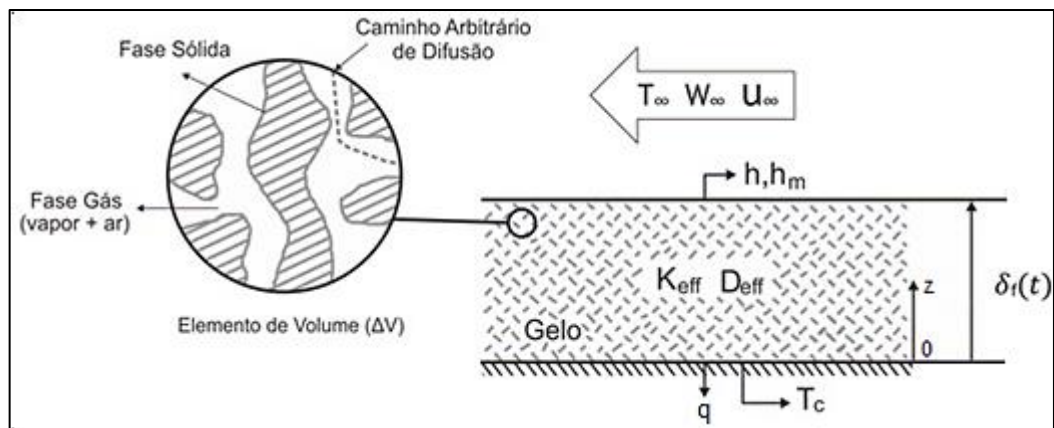
ii) **Hipóteses:**

1. Sistema sólido (gás em equilíbrio local).
2. Efeitos convectivos dentro da camada porosa desprezíveis.
3. Transferência de calor e de massa unidimensional.
4. Pressão interna do meio poroso uniforme.

3.3.1 Equações Governantes

As equações governantes apresentadas nos próximos tópicos, para as fases β e γ , foram formuladas por Sedano (1996), através de um elemento de volume (ΔV), dentro do meio poroso, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Elemento de volume utilizado no modelo



Fonte: Adaptado de Tao et al. (1992).

3.3.2 Equações Governantes Dimensionais

i) **Balço de Energia:**

O balanço de energia é dado pela Equação (24).

$$\rho_{\beta} c_{pf} \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{m} h_{sg} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (24)$$

onde: \dot{m} representa a taxa de mudança de fase do vapor de água e k_{eff} a condutividade térmica efetiva da camada porosa de gelo.

ii) Equação da continuidade da fase gelo (β):

Por meio da hipótese da presença de ar saturado no meio poroso, obtemos a relação dada pela Equação (25).

$$\frac{\partial \varepsilon_{\beta}}{\partial t} = \dot{m} = w - w_{sat} \quad (25)$$

iii) Equação de difusão da fase gás (γ):

Novamente, através da hipótese da presença de ar saturado no meio poroso, obtem-se a relação dada pela Equação (26).

$$\frac{\partial \varepsilon_{\gamma}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(D_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (26)$$

onde: D_{eff} é o coeficiente efetivo de difusão.

As Equações (24) a (26) correspondem ao modelo do segundo estágio do processo de formação de gelo poroso.

3.2.2.1 Condições de contorno

Através das condições de contorno para o segundo estágio, se obtém a resolução das Equações (24) a (26).

As condições iniciais para esse estágio são as mesmas apresentadas para o primeiro estágio.

i) Superfície da camada de gelo:

Na superfície da camada de gelo, as condições de fronteira móvel em $z = \delta$ são expressas pelas Equações (27) a (29):

$$h_m(w_{\infty} - w_{\delta}) = D_{ef,\delta} \frac{\partial w}{\partial z} + \rho_{f,\delta} \quad (27)$$

$$h_c(T_\infty - T_s) = k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho_{f,s} h_{sg} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (28)$$

$$\frac{\partial \epsilon_\beta(z = \delta_{f,t})}{\partial z} \quad (29)$$

ii) Superfície da placa plana:

Na superfície da placa $z = 0$ e a temperatura da superfície do gelo (T_s) é igual à temperatura de evaporação (T_e), resultando nas Equações (30) e (31).

$$T_s = T_e \quad (30)$$

$$\frac{\partial \epsilon_d}{\partial z} = 0 \quad (31)$$

3.3.3 Equações Governantes Adimensionais

A adimensionalização das equações que modelam o segundo estágio é realizada através das variáveis a seguir, dadas pelo grupo de Equações (32).

$$T^* = \frac{T}{T_\infty - T_c} = \frac{T}{\Delta T} \quad (32.a)$$

$$t^* = \frac{t \alpha_{oeff}}{\delta_0^2} \quad (32.b)$$

$$z^* = \frac{z}{\delta_0} \quad (32.c)$$

$$\alpha_{oeff}^* = \frac{k_{oeff}^*}{\rho_{fo}^* c p_{fo}^*} \quad (32.d)$$

$$\partial t^* = \frac{\delta_0^2}{\alpha_{oeff}^*} \partial t \quad (32.e)$$

$$\partial T = \Delta T^* \partial T \quad (32.f)$$

$$\partial z = \delta_0^* \partial z \quad (32.g)$$

i) Equação da Energia:

Substituindo Δt^* , Δz^* , ΔT^* , e dividindo por ρ_{fo}^* , c_{pfo}^* , na Equação (24), obtém-se a Equação (33).

$$\frac{\rho_f^* \rho_{fo}^*}{\rho_{fo}^* c_{pfo}^*} - \frac{\Delta T^* \partial T}{\frac{\delta_0^{*2}}{\alpha_{oeff}^*} \partial t} + \frac{\Delta h_{sg}^* \dot{m}}{\rho_{fo}^* c_{pfo}^*} = \frac{1}{\rho_{fo}^* c_{pfo}^*} \frac{\partial}{\delta_0^{*2} \partial z} \left(k_{eff}^* \Delta T^* \frac{\Delta T}{\partial z} \right) \quad (33)$$

O grupo de Equações (34) fornecem os seguintes parâmetros:

$$P_2 = \frac{\Delta h_{sg}^*}{c_{pfo}^* \Delta T^*} \quad (34.a)$$

$$c_{pf} = \frac{c_{pf}^*}{c_{pfo}^*} \quad (34.b)$$

$$k_{eff} = \frac{k_{eff}^*}{k_{oeff}^*} \quad (34.c)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}^* \delta_0^{*2}}{\rho_{fo}^* \alpha_{oeff}^*} \quad (34.d)$$

$$\rho_f = \frac{\rho_f^*}{\rho_{fo}^*} \quad (34.e)$$

Substituindo os parâmetros das Equações (34) em (33), desenvolvendo e simplificando, obtém-se a Equação (35).

$$\rho_f c_{pf} \frac{\partial T}{\partial t} + P_2 \dot{m} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff}^* \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (35)$$

ii) Equação da continuidade da fase gelo (β):

A equação da continuidade da fase gelo (β) é dada pela Equação (36).

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta}{\partial t^*} + \frac{\dot{m}}{\rho_\beta^*} = 0 \quad (36)$$

O grupo de expressões dadas pelas Equações (37) fornecem os seguintes parâmetros:

$$P_1 = \frac{\rho_\rho^*}{\rho_{fo}^*} \quad (37.a)$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}^* \delta_0^{*2}}{\rho_{fo}^* \alpha_{oeff}^*} \quad (37.b)$$

$$\partial t^* = \frac{\delta_0^{*2}}{\alpha_{oeff}^*} \partial t \quad (37.c)$$

Substituindo os parâmetros das Equações (37) em (36) e desenvolvendo obtém-se a Equação (38).

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{P_1} = 0 \quad (38)$$

iii) Equação de difusão da fase Gasosa (vapor):

A adimensionalização da Equação (26) se dá através das Equações (39).

$$D_{eff} = \frac{D_{veff}^*}{\alpha_{oeff}^*} \quad (39.a)$$

$$\rho_v = \frac{\rho_v^*}{\rho_{fo}^*} \quad (39.b)$$

Substituindo os parâmetros das Equações (39) em (26) obtém-se a Equação (40).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_\gamma \rho_v) - \dot{m} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial}{\partial z} (\rho_v) \right) \quad (40)$$

iv) Condições de Contorno Adimensionalizadas:

Para a superfície do gelo tem-se as Equações (41) a (43).

$$\text{Bi}_m[w_\infty - w(z = \delta_f, t)] = D_{effs} \frac{\partial \rho_v(z = \delta_f, t)}{\delta_z} + \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} \quad (41)$$

$$\text{Bi}[T_\infty - T(z = \delta_f, t)] = k_{eff} \frac{\partial T(z = \delta_f, t)}{\delta_z} + P_2 \rho_f \frac{d\delta_f}{dt} \quad (42)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta(z = \delta_f, t)}{\partial z} = 0 \quad (43)$$

Para superfície da placa plana tem-se as Equações (44) e (45):

$$T(z = 0, t) = T_e \quad (44)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta(z = 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (45)$$

3.4 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES

Correlações empíricas disponíveis na literatura, utilizadas por Sedano (1996) e Silva (2014), são utilizadas na avaliação das propriedades do gelo poroso. A condutividade térmica (k_β) utilizada é obtida por meio da Equação (46) (DIETENBERG, 1983).

$$k_\beta = \frac{630}{T} \text{ [W/m.K]} \quad (46)$$

onde: T em [K].

A expressão do calor específico ($c_{p\beta}$) é obtida, de acordo com Ismail et al. (1997), dada pela Equação (47).

$$c_{p\beta} = 2116,56 + 7,2845 T \text{ [J/kg°C]} \quad (47)$$

onde: T em [°C].

O volume específico $\left(\frac{1}{\rho_\beta}\right)$ é obtido, de acordo com Sami e Duong (1989 apud SEDANO, 1996), por meio da Equação (48).

$$\frac{1}{\rho_{\beta}} = 0,0010907 + 1,4635 \times 10^{-7} T \quad [\text{kg/m}^3] \quad (48)$$

onde: T em [K].

As propriedades do ar seco são expressas pelas Equações (49) a (51), obtidas segundo Ashrae (2009 apud SILVA, 2014).

$$k_{ar} = 0,001968 + 8,15 \times 10^{-5} T \quad [\text{W/m.k}] \quad (49)$$

$$c_{par} = 1004 \quad [\text{J/kg}^{\circ}\text{C}] \quad (50)$$

$$\rho_{ar} = \frac{344,9}{T} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (51)$$

onde: T em [K].

A avaliação da condutividade efetiva da camada porosa de gelo (k_{eff}) é de suma importância para o modelamento do fenômeno. A expressão utilizada neste trabalho é proposta por Yonko e Sepsy (1967 apud SEDANO, 1996), dada pela Equação (52).

$$k_{eff} = 0,02422 + 7,214 \times 10^{-4} \rho_f + 1,1797 \times 10^{-6} \rho_f^2 \quad [\text{W/m.k}] \quad (52)$$

onde: ρ_f em $[\text{kg/m}^3]$.

O coeficiente efetivo de difusão (D_{eff}) apresenta difícil determinação devido as complexidades envolvidas no processo de difusão que ocorrem nesse fenômeno, sendo determinado a partir da expressão desenvolvida por Tao et al. (1992), dada pela Equação (53).

$$D_{eff} = \varepsilon_{\gamma} D (1 + F) \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (53)$$

onde: D é o coeficiente binário de difusão e determinado pela expressão de Eckert (1954 apud SEDANO, 1996), dada pela Equação (54).

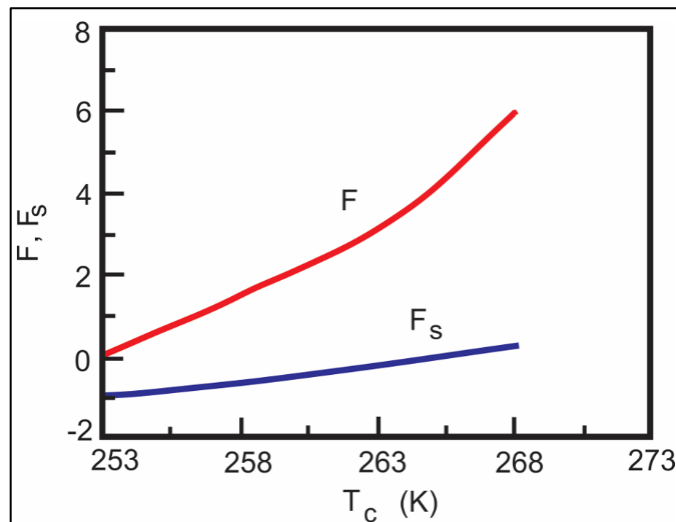
$$D = 2,19 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,81} \times 10^{-5} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (54)$$

O coeficiente efetivo de difusão na superfície é dado pela Equação (55) (SEDANO, 1996).

$$D_{eff} = \varepsilon_{\gamma} D(1 + F_s) \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (55)$$

Os fatores F e F_s dependem da temperatura e são obtidos através da Figura 12 (TAO et al., 1993).

Figura 12 - Fatores F e F_s



Fonte: Adaptado de Tao et al. (1993).

Para o cálculo da umidade relativa é utilizada a expressão proposta por Stoecker e Jones (1985), dada pela Equação (56).

$$\phi = \frac{P_{pva}}{P_{sa}} \quad (56)$$

A pressão parcial do vapor de água (P_{pva}) e a pressão de saturação de água (P_{sa}), ambas na mesma temperatura, são obtidas a partir de tabelas termodinâmicas.

Para o cálculo da umidade absoluta utiliza-se a correlação proposta por Stoecker e Jones (1985), que consiste na razão entre a massa de vapor de água e de ar seco, dada pela Equação (57).

$$w = \frac{\frac{P_s}{R_s}}{\frac{(P_t - P_s)}{R_a}} = \frac{P_s R_a}{R_s (P_t - P_s)} \quad (57)$$

onde: w é a umidade absoluta [$\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar,seco}}$]; P_s é a pressão de saturação [kPa]; R_s é a constante de gás do vapor (461,5 [J/(kg. K)]); P_t é a pressão atmosférica ($P_a + P_s$) [kPa]; R_a é a constante de gás do ar seco (287 [J/(kg. K)]).

Assim, tem-se a Equação (58) para o cálculo da umidade absoluta.

$$w = 0,622 \frac{P_s}{(P_t - P_s)} \quad (58)$$

onde a pressão de saturação para qualquer tempo e posição da camada de gelo é avaliada em função da temperatura, por meio da equação empírica de Ashrae (2009 apud SILVA, 2014), válida para o intervalo: $-100^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$. Dada pela Equação (59).

$$p_{v,sat} = \exp \left[\frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 T^4 + C_7 \ln(T) \right] \quad (59)$$

na qual os valores das constantes (C) são (ASHRAE, 2009):

$$C_1 = -5,6745359 \times 10^3$$

$$C_2 = 6,3925247$$

$$C_3 = -9,677843 \times 10^{-3}$$

$$C_4 = 6,2215701 \times 10^{-7}$$

$$C_5 = 2,0747825 \times 10^{-9}$$

$$C_6 = -9,484024 \times 10^{-13}$$

$$C_7 = 4,1635019$$

O calor latente de sublimação (h_{sg}) é obtido a partir da expressão desenvolvida por Parish (1970), dada pela Equação (60).

$$h_{sg} = 2322 \{1220,1 - 0,04667 [1,8 (T - 273) + 32]\} \text{ [J/kg]} \quad (60)$$

Os coeficientes de transferência de calor e de massa sobre a superfície da camada de gelo são parâmetros críticos no modelamento desse fenômeno, deve-se considerar que a camada limite térmica e difusiva são transientes, além da camada de gelo ser rugosa e de fronteira móvel. Nesse trabalho são utilizadas as mesmas correlações utilizadas por Sedano (1996).

O coeficiente de transferência de calor é avaliado a partir das Equações (61) a (63).

$$\text{Nu}_{ax} = 0,051 \left(\frac{x}{dh} \right)^{0,611} w_{\infty}^{-0,860} T_i^{1,647} \text{Re}_{dh}^{0,317} \text{Fo}_{dh}^{0,206} \quad (61)$$

$$h_{ax} = \frac{\text{Nu}_{ax} k_{ar}}{x} \quad (62)$$

$$\text{Bi} = \frac{h_{ax} \delta_{fo}}{k_{oeff}} \quad (63)$$

onde: x refere-se a coordenada no eixo horizontal ao fluxo de ar [m] e dh é o diâmetro hidráulico [m].

O coeficiente de transferência de massa é avaliado a partir das Equações (64) a (66).

$$\text{Sh}_x = 1,019 \times 10^{-5} \left(\frac{x}{dh} \right)^{0,781} w_{\infty}^{-2,859} T_i^{-0,119} \text{Re}_{dh}^{0,185} \text{Fo}_{dh}^{0,187} \quad (64)$$

$$h_m = \frac{\text{Sh}_x D(z = \delta_f)}{x} \quad (65)$$

$$\text{Bim} = \frac{h_m \delta_{fo}}{\alpha_{oeff} \rho_{fo}} \quad (66)$$

Nas quais, Re_{dh} , Fo_{dh} e T_i , são obtidas pelas Equações (67) a (69).

$$\text{Re}_{dh} = \frac{\rho_{ar} v_{dh}}{\mu} \quad (67)$$

$$\text{Fo}_{dh} = \frac{\alpha_{oar} t}{dh^2} \quad (68)$$

$$T_i = \frac{T_{tp} - T_c}{\Delta T} \quad (69)$$

As correlações experimentais para a densidade e a espessura da camada de gelo são apresentadas pelas Equações (70) e (71).

$$\rho_f = 5,559 \times 10^{-6} \left(\frac{x}{dh}\right)^{0,137} w_\infty^{-0,413} T_i^{-0,997} Re_{dh}^{0,715} Fo_{dh}^{0,252} \quad (70)$$

$$\delta_f = 0,156 \left(\frac{x}{dh}\right)^{-0,098} w_\infty^{1,723} T_i^{1,1} Re_{dh}^{0,343} Fo_{dh}^{0,655} \quad (71)$$

Os valores das propriedades usadas como referência de adimensionalização, de acordo com Tao et al. (1992 apud SEDANO, 1996), são:

$$\alpha_{oeff} = 1,38 * 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$\rho_{fo} = 92,84 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$c_{pfo} = 1912,28 \text{ [J / kg. K]}$$

$$\delta_0 = 0,0029 \text{ [m]}$$

O valor da condutividade efetiva (k_{oeff}) é alterado de acordo com o material ou revestimento da superfície em uso durante a simulação.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

Neste capítulo são apresentados os detalhes da análise numérica para determinar o crescimento da fronteira de gelo poroso sobre as superfícies planas sob escoamento de ar úmido, de acordo com as características do tratamento numérico de fronteira móvel e de interpolação desenvolvida por Sedano (1996) para placas planas e, posteriormente, por Silva (2014) para cilindros com arranjo triangular.

A programação utilizada neste trabalho foi implementada em linguagem *Python* por meio do ambiente *Jupyter Notebook*, que consiste em uma aplicação de código aberto (*BSD license*) que permite a criação e resolução de rotinas que contenham códigos iterativos e equações, e também a obtenção de gráficos (*matplotlib*), cujo os fluxogramas dos algoritmos de resolução do primeiro e segundo estágios encontram-se no subcapítulo 4.3.

4.1 ANÁLISE NUMÉRICA DO PRIMEIRO ESTÁGIO

Como descrito por Silva (2014), as equações que modelam o primeiro estágio do crescimento da camada de gelo poroso podem ser resolvidas utilizando diferenças finitas. Para desenvolver a discretização utiliza-se o método das diferenças finitas centrada na derivada no espaço e nos pontos intermediários, e formulação implícita para o tempo de transição.

Aplicando uma malha fixa, os valores das propriedades são interpolados para cada nova posição da fronteira, através do método da *Spline*, que é uma técnica de aproximação, por meio de interpolação polinomial, onde divide-se o intervalo de interesse em vários subintervalos, que são interpolados com polinômios de graus menores.

Para garantir-se a convergência da solução em cada intervalo de tempo todas as equações diferenciais envolvidas são solucionadas utilizando o método da relaxação.

4.1.1 Discretização das Equações Governantes do Primeiro Estágio

i) Equação da Energia

Pela discretização realizada a partir da Equação (13) obtém-se a Equação (72).

$$d_i \frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{\Delta t} = d_i \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} + 2 \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x} \frac{d_i^n - d_{i-1}^n}{\Delta x} - 4\text{Bi}(T_i^n - T_\gamma) + \frac{2}{J_a} \frac{d_i^n - d_{i-1}^n}{\Delta t} \quad (72)$$

ii) Equação da Difusão

Pela discretização realizada a partir da Equação (14) obtém-se a Equação (73).

$$\frac{d_i^n - d_{i-1}^n}{\Delta t} = 2\text{Bim}(w_\gamma - w_i^{n-1}) \quad (73)$$

iii) Condições de Contorno

As condições de contorno também foram discretizadas pela técnica de diferenças finitas, porém, nesta etapa foi utilizado o esquema de diferença atrasada para a primeira derivada no espaço, no caso da superfície, e diferença finita avançada no caso da superfície da placa em $z = 0$, para garantir a estabilidade da solução.

Para a superfície da camada de gelo tem-se as Equações (74) e (75).

$$\frac{\delta_f^n - \delta_f^{n-1}}{\Delta t} = \text{Bim}(w_\infty - w(z = \delta_f^{n-1})) \quad (74)$$

$$\frac{T^n(z = \delta_f^n) - T^n(z = \delta_f^{n-1} - \Delta z)}{\Delta z} = \text{Bi}_\beta [T_\infty - T(z = \delta_f^n)] + \frac{1}{\text{Ja}} \frac{\delta_f^n - \delta_f^{n-1}}{\Delta t} \quad (75)$$

Na superfície da placa tem-se as expressões dadas pelas Equações (76) e (77).

$$(z = 0, t) = T_c \quad (76)$$

$$\frac{\partial d(z = 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (77)$$

4.2 ANÁLISE NUMÉRICA DO SEGUNDO ESTÁGIO

As equações diferenciais que modelam o segundo estágio são novamente solucionadas por meio do método das diferenças finitas. Silva (2014) utiliza diferenças finitas centradas para as derivadas no espaço e, para os pontos intermediários, utiliza a técnica de Up Wind para a derivada temporal.

Utiliza-se malha fixa, como anteriormente, sendo os valores das variáveis e propriedades em estudo interpoladas para cada uma das novas posições de fronteira, as equações diferenciais são resolvidas por relaxação e iterações, até que obtenha-se uma diferença igual ou inferior a 10^{-5} entre os valores das variáveis em duas iterações sucessivas.

4.2.1 Discretização das Equações Governantes do Segundo Estágio

i) Discretização da Equação da Energia

A discretização da Equação da Energia (15) é dada pela Equação (78).

$$\frac{1}{12}(\rho_f c_{pf})_{J+1}^{n-1} \frac{T_{J+1}^n - T_{J+1}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{5}{6}(\rho_f c_{pf})_J^{n-1} \frac{T_J^n - T_J^{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{12}(\rho_f c_{pf})_{J-1}^{n-1} \frac{T_{J-1}^n - T_{J-1}^{n-1}}{\Delta t} = \frac{k_{eff_{J+\frac{1}{2}}}^{n-1} T_{J+1}^n - \left(k_{eff_{J+\frac{1}{2}}} + k_{eff_{J-\frac{1}{2}}}\right)^{n-1} T_J^n + k_{eff_{J-\frac{1}{2}}}^{n-1} T_{J-1}^n}{\Delta x^2} - (\dot{m}P_2)_J^{n-1} \quad (78)$$

Considerando que:

$$\alpha(z) = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} k_{eff}(z)$$

$$D_J^{n-1} = \frac{1}{12}(\rho_f c_{pf})_{J+1}^{n-1} \frac{T_{J+1}^n - T_{J+1}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{5}{6}(\rho_f c_{pf})_J^{n-1} \frac{T_J^n - T_J^{n-1}}{\Delta t} + \frac{1}{12}(\rho_f c_{pf})_{J-1}^{n-1} \frac{T_{J-1}^n - T_{J-1}^{n-1}}{\Delta t}$$

Aplicando os termo $\alpha(z)$ e D_J^{n-1} na Equação (78) obtém-se a Equação (79).

$$\left(\frac{1}{12}\rho_{f_{J-1}}c_{pf_{J-1}} - \alpha_{J-\frac{1}{2}}\right)^{n-1} T_{J-1}^n + \left(\frac{5}{6}\rho_{f_J}c_{pf_J} + \alpha_{J+\frac{1}{2}} + \alpha_{J-\frac{1}{2}}\right)^{n-1} T_J^n + \left(\frac{1}{12}\rho_{f_{J+1}}c_{pf_{J+1}} - \alpha_{J+\frac{1}{2}}\right)^{n-1} T_{J+1}^n = D_J^{n-1} - (\dot{m}P_2)_J^{n-1}\Delta t \quad (79)$$

Fazendo relaxação, sendo:

$$A_0 = \left(\frac{1}{12}\rho_{f_{J-1}}c_{pf_{J-1}} - \alpha_{J-\frac{1}{2}}\right)^{n-1}$$

$$Bo = \left(\frac{5}{6} \rho_{fJ} c_{pfJ} + \alpha_{J+\frac{1}{2}} + \alpha_{J-\frac{1}{2}} \right)^{n-1}$$

$$Co = \left(\frac{1}{12} \rho_{fJ+1} c_{pfJ+1} - \alpha_{J+\frac{1}{2}} \right)^{n-1}$$

Através da relaxação, tem-se a Equação (80).

$$rAoT_{J-1}^n + BoT_J^n + rCoT_{J+1}^n = (1-r)BoT_J^{n-1} + (D_J^{n-1} - (\dot{m}P_2)_J^{n-1}\Delta t) \quad (80)$$

onde: r é o fator de relaxação.

ii) Discretização da Equação de Difusão da Fase Gasosa (vapor):

Partindo da Equação (41), na qual:

$$\varepsilon_\gamma = 1 - \varepsilon_\beta(z)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\gamma}{\partial t} - \frac{\dot{m}}{P_1} = 0$$

Desenvolvendo tem-se a Equação (91).

$$(1 - \varepsilon_\beta) \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \left(\frac{\rho_v \dot{m}}{P_1} - \dot{m} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \right) \quad (91)$$

Discretizando a Equação (41) da mesma maneira que a equação da energia tem-se a Equação (92).

$$\begin{aligned} & \frac{1}{12} (1 - \varepsilon_\beta)_{J-1}^{n-1} \frac{\rho_{vJ-1}^n - \rho_{vJ-1}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{5}{6} (1 - \varepsilon_\beta)_J^{n-1} \frac{\rho_{vJ}^n - \rho_{vJ}^{n-1}}{\Delta t} + \\ & \frac{1}{12} (1 - \varepsilon_\beta)_{J+1}^{n-1} \frac{\rho_{vJ+1}^n - \rho_{vJ+1}^{n-1}}{\Delta t} = \\ & \frac{D_{effJ+\frac{1}{2}}^{n-1} \rho_{vJ+1}^n - \left(D_{effJ+\frac{1}{2}}^{n-1} - D_{effJ-\frac{1}{2}}^{n-1} \right)^{n-1} \rho_{vJ}^n + D_{effJ-\frac{1}{2}}^{n-1} \rho_{vJ-1}^n}{\Delta x^2} - \left(\frac{\rho_v \dot{m}}{P_1} - \dot{m} \right)_J^{n-1} \end{aligned} \quad (92)$$

Considerando que:

$$\gamma(z) = \frac{\Delta t}{\Delta z^2} D_{eff}(z)$$

$$\delta_j^{n-1} = \frac{1}{12} (1 - \varepsilon_\beta)_{j-1}^{n-1} \rho_{v_{j-1}}^{n-1} + \frac{5}{6} (1 - \varepsilon_\beta)_j^{n-1} + \frac{1}{12} (1 - \varepsilon_\beta)_{j+1}^{n-1} \rho_{v_{j+1}}^{n-1}$$

Substituindo na Equação (92) e desenvolvendo, tem-se a Equação (93).

$$\begin{aligned} \dot{m}_j^n = \frac{1}{\left(1 - \frac{\rho_{v_j}^n}{P_1}\right)} & \left[\left(\frac{1}{12} (1 - \varepsilon_\beta)_{j-1} - \gamma_{j+\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \rho_{v_{j-1}}^n \right. \\ & + \left(\frac{5}{6} (1 - \varepsilon_\beta)_j^{n-1} + \gamma_{j+\frac{1}{2}} + \gamma_{j-\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \rho_{v_j}^n \\ & \left. + \left(\frac{1}{12} (1 - \varepsilon_\beta)_{j+1} - \gamma_{j+\frac{1}{2}} \right)^{n-1} \rho_{v_{j+1}}^n - \delta_j^{n-1} \right] \end{aligned} \quad (93)$$

ii) Discretização da Equação de Continuidade da fase gelo (β):

A discretização da equação de continuidade da fase de gelo (β) são dadas pelas Equações (94) e (95).

$$\varepsilon_{\beta_j}^n = \varepsilon_{\beta_j}^{n-1} - \frac{\dot{m}_j^n}{P_1} \Delta t \quad (94)$$

$$\rho_{v_j}^n = \frac{\exp \left[-P_5 \left(\frac{1}{T_j^n} - \frac{1}{T_o} \right) \right]}{P_4 T_j^n} \quad (95)$$

iv) Condições de Contorno:

As condições de contorno são discretizadas utilizando diferenças finitas, na qual diferenças atrasadas são utilizadas para a primeira derivada no espaço, na superfície da camada e diferenças adiantadas para 1ª derivada no espaço, na superfície da placa ($z = 0$). Para a superfície da placa ($z = 0$) tem-se as Equações (96) e (97).

$$T(z = 0) = T_c \quad (96)$$

$$\frac{\varepsilon_{\beta}^n(z = \Delta z) - \varepsilon_{\beta}^n(z = 0)}{\Delta z} = 0 \quad (97)$$

Por fim, para a superfície da camada de gelo ($z = \delta$) tem-se as Equações (98) a (100).

$$\text{Bim}[w_\infty - w^n(z = \delta_f)] = D_{eff} \frac{\rho_v^n(z = \delta_f) - \rho_v^n(z = \delta_f - \Delta z)}{\Delta z} - \rho_f \frac{\delta_f^{n+1} - \delta_f^n}{\Delta t} \quad (98)$$

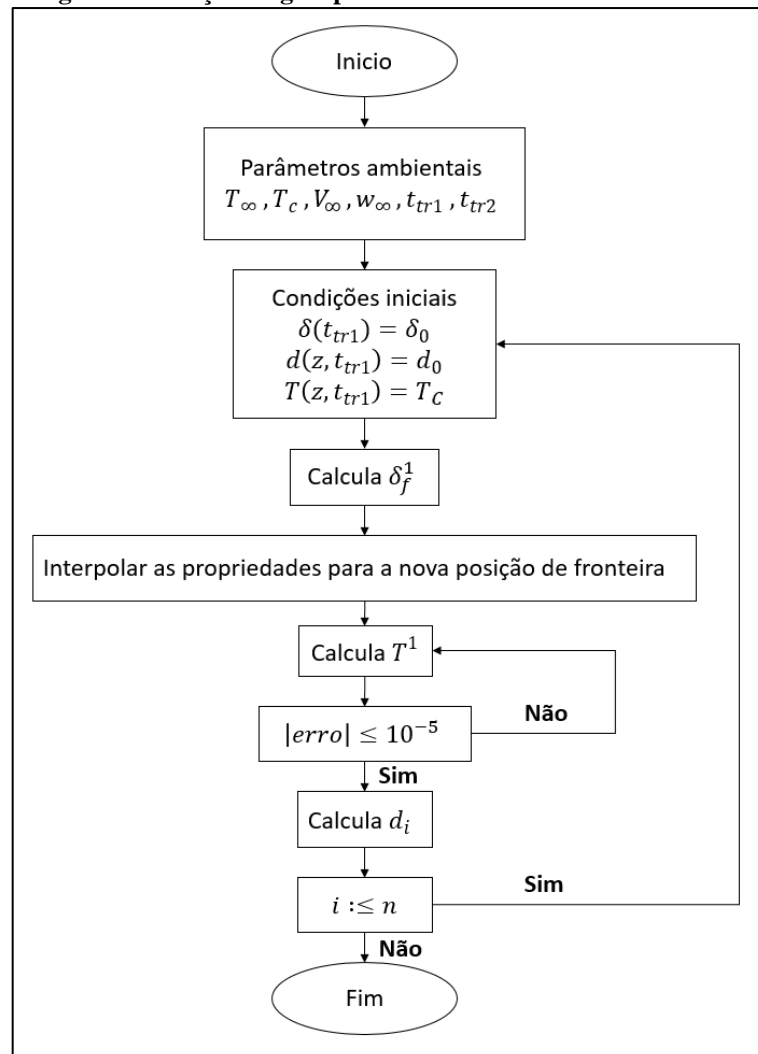
$$\text{Bi}[T_\infty - T^n(z = \delta_f)] = k_{eff} \frac{T^n(z = \delta_f) - T^n(z = \delta_f - \Delta z)}{\Delta z} - P_2 \rho_f \frac{\delta_f^n - \delta_f^{n-1}}{\Delta t} \quad (99)$$

$$\frac{\varepsilon_\beta^n(z = \delta_f) - \varepsilon_\beta^n(z = \delta_f - \Delta z)}{\Delta z} = 0 \quad (100)$$

4.3 FLUXOGRAMAS DOS ALGORITMOS DE RESOLUÇÃO

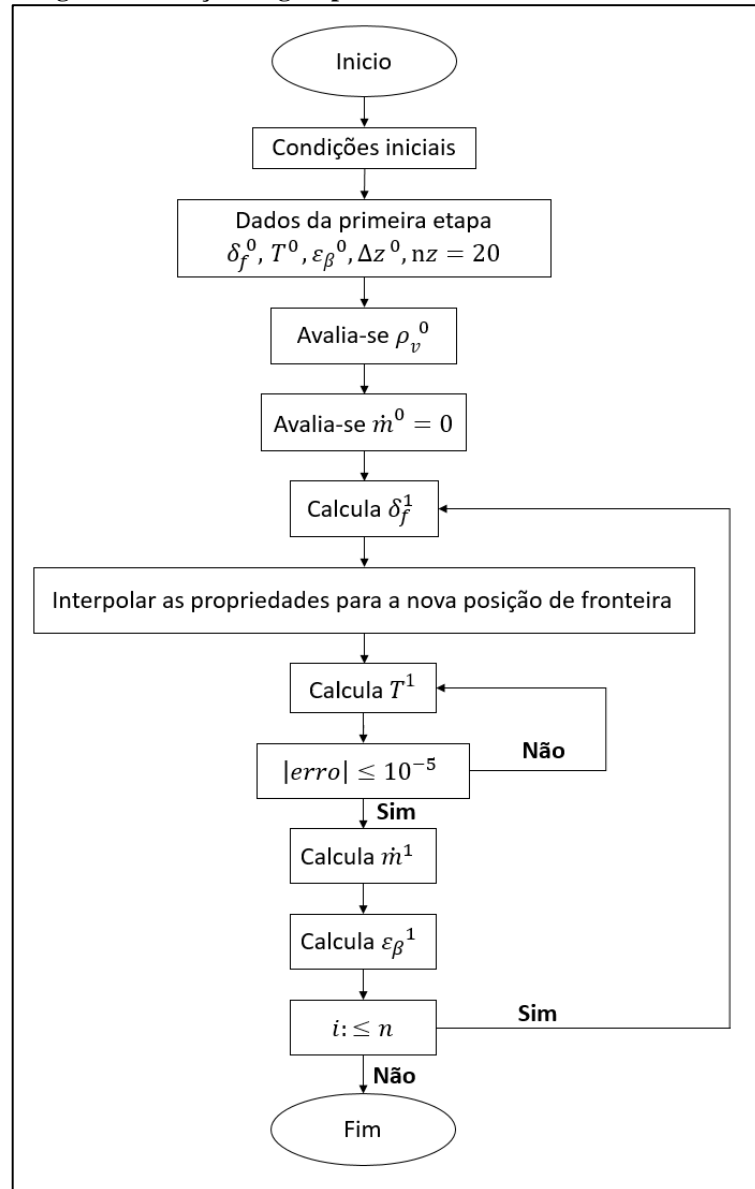
Os fluxogramas dos algoritmos de solução tanto para o primeiro e segundo estágios são ilustrados pelas Figuras 13 e 14, respectivamente.

Figura 13 - Fluxograma do algoritmo de solução do primeiro estágio de formação de gelo poroso



Fonte: Adaptado de Sedano (1996).

Figura 14 - Fluxograma do algoritmo de solução do segundo estágio de formação de gelo poroso



Fonte: Adaptado de Sedano (1996).

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste Capítulo é apresentado o aparato experimental desenvolvido e utilizado, as superfícies analisadas, os procedimentos experimentais e a análise de incertezas.

Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Controle Térmico vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa.

Todos os componentes presentes no aparato experimental foram obtidos por meio de aquisições do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) e recursos próprios.

5.1 APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental conforme a Fotografia 1, é composto por uma seção de testes, que contém uma pastilha termoelétrica *Peltier* TEC1-12706, um dissipador de calor aletado com tubos de calor *Cooler Master™ Hyper T4*, um sistema de aquisição de dados *Keysight™ 34970A* com um multiplexador *Keysight™ 34901A* com 18 canais, uma fonte de alimentação *Keysight™ U8002A*, uma câmera Câmera Digital *Sony™ Cyber-Shot DSC-W530* com 14.1 MP e 90 de DPI, um tripé *Polaroid™*, um *notebook Dell™* e um *nobreak NHS™ 1200 VA*. A seção de testes consiste em um caixa de acrílico (invólucro), uma base de sustentação de alumínio, um ventilador axial *Multilaser™*.

Fotografia 1 - Aparato Experimental



Fonte: Autoria própria

Todos os desenhos técnicos referentes ao projeto de concepção da seção de testes (invólucro de acrílico), que possibilitam sua reprodução, estão contidos no Apêndice A.

O objetivo do aparato experimental é analisar a formação e crescimento do gelo poroso em superfícies frias comparando diferente tratamentos superficiais e materiais.

A Figura 15 permite comparar o modelo 3D com o construído experimentalmente.

Figura 15 - Aparato experimental proposto e obtido

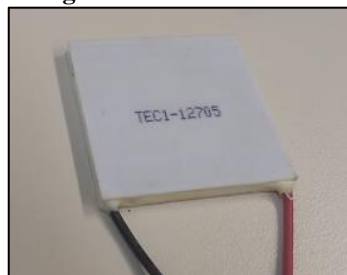


Fonte: Aatoria própria.

Parâmetros ambientais como temperatura da superfície fria, temperatura ambiente, umidade e velocidade do ar são importantes para análise desse fenômeno.

A superfície fria, fundamental para obtenção do fenômeno em estudo, foi obtida por meio da utilização de uma Pastilha Termoelétrica *Peltier* TEC1-12706, mostrada na Fotografia 2, com 40 mm de aresta e 2 mm de espessura, acoplada a fonte de alimentação *Keysight™* U8002A, sendo resfriada através do *Cooler* para processadores *Master™ Hyper T4*, modelo RR-T4-18PK-R1.

Fotografia 2 - Pastilha Peltier



Fonte: Aatoria própria.

A temperatura ambiente e umidade foram controladas por meio de um sistema de resfriamento *Split Piso Teto Rheem™*, que não possui controle de umidade. Desta forma a temperatura de operação foi fixada na menor possível, obrigando seu pleno funcionamento durante toda execução dos testes, não ocorrendo alterações significativas, em ambos os parâmetros. Todavia, sempre que alterações abruptas eram constatadas durante as medições, o teste em andamento era suspenso imediatamente.

A velocidade do ar úmido em escoamento na seção de teste foi efetuada através de um ventilador axial *MultilaserTM*.

Devido ao alto custo de sistemas de controle e aquisição de dados e a ascensão de plataformas de código aberto (*open-source*), utilizou-se um circuito de prototipagem eletrônica com dispositivo Arduino®, licenciado sob a Creative Commons-Atribuição-CompartilhaIgual 4.0 Internacional, mostrado pela Fotografia 3, no controle da velocidade do ar e na aquisição dos valores de umidade, cujo projeto e obtenção são mostrados pelo Apêndice B.

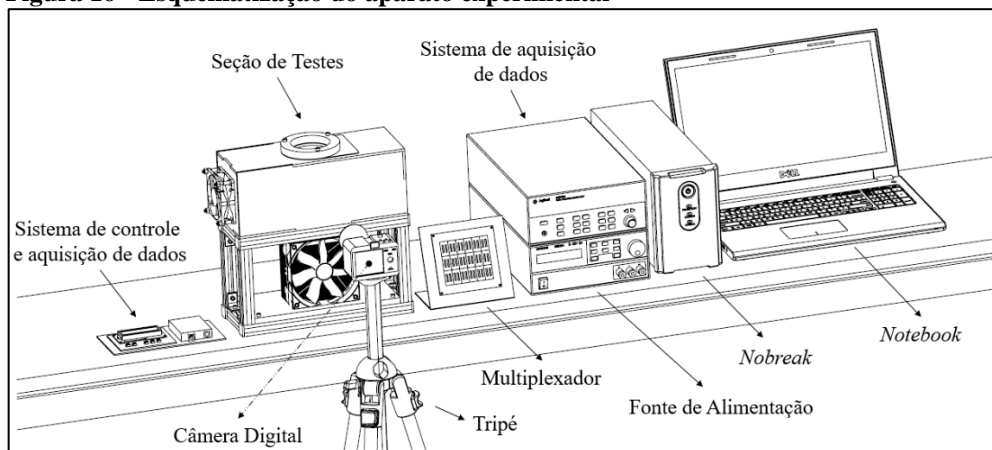
Fotografia 3 - Sistema de controle e aquisição de dados



Fonte: Autoria própria.

Por fim, a esquematização do aparato experimental é exemplificada na Figura 16.

Figura 16 - Esquematização do aparato experimental



Fonte: Autoria própria.

5.1.1 Procedimento Experimental

A metodologia adotada na realização dos procedimentos experimentais divide-se em dez etapas, sendo elas:

- 1 - Isolar o ambiente de testes (laboratório).
- 2 - Ligar os sistemas de resfriamento, de controle e aquisição de dados.

3 - Aguardar o intervalo de tempo necessário para que os parâmetros ambientais estejam em regime *quase*-permanente.

4 - Fixar a placa a ser testada por meio da utilização da pasta térmica.

5 - Ligar os componentes elétricos do aparato experimental, fixando a velocidade de escoamento interno em 0,5 m/s, por meio do sistema de controle e aquisição de dados.

6 - Preparar e conferir os sistemas de medição, como a câmera digital, o termômetro infravermelho, os termopares e demais sensores.

7 - Efetuar a primeira medição, tempo 0 (zero).

8 - Ativar a superfície fria por meio da fonte de alimentação na tensão de 11,90 V.

9 - Efetuar as medições a cada intervalo de tempo de 10 (dez) minutos durante o tempo total de 90 (noventa) minutos, coletando todos os valores em uma planilha digital.

10 - Salvar os dados obtidos para análise com as especificações da placa em teste, como material, acabamento superficial e data.

5.2 SUPERFÍCIES DE TESTE

As superfícies planas utilizadas nos experimentos consistem de placas quadradas de alumínio, cobre e latão, com 40 mm de aresta e com 2 mm de espessura. Tendo acabamentos superficiais distintos: lisa (amostra I), ranhurada (amostra II, hidrofílica) e envernizada (amostra III, hidrofóbica).

Os materiais citados anteriormente foram obtidos na forma de chapas, sendo cortadas e dimensionadas através de uma Guilhotina Hidráulica *ClarkTM* modelo TG 256 SA.

Os valores de condutividade térmica de acordo com o material estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de condutividade térmica dos materiais utilizados

Material	Unidade	Condutividade Térmica
Alumínio	W/mK	237
Cobre	W/mK	401
Latão	W/mK	110

Fonte: Incropera et al. (2008).

Na etapa seguinte ao procedimento de corte foi realizado o lixamento, através da Dupla Politriz Lixadeira Metalográfica ARTEC®, mostrada na Fotografia 4, tendo como objetivo

eliminar riscos e marcas contidas na superfície das amostras após sua aquisição e principalmente garantir que a superfície seja composta apenas pelo material de base, informado pelo fornecedor.

Fotografia 4 - Dupla Politriz Lixadeira Metalográfica



Fonte: Aatoria própria

As amostras foram lixadas com lixas de carbeto de silício com granulometria sucessivamente menor, rotacionando-as em 90° em cada lixa subsequente. A sequência adotada foi 180, 220, 320, 400 e 600 *mesh*, utilizando a máxima rotação disponível no equipamento durante o tempo necessário para constatar-se que os riscos gerados pela lixa anterior se extinguiram.

Finalizado o lixamento, as amostras foram limpas com água e depois álcool etílico, visando deixar a superfície isenta de poeira e traços abrasivos.

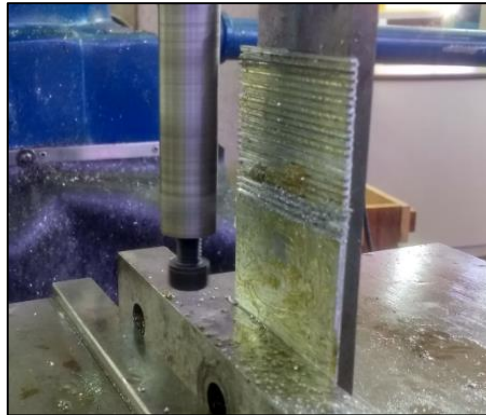
Em seguida ocorreu o polimento, sendo realizado com a utilização de abrasivo de alumina 0,5 μm , também efetuado por meio da Dupla Politriz Lixadeira Metalográfica ARTEC®.

Neste ponto, finaliza-se as etapas do tratamento superficial referente a superfície designada lisa (amostra I), caso seja dado sequência aos demais tratamentos superficiais, descritos a seguir, elas serão submetidas ao processo de fresamento (dando origem a amostra II) ou envernização (amostra III).

As placas ranharudas (amostra II), cujo desenho técnico está contido no Apêndice C, foram obtidas por meio do processo de fresamento, como citado anteriormente, utilizando a Fresadora Ferramenteira *Diplomat*TM modelo FVF 3000, tendo um cabeçote broqueador (bailarina) com 1 mm como ferramenta de corte. A obtenção da placa ranhurada de alumínio é mostrada pela Fotografia 5, ocorrendo da mesma forma para os demais materiais.

Por fim, na amostra III é aplicada uma camada de verniz, da marca Mundial *Prime*TM, Tinta *Spray Verniz - Uso Geral*, dando origem a uma superfície hidrofóbica, que repele a água.

Fotografia 5 - Fresamento realizado para obtenção das ranhuras



Fonte: Autoria própria.

Após a realização dos tratamentos superficiais, as placas foram levadas a um banho ultrassônico *Kondentech™* (Fotografia 6), permanecendo mergulhados em álcool etílico durante dez minutos, assegurando assim que as mesmas fossem completamente limpas.

Fotografia 6 - Banho ultrassônico



Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção das superfícies Lisa (I), Ranhurada (II) e Envernizada (III), elas foram inseridas no aparato experimental por meio da utilização de uma pasta térmica *Implastec™*, com temperaturas de trabalho entre -40 °C a 200 °C , a qual promoveu um melhor contato entre as superfícies e uma melhor fixação.

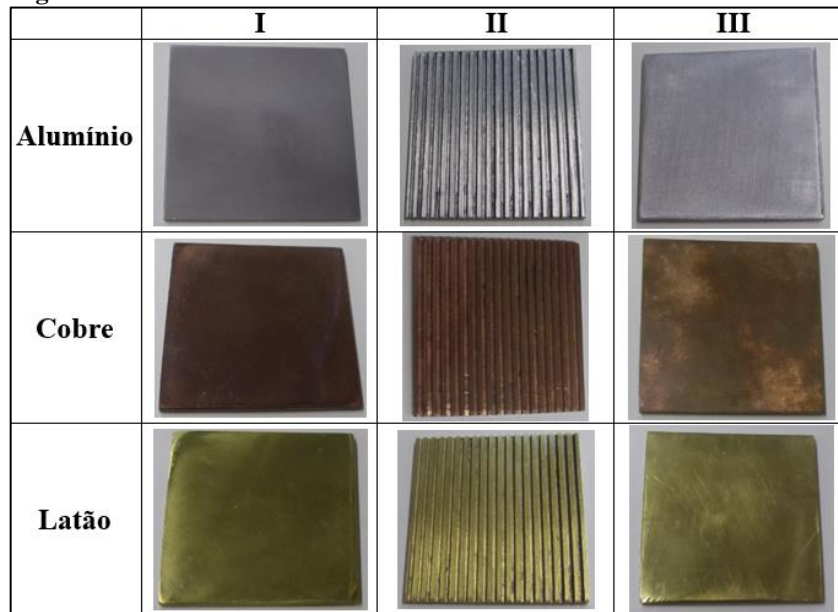
Na Tabela 4 é apresentado um resumo das amostras de alumínio (Figura 17), com os respectivos tratamentos superficiais.

Tabela 4 - Relação das amostras e respectivos tratamentos superficiais

Amostra	#	Tratamento Superficial	Característica Superficial
I	Lisa	Nenhum	Neutra
II	Ranhurada	Fresamento	Hidrofílica
III	Envernizada	Aplicação de verniz	Hidrofóbica

Fonte: Autoria própria.

Figura 17 - Placas utilizadas



Fonte: A autoria própria.

5.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram planejados com o objetivo de identificar os efeitos do materiais e tratamentos que compõe a superfície plana. As medições realizadas durante os experimentos foram:

- i) Medição dos parâmetros ambientais.
- ii) Medição da espessura da camada de gelo poroso na superfície fria.
- iii) Medição da temperatura na superfície da camada de gelo poroso.

5.3.1 Medição dos parâmetros ambientais

A temperatura ambiente e da superfície fria foram medidas por meio de termopares do Tipo T (cobre-constantan, *OmegaTM*), com fios de 0,254 mm de diâmetro cobertos por *teflon[®]* (*Omega Engineering*, EUA), fixados através de uma fita adesiva termosensível (*KaptonTM*). As pontas dos fios dos termopares foram soldadas no Laboratório de Tubos de Calor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina - Labtucal/EMC/UFSC, em Florianópolis.

A qualidade e a precisão necessárias para avaliação das temperaturas foram garantidas por meio da calibração de todos os termopares através do Calibrador *EINSTRUMENTSTM MultiCal 2500* (Fotografia 7).

Fotografia 7 - Calibrador *Multical 2500*



Fonte: Aatoria própria.

Para obtenção dos dados (valores de temperatura) foi utilizado o sistema de aquisição de dados *Agilent™ DAQ-34970A*, com 18 canais, um *notebook Dell™* e um *nobreak NHS™* modelo *Compact Plus III* de 1200 VA, vistos na Fotografia 8. Os dados foram gravados através do programa *Agilent Benchlink Data Logger 3*.

Fotografia 8 - Equipamentos utilizados para aquisição de dados

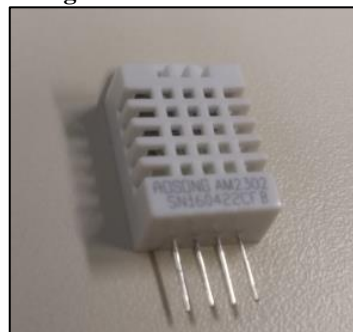


Fonte: Aatoria própria.

O sistema de aquisição de dados foi configurado para fornecer a temperatura instantânea em cada um dos pontos monitorados, na escala de graus Celsius [°C], a cada 5 segundos, a partir do início das medições.

A umidade relativa do ar foi medida por meio do Sensor de Umidade *DHT22 (AM2302)*, possuindo saída digital calibrada e encapsulamento simples com quatro terminais, como visto na Fotografia 9, tendo resolução de 0,1%.

Fotografia 9 - Sensor *DHT22*



Fonte: Aatoria própria.

A velocidade do ar na seção de teste foi verificada/medida por meio do Termo Anemômetro Digital Portátil ITAN 720, visto na Fotografia 10, com resolução de 0,1 m/s.

Fotografia 10 - Anemômetro Digital ITAN 720

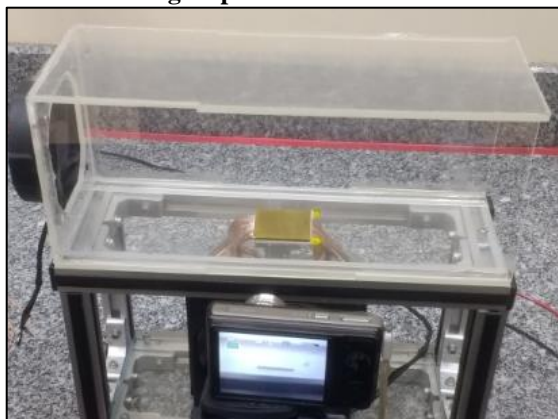


Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Medição da espessura da camada de gelo poroso

A medição foi realizada utilizando uma Câmera Digital *Sony™ Cyber-Shot DSC-W530* com 14.1 MP e 90 de DPI (pontos por polegada, do inglês *dots per inch*), posicionada perpendicularmente ao perfil da superfície de teste, fixada com auxílio de um tripé *Polaroid™*, permitindo ajustes e um ajuste fino em nivelamento, sendo acionada em relação aos intervalos de tempo pré-determinados, como visto na Fotografia 11.

Fotografia 11 - Processo de medição da espessura da camada de gelo poroso

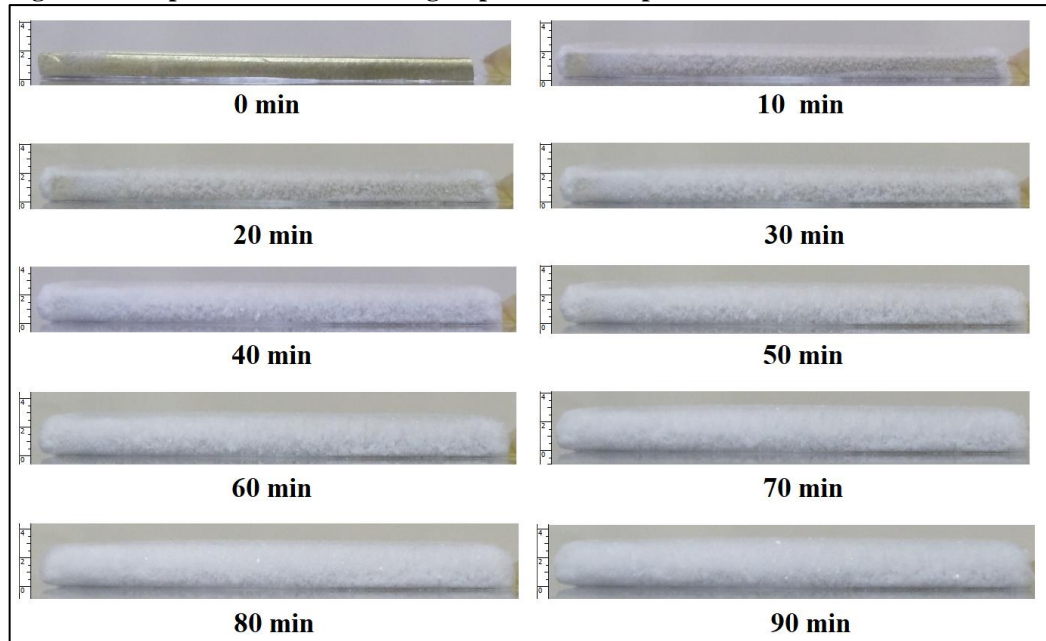


Fonte: Autoria própria.

Para a análise da espessura do gelo poroso foi utilizado o aplicativo *open-source software* ImageJ© no tratamento das imagens, fixando uma mesma escala de medição de acordo com as especificações da câmera digital utilizada, como resolução e DPI (*dots per inch*), o qual

fornece a largura e altura do arquivo de imagem, de forma a possibilitar a conversão de um comprimento, neste caso a altura, em pixels em milímetros, e permitindo, posteriormente, a sobreposição de todas as imagens, tendo como referência o tempo inicial, como exemplificado pela Figura 18.

Figura 18 - Espessura da camada de gelo poroso vs. tempo



Fonte: Autoria própria.

5.3.3 Medição da temperatura da camada de gelo poroso

As temperaturas da superfície da camada de gelo poroso foram medidas por meio da utilização do Termômetro Infravermelho *MinipaTM MT-330*, visto na Fotografia 12, que, de acordo com o fabricante, possui aplicabilidade para o intervalo de temperaturas variando de -60°C a 550°C.

Fotografia 12 - Termômetro Infravermelho *MinipaTM MT-330*



Fonte: Autoria própria.

Seu funcionamento baseia-se no conceito de emissividade característica, variando de acordo com o material onde será efetuada a medição, podendo ser ajustada no instrumento, que para caso do gelo, de acordo com o fornecedor, varia de 0,96 a 0,98, sendo adotado o valor intermediário de 0,97.

O tempo de resposta do aparelho é de 1 (um) segundo, dessa forma durante as medições, procurou-se efetuar as medidas no ponto central das placas nas quais ocorria a formação de gelo poroso, segundo o gatilho e por aproximadamente dez segundos e retirando o valor médio, disponibilizado pelo instrumento por meio da função *AVG*. As medições foram efetuadas três vezes, afim de garantir confiabilidade no procedimento de medição.

5.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS

As incertezas experimentais foram associadas às incertezas da espessura da camada de gelo poroso, das temperaturas, da umidade, da velocidade do ar e do tempo.

A obtenção de todas as incertezas de medição, são mostradas no Apêndice D, resultando nos valores mostrados pela Tabela 5. Desta forma, ressalta-se que todos dados coletados (resultados) nos testes experimentais apresentados no próximo capítulo possuem as incertezas indicadas de acordo com a mesmo.

Tabela 5 - Incertezas de medição

Parâmetro	Ferramenta de medição	Unidade	Incerteza
Espessura da camada de gelo poroso	Tratamento de Imagens	mm	±0,265
Temperatura ambiente	Termopar do Tipo T	° C	±0,5
Temperatura da superfície de gelo poroso	Termômetro Infravermelho	° C	±2,05
Temperatura da superfície fria	Termômetro Infravermelho	° C	±2,05
Tempo	Cronômetro Digital	s	±0,01
Umidade relativa do ar	Sensor <i>DHT22</i>	%	±5,0
Velocidade do ar	Anemômetro Digital	m/s	±0,215

Fonte: Autoria própria.

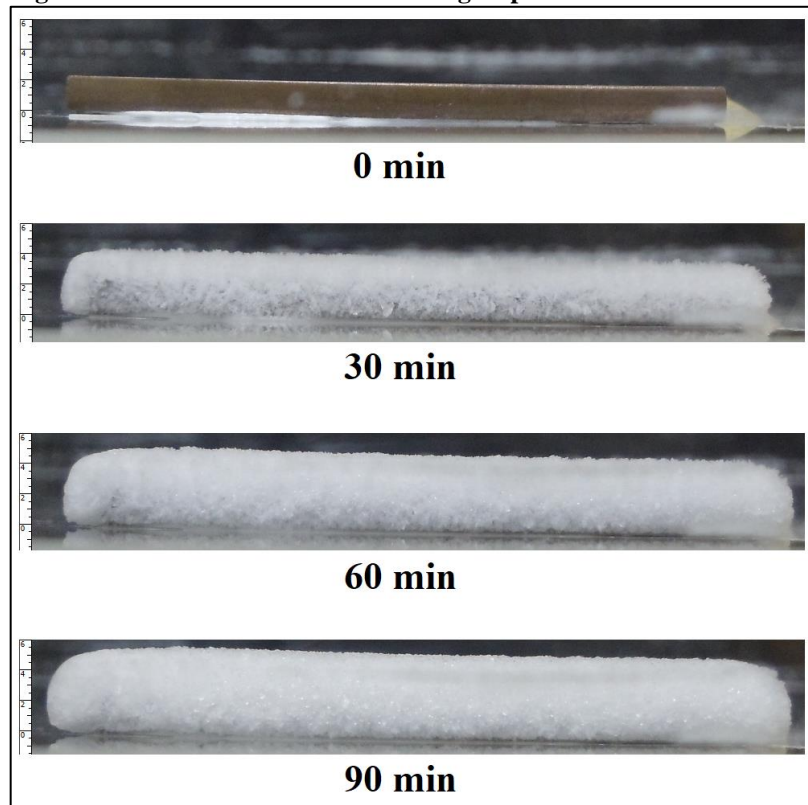
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais e numéricos do processo de formação de gelo poroso em placas planas, bem como a convalidação do modelo usado, ilustrados por meio de uma série de gráficos.

6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 19 demonstra o crescimento da camada de gelo poroso, tendo como superfície fria a placa de cobre, para os tempos de 0, 30, 60 e 90 minutos.

Figura 19 - Crescimento da camada de gelo poroso



Fonte: Autoria própria.

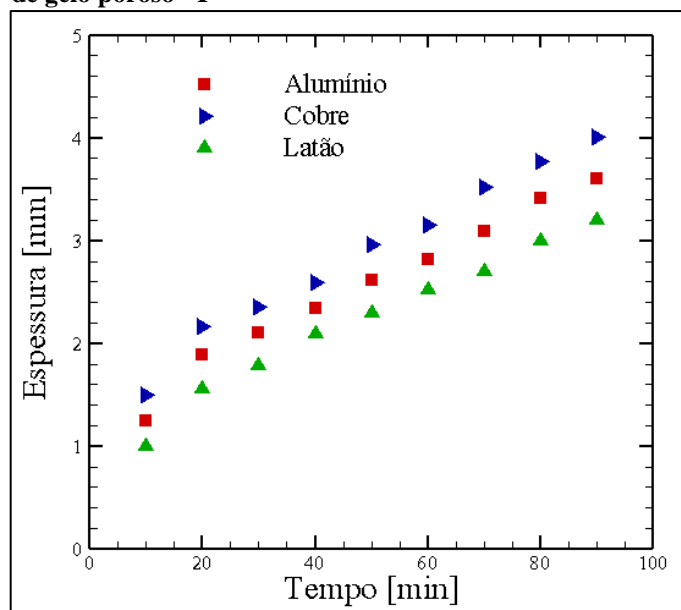
Nota-se que a espessura da camada de gelo poroso varia com o tempo, sendo mais evidente até os 60 minutos, uma vez que, no início do processo de formação e deposição o gradiente de temperatura entre a superfície fria e o fluxo da mistura de ar e vapor d'água é alto, e de baixa resistência térmica, os quais diminuem e aumentam, respectivamente, ao longo do tempo, tornando-a mais densa e conseqüentemente prejudicial em sistemas práticos.

Os resultados experimentais apresentados referem-se à espessura, à temperatura superficial e à velocidade de deposição da camada de gelo em placas alumínio, cobre e latão, com diferentes tratamentos superficiais (nenhum, fresamento e aplicação de verniz), comentados e discutidos a seguir.

6.1.1 Placa Lisa

O Gráfico 1 demonstra os resultados experimentais obtidos comparando as amostras de alumínio, cobre e latão, sem tratamento superficial específico (Lisa, I), referentes à formação da camada de gelo poroso, por meio do registro e acompanhamento periódico de suas espessuras (Fig. 18), ao decorrer de 10 (dez) minutos, com tempo final fixado em 90 (noventa) minutos, cujo os parâmetros ambientais encontram-se na Tabela 6.

Gráfico 1 - Variação experimental da espessura da camada de gelo poroso - I



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Parâmetros Ambientais - Placa Lisa (I)

Parâmetro	Unidade	Valor		
		Alumínio	Cobre	Latão
Temperatura ambiente	° C	17,93	17,08	17,67
Temperatura da superfície fria	° C	-20,00		
Umidade absoluta do ar	kg _{água} /kg _{arseco}	0,006296	0,005684	0,005927
Umidade relativa do ar	%	49,4	47,1	47,3
Velocidade do ar	m/s	0,5		

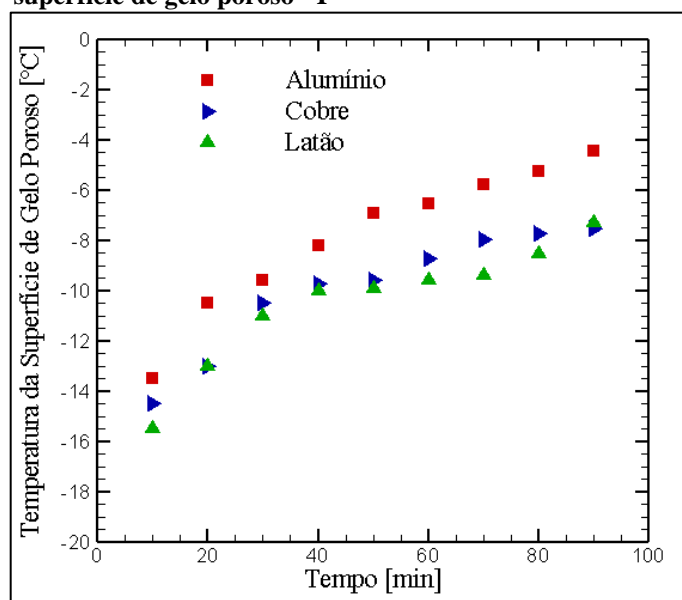
Fonte: Autoria própria.

Constata-se que durante a formação e o aumento da espessura da camada de gelo poroso, a condutividade térmica do material da superfície plana exerce grande influência, sobre o processo de transferência de calor por convecção que ocorre entre a superfície fria e o fluido em escoamento, intensificando a troca térmica, por meio do aumento da condutância térmica e diminuição da resistência térmica.

Os resultados apresentados no Gráfico 1 mostram boa concordância, em relação ao comportamento do aumento da espessura da camada de gelo poroso em razão do tempo com os resultados publicados na Literatura, por Liu et al. (2008) e Sommers et al. (2018).

No Gráfico 2 são mostrados os resultados experimentais referentes à temperatura da superfície de gelo poroso.

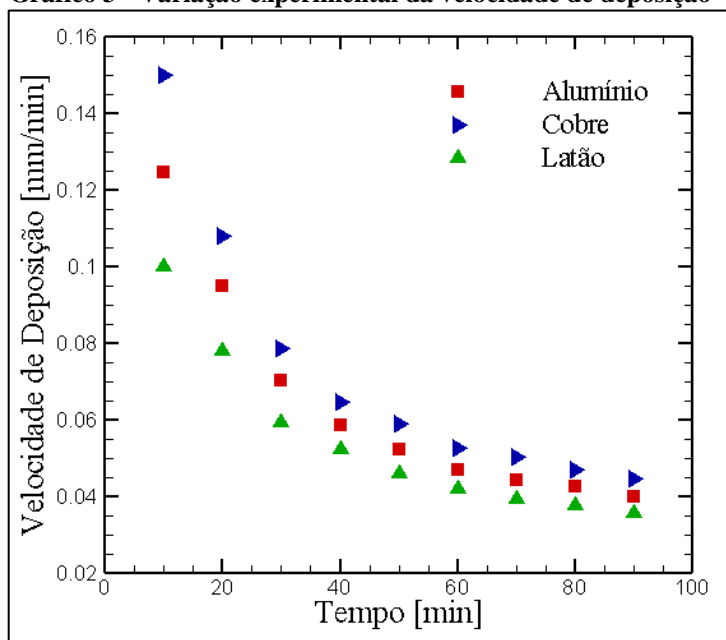
Gráfico 2 - Variação experimental da temperatura da superfície de gelo poroso - I



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que todas as amostras demonstram comportamentos semelhantes, visto que, a temperatura da superfície de gelo poroso tende a aumentar com o transcorrer do tempo, assim como mostrado por Sommers et al. (2016). Contudo, elas apresentam diferentes comportamentos devido a influência da condutividade térmica e características superficiais, sendo as maiores temperaturas obtidas pelo alumínio.

Através do registro das espessuras da camada de gelo poroso, pode-se encontrar a razão entre a posição da interface com o tempo, possibilitando a determinação da velocidade de deposição (frente de solidificação) da camada porosa, mostrada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Variação experimental da velocidade de deposição - I

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que nos instantes iniciais (10 minutos), o movimento da frente da interface é extremamente alto, diminuindo com o passar do tempo. No decorrer do processo, a camada de gelo formada se comporta como isolante, oferecendo uma resistência térmica para retirada de calor da fase líquida, diminuindo cada vez mais, tendendo a zero.

6.1.2 Placa Ranhurada

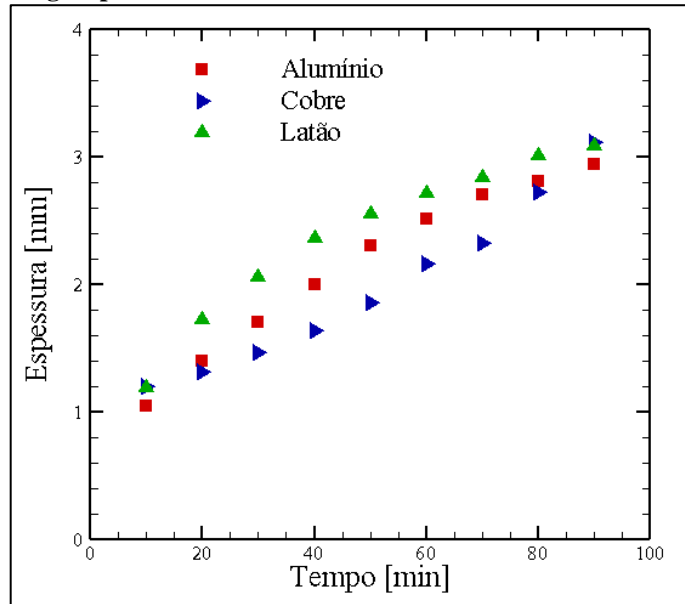
O Gráfico 4 demonstra os resultados experimentais obtidos por cada amostra Ranhurada (II, conforme a Tab. 4, caracterizada como hidrofílica), referentes à formação e aumento da espessura da camada de gelo poroso, tendo os parâmetros ambientais expostos na Tabela 7.

Percebe-se que durante a formação da camada de gelo poroso o aumento da espessura não se comporta de maneira proporcional ao aumento da condutividade térmica do material que constitui a superfície plana. Neste caso, é inversamente proporcional durante o intervalo contido entre 10 e 80 minutos.

Tal peculiaridade indica um comportamento distinto do esperado para uma superfície hidrofílica, possivelmente devido ao fato de que as ranhuras podem estar agindo como aletas ou depósitos de condensado, não permitindo repetibilidade dos testes.

O Gráficos 5 mostra os resultados experimentais referentes à temperatura da superfície de gelo poroso para as amostras ranhuradas.

Gráfico 4 - Variação experimental da espessura da camada de gelo poroso - II



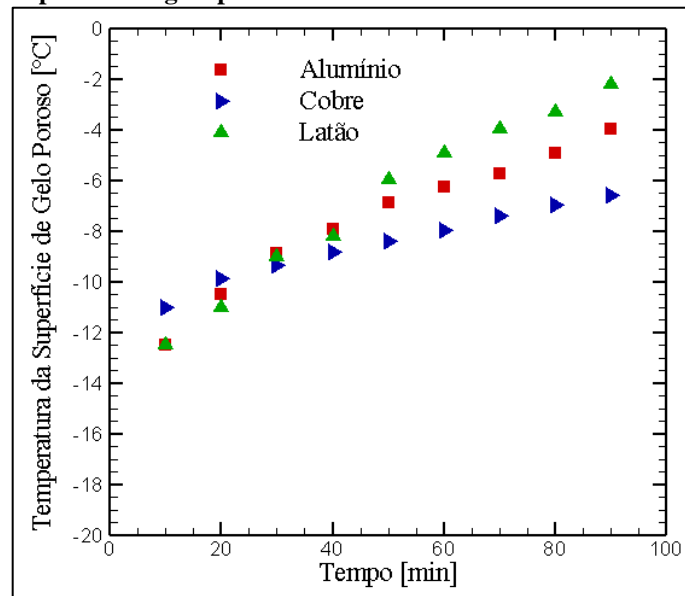
Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Parâmetros Ambientais - Placa Ranhurada (II)

Parâmetro	Unidade	Valor		
		Alumínio	Cobre	Latão
Temperatura ambiente	° C	18,84	18,61	18,17
Temperatura da superfície fria	° C	-20,00		
Umidade absoluta do ar	kg _{água} /kg _{arseco}	0,00677	0,00609	0,00699
Umidade relativa do ar	%	50,15	45,80	54,00
Velocidade do ar	m/s	0,5		

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 5 - Variação experimental da temperatura da superfície de gelo poroso - II

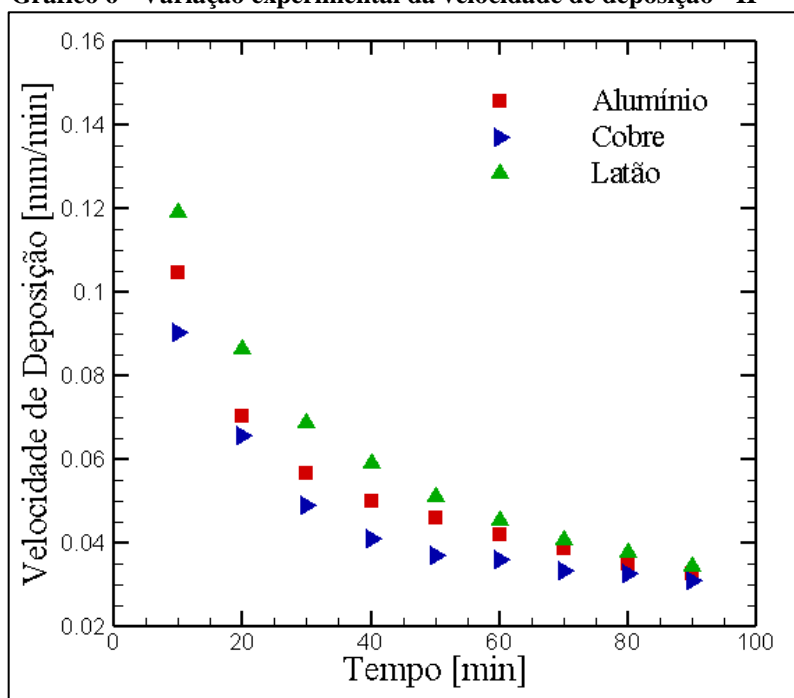


Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a possibilidade das ranhuras agirem como aletas é válida, uma vez que, a temperatura da superfície de gelo tende ao comportamento de estabilidade linear de acordo com valor da condutividade térmica do material de base, para cobre, alumínio e latão, a partir dos 10, 30 e 50 minutos respectivamente.

De maneira análoga ao Gráfico 3, o Gráfico 6 mostra a velocidade de deposição da camada porosa na amostra ranhurada, neste caso com comportamento inverso ao apresentado pelas amostras lisas.

Gráfico 6 - Variação experimental da velocidade de deposição - II



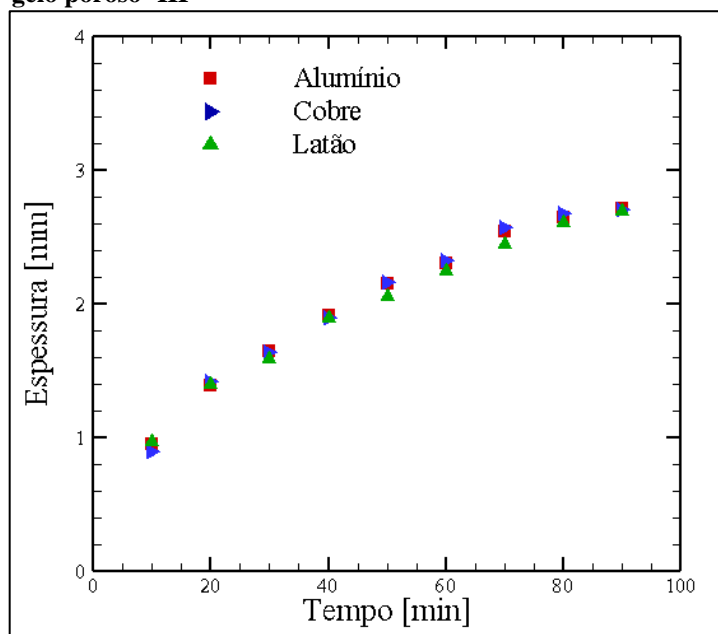
Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados experimentais, observa-se que a utilização de ranhuras para obtenção de superfícies hidrofílicas não se mostra adequada aos parâmetros ambientais e materiais utilizados, divergindo portanto, de comportamentos indicados na literatura.

6.1.3 Placa Envernizada

O Gráfico 7 demonstra os resultados experimentais de cada amostra Envernizada (III, conforme a Tab. 4, designada como hidrofóbica), referentes ao aumento da espessura da camada de gelo poroso, no intervalo de tempo de 10 (dez) minutos.

Gráfico 7 - Variação experimental da espessura da camada de gelo poroso -III



Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Parâmetros Ambientais - Placa Envernizada (III)

Parâmetro	Unidade	Valor		
		Alumínio	Cobre	Latão
Temperatura ambiente	° C	18,14	18,78	19,56
Temperatura da superfície fria	° C	-20,00		
Umidade absoluta do ar	kg _{água} /kg _{arseco}	0,005183	0,005784	0,006252
Umidade relativa do ar	%	40,20	43,08	44,30
Velocidade do ar	m/s	0,5		

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que o aumento da espessura da camada de gelo poroso em todas as superfícies ocorre do mesmo modo, com pequenos desvios, indicando que a envernização mostra-se apta em fornecer um comportamento próprio e característico ao fenômeno, independente do material de base utilizado, transferindo suas características térmicas ao mesmo.

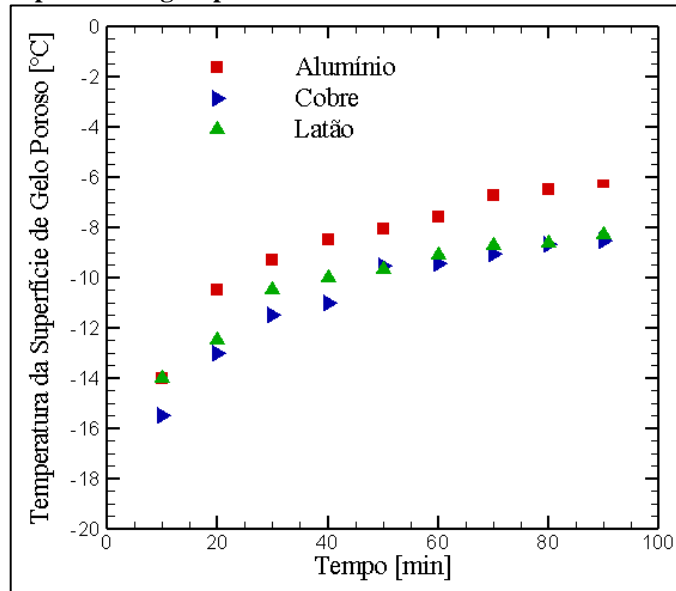
O Gráfico 8 mostra os dados experimentais da temperatura da superfície de gelo poroso obtidos pelas amostras envernizadas.

Assim, como visto nas superfícies lisas, nota-se que todas as amostras demonstram comportamentos semelhantes, no qual, temperatura da superfície de gelo poroso tende a aumentar com o passar do tempo.

O Gráfico 9 demonstra a velocidade de deposição da camada porosa presente na formação da camada de gelo porosa sobre a amostra envernizada, onde, percebe-se que da

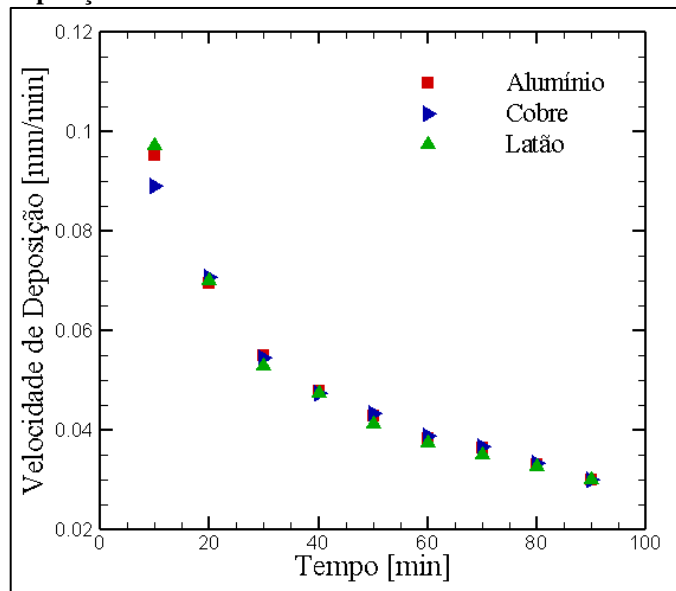
mesma forma que o aumento da camada de gelo poroso em todas as superfícies ocorre do mesmo modo, com pequenos desvios, o mesmo vale para a velocidade de deposição.

Gráfico 8 - Variação experimental da temperatura da superfície de gelo poroso - III



Fonte: Autoria própria.

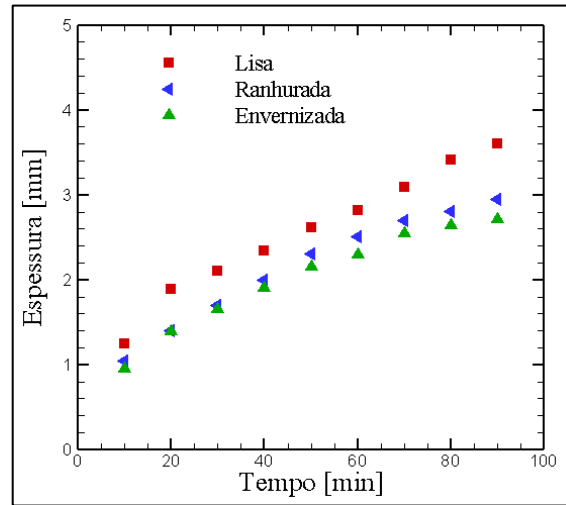
Gráfico 9 - Variação experimental da velocidade de deposição - III



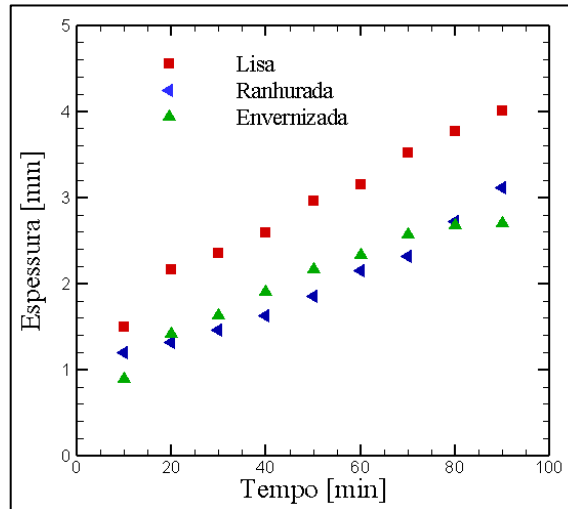
Fonte: Autoria própria.

6.1.4 Comparativo dos resultados experimentais

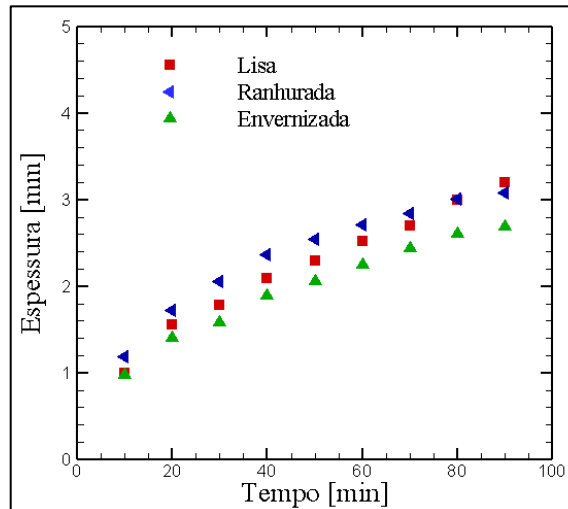
Os Gráficos 10 a 12 ilustram o comparativo entre os três tratamentos superficiais em relação a espessura de gelo poroso, para os materiais de base alumínio, cobre e latão, respectivamente.

Gráfico 10 - Placas de alumínio

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 11 - Placas de cobre

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 12 - Placas de latão

Fonte: Autoria própria.

Constata-se que independente do material de base as amostras lisas e envernizadas apresentam comportamentos semelhantes, com os resultados variando de acordo com a condutividade térmica do mesmo, no caso das lisas, e mantendo-se com valores próximos, no caso das envernizadas, possuindo em ambos os casos coerência e repetibilidade.

No caso das amostras ranhuradas, percebe-se que nos comportamentos apresentados não existe racionalidade ou logicidade de acordo com possíveis influências causadas pelos materiais de base ou parâmetros ambientais utilizados, não havendo possibilidade de previsões, como visto para o material de base latão, no qual a espessura da camada de gelo poroso se mostra maior até os 80 minutos, quando comparada com as amostras lisa e envernizada.

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Os resultados da análise numérica do segundo estágio de formação de gelo poroso são representados por meio de gráficos, sendo direcionados a formação e crescimento da camada de gelo poroso, referentes aos materiais alumínio, cobre e latão, variando-se suas respectivas condutividades térmicas (Tab. 3), durante as simulações.

Os parâmetros ambientais utilizados durante a análise numérica são mostrados na Tabela 9.

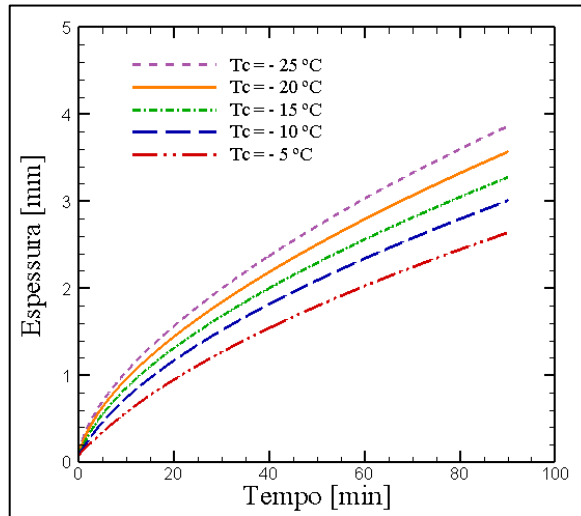
Tabela 9 - Parâmetros ambientais utilizados na análise numérica

Parâmetro	Unidade	Valor
Temperatura ambiente	K	291,15
Temperatura da superfície fria	K	253,15
Umidade relativa do ar	-	0,50
Velocidade do ar	m/s	0,50

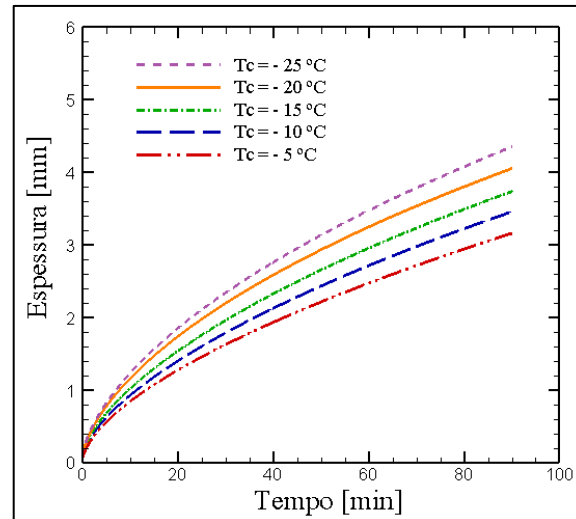
Fonte: Autoria própria.

Os Gráficos 13 a 15 e 16 a 18 permitem observar o comportamento da camada de gelo poroso para diferentes temperaturas de superfície fria (T_c) e ambientais (T_∞), respectivamente.

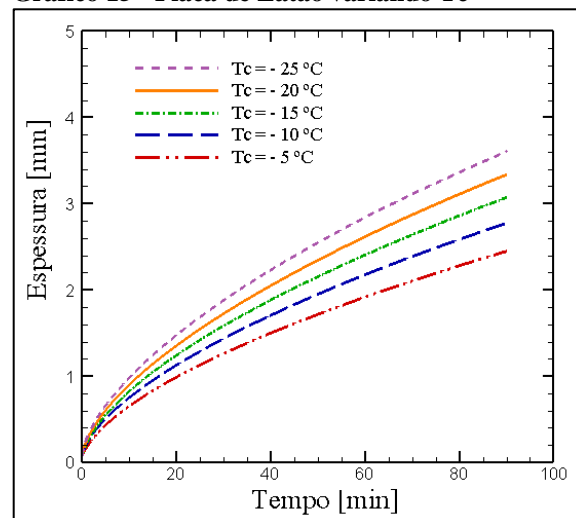
Nota-se que a espessura da camada de gelo é influenciada pela diferença de temperaturas entre a superfície fria e ambiente ao seu redor. Os resultados indicam que quanto menor o gradiente de temperatura resultante, menor será a camada de gelo poroso formada e da mesma forma, quanto maior for o valor, maior será a espessura da camada de gelo formada com o decorrer do tempo. Desta forma, ao fixar-se um dos parâmetros tem-se que T_c é inversamente proporcional e T_∞ diretamente proporcional ao aumento da espessura da camada de gelo poroso.

Gráfico 13 - Placa de Alumínio variando Tc

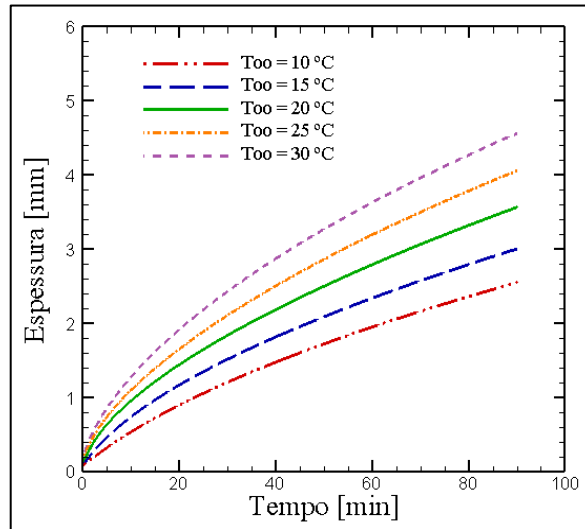
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 14 - Placa de Cobre variando Tc

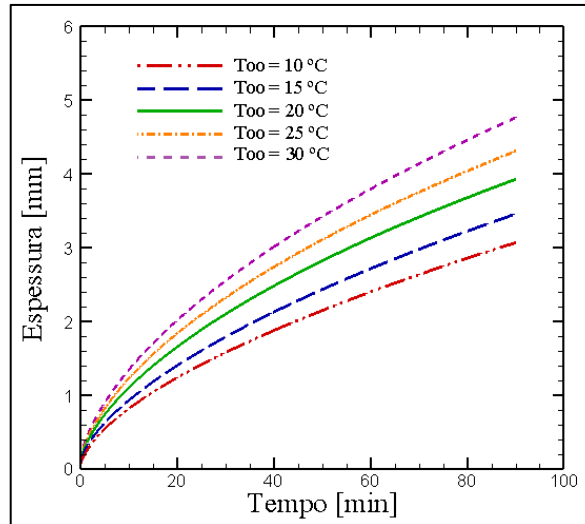
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 15 - Placa de Latão variando Tc

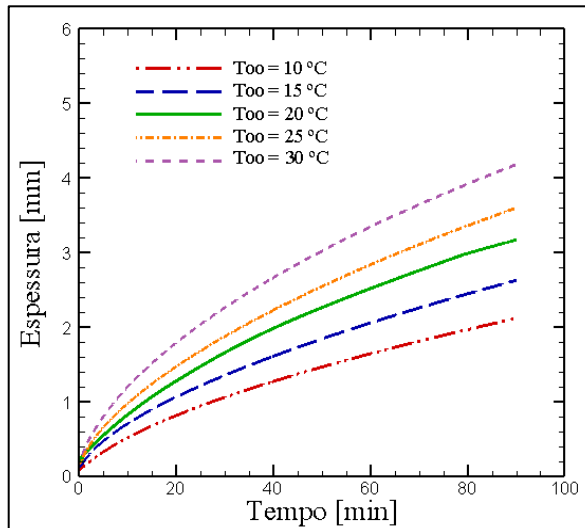
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 16 - Placa de Alumínio variando T_{∞} 

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 17 - Placa de Cobre variando T_{∞} 

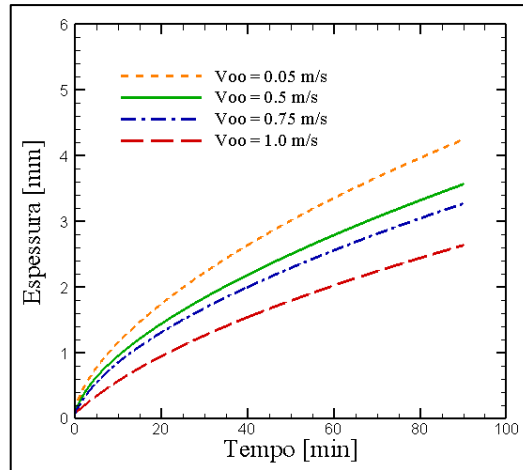
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 18 - Placa de Latão variando T_{∞} 

Fonte: Autoria própria.

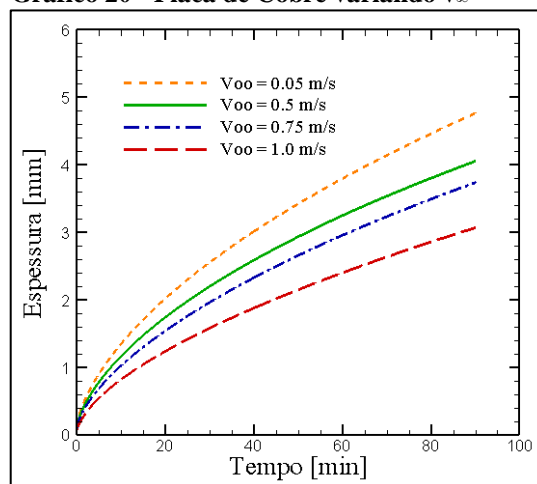
Os Gráficos 19 a 21 permitem observar o comportamento da camada de gelo poroso para velocidade do ar em escoamento (v_{∞}).

Gráfico 19 - Placa de Alumínio variando v_{∞}



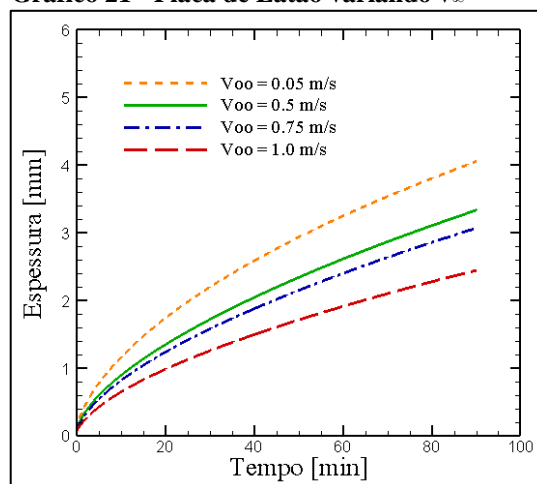
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 20 - Placa de Cobre variando v_{∞}



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 21 - Placa de Latão variando v_{∞}



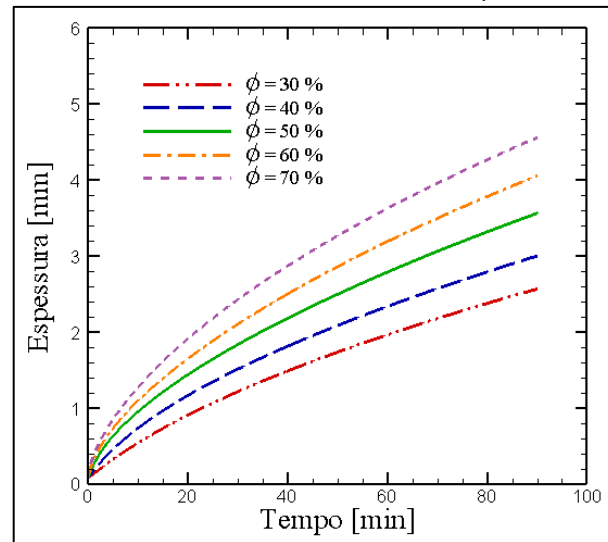
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o aumento da velocidade do ar resulta na redução na espessura da camada de gelo poroso, sendo inversamente proporcionais para todos os materiais testados. Inúmeros fatores podem ser atribuídos a esse fato, devido à complexidade do fenômeno.

Com aumento da velocidade de ar úmido tem-se o aumento da transferência de calor sensível entre o ar e a superfície fria e torna-se também mais difícil fixação das partículas recém-solidificadas sobre a superfície da camada de gelo, sendo facilmente levadas pelo fluxo de fluido em escoamento.

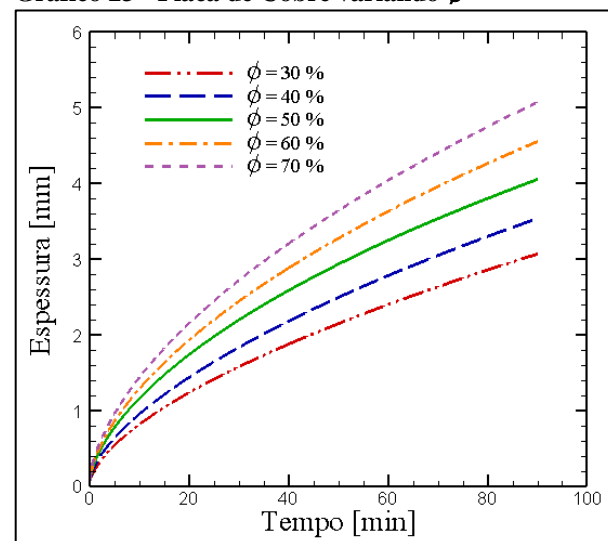
Por fim, os Gráficos 22 a 24 permitem observar-se o comportamento da camada de gelo poroso para diferentes umidade relativas (ϕ).

Gráfico 22 - Placa de Alumínio variando ϕ

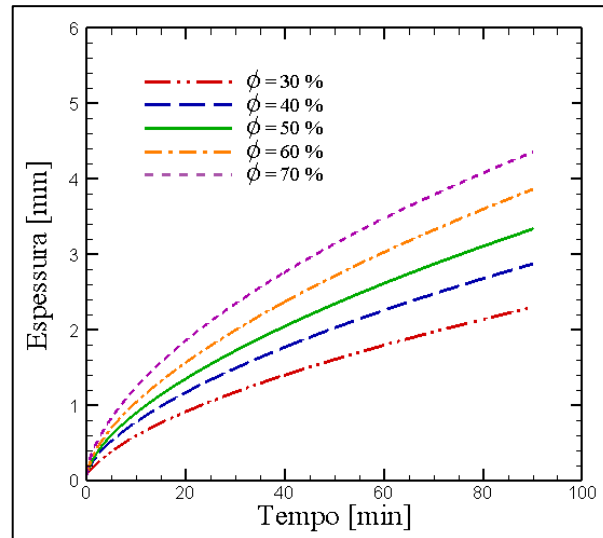


Fonte: Autoria própria.

Gráfico 23 - Placa de Cobre variando ϕ



Fonte: Autoria própria.

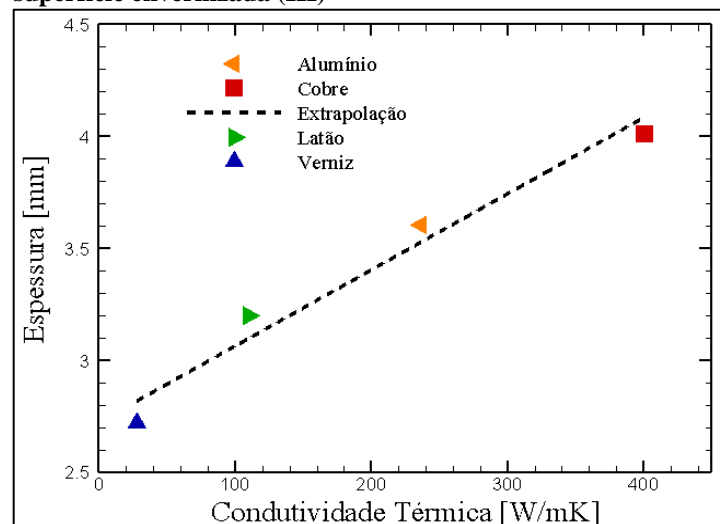
Gráfico 24 - Placa de Latão variando ϕ 

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que a umidade relativa do ar é diretamente proporcional a espessura da camada de gelo poroso, visto que, com o aumento de vapor de água consequentemente maior será sua disponibilidade, facilitando a formação de camadas mais espessas e densas.

As superfícies designadas envernizadas demonstram repetibilidade para ambos os materiais, desta forma, tendo como base as espessuras finais (δ_f) obtidas por cada material (superfícies lisas), optou-se por extrapolar um valor médio para a condutividade térmica efetiva (k_{oef}) presente na superfície envernizada, além do intervalo de observação, por meio de uma linha de tendências, visto no Gráfico 25, e utiliza-lo nas simulações posteriores, adotando-se por tentativa e erro o valor de 28 [W/mK], como visto na Tabela 10.

Gráfico 25 - Extrapolação da condutividade térmica efetiva da superfície envernizada (III)



Fonte: Autoria própria.

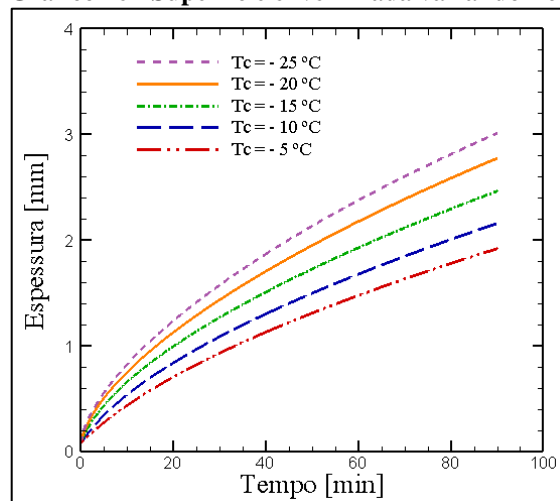
Tabela 10 - Dados de extrapolação da condutividade térmica efetiva da superfície envernizada (III)

Superfície	Espessura final [mm]	Condutividade térmica efetiva [W/mK]
Cobre	4,009	401
Alumínio	3,606	237
Latão	3,210	110
Envernizada	2,701	20 - 40

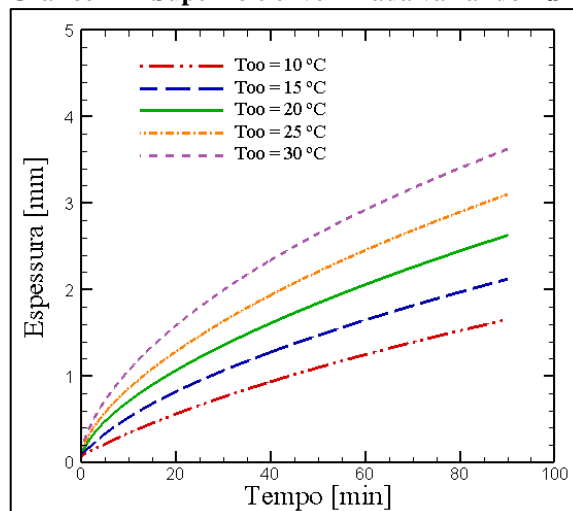
Fonte: Autoria própria.

Os Gráficos 26 a 29 demonstram os resultados numéricos referentes a formação e crescimento de gelo poroso na superfície envernizada, variando-se: T_c , T_∞ , ϕ e v_∞ .

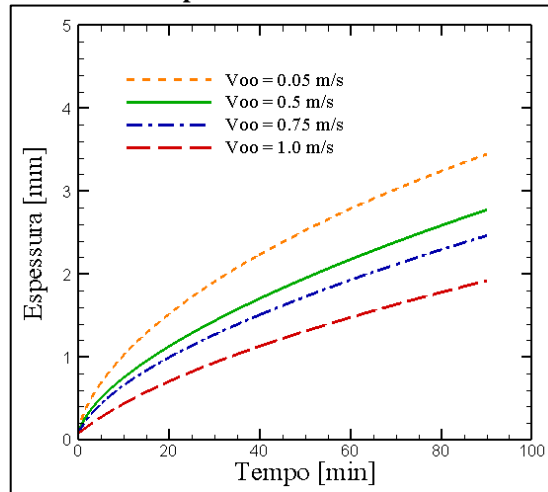
Constata-se que um comportamento semelhante aos anteriores (superfícies lisas) é atingido, ocorrendo as mesmas constatações em relação ao comportamento da espessura da camada de gelo poroso ao variar-se um dos parâmetros ambientais utilizados.

Gráfico 26 - Superfície envernizada variando T_c 

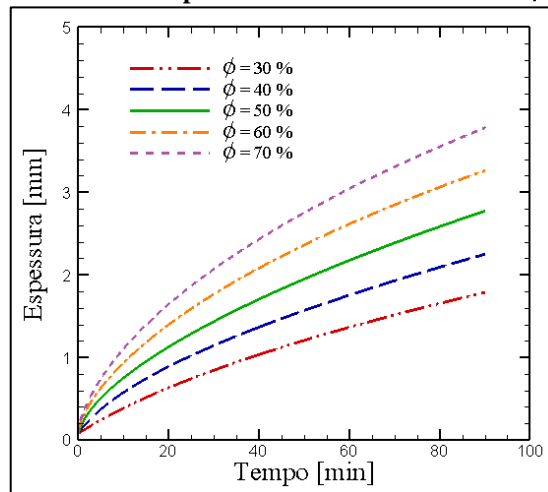
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 27 - Superfície envernizada variando T_∞ 

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 28 - Superfície envernizada variando v_{∞} 

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 29 - Superfície envernizada variando ϕ 

Fonte: Autoria própria.

A mesma analogia com o valor da k_{oef} não se aplica as superfícies designadas ranhuradas, pois, assim como discutido anteriormente, as mesmas não possuem repetibilidade, apresentando distintos comportamentos sem razão definida, não permitindo sua simulação por meio do modelo matemático utilizado.

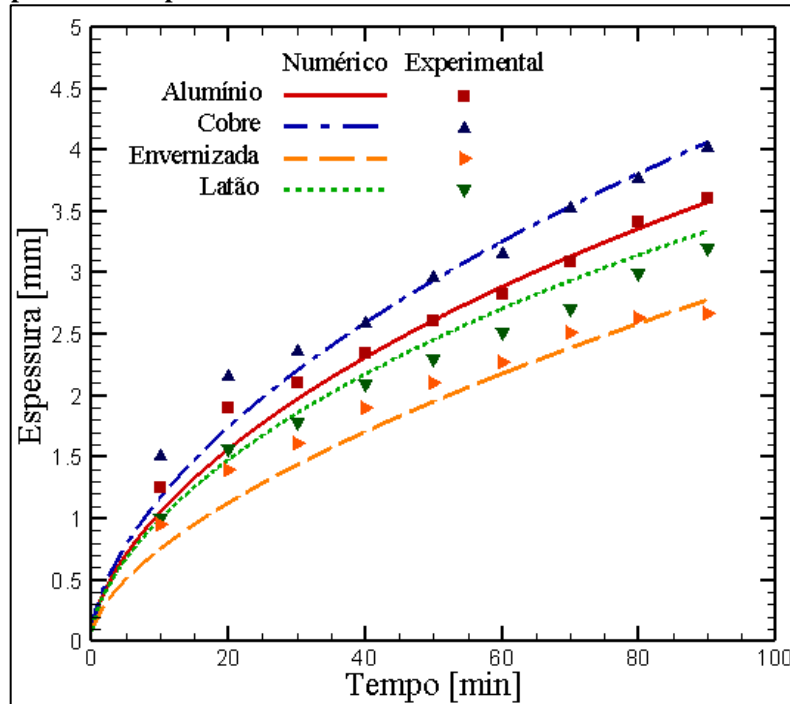
Por fim, nota-se que dentre as superfícies em estudo, tanto numérico ou experimental, a envernizada apresenta os menores valores de espessura de gelo poroso para os parâmetros ambientais e variações realizadas.

6.3 ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

Neste subcapítulo realiza-se a validação dos dados numéricos obtidos, com base nos modelos numéricos propostos por Sedano (1996) e Silva (2014), por meio dos dados experimentais coletados durante os testes.

O Gráfico 30 demonstra a espessura da camada de gelo poroso de acordo com o material de base das superfícies das placas planas, no qual, percebe-se que o comportamento se assemelha com o obtido experimentalmente.

Gráfico 30 - Análise numérica e experimental da formação de gelo poroso nas superfícies testadas



Fonte: Autoria própria.

Os Gráficos 31 a 33 permitem comparar os resultados experimentais com os obtidos numericamente, nas superfícies lisas (31, 32 e 33) e na envernizada (34), respectivamente.

Observa-se que o modelo matemático utilizado apresenta boa concordância com os resultados experimentais, sendo os maiores erros percentuais relativos de ~24% para amostra I de cobre para o tempo de 20 minutos e de ~23% na amostra I de alumínio no tempo de 10 minutos.

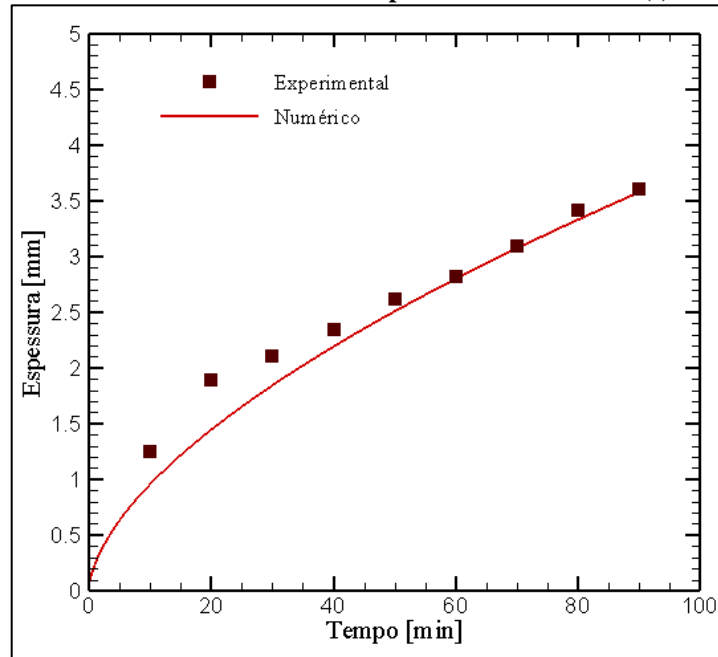
Conforme a literatura (trabalhos que utilizam o mesmo modelo) os maiores erros estão presentes nos primeiros intervalos de tempo, apresentando, de maneira geral, maiores desvios nos primeiros trinta minutos, provavelmente devido as condições iniciais do fenômeno utilizadas.

Notam-se algumas diferenças presentes nas curvas que preveem o crescimento da camada de gelo porosa nas amostras envernizadas e de latão (lisa), apresentando comportamento diferentes aos demais.

No caso da superfície de latão isto se deve, possivelmente, ao valor da k_{oef} utilizada, uma vez que existem diversas ligas, sendo adotada a mesma indicada por Incropera et al. (2008).

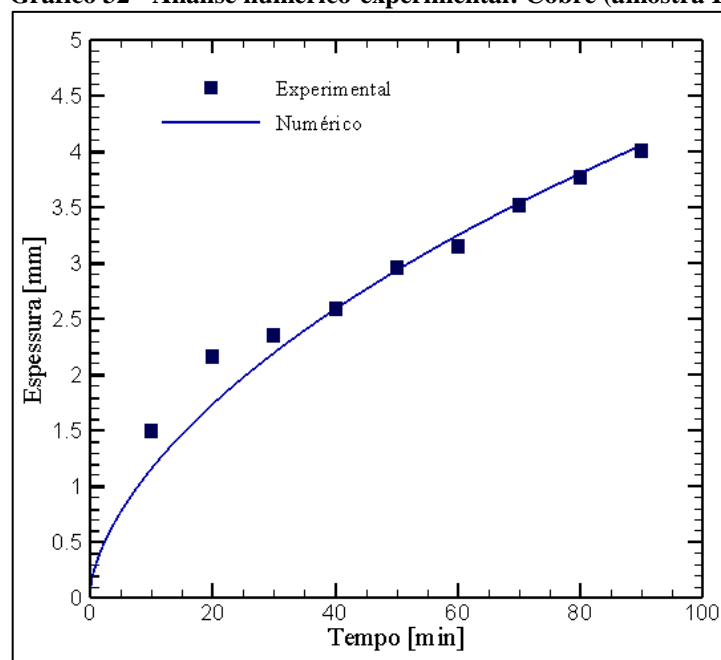
Para a superfície envernizada tem-se dois possíveis fatores que justificam os desvios, o valor da k_{eff} , assim como anteriormente, porém sendo o mesmo extrapolado nesta ocasião e também a tendência de estabilidade que percebe-se após o decorrer do tempo de 70 minutos, ressaltando-se que após o transcorrer de 90 minutos (tempo fixado) não foram realizados testes experimentais para validar o modelo.

Gráfico 31 - Análise numérico-experimental: Alumínio (I)

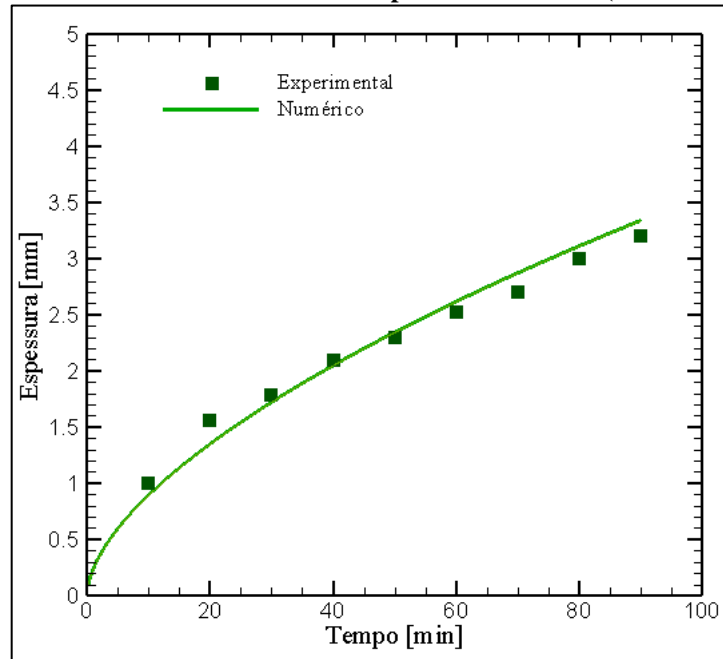


Fonte: Autoria própria.

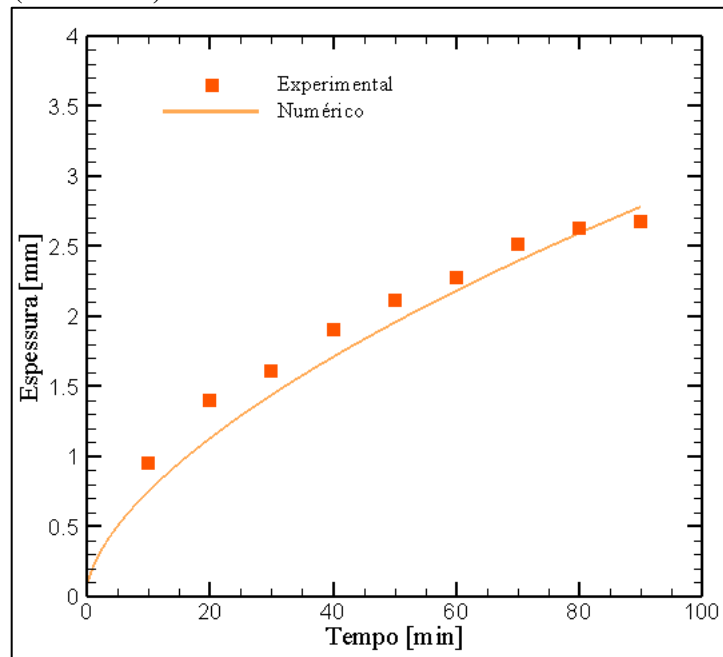
Gráfico 32 - Análise numérico-experimental: Cobre (amostra I)



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 33 - Análise numérico-experimental: Latão (amostra I)

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 34 - Análise numérico-experimental: Envernizada (amostra III)

Fonte: Autoria própria.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões, ressaltando as principais contribuições, seguidas por sugestões para realização de trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostra um estudo analítico numérico-experimental do uso de tratamentos superficiais na minimização da formação da camada de gelo poroso sobre superfícies planas.

Um aparato experimental de baixo custo foi idealizado e desenvolvido especificamente para essa Dissertação de Mestrado, mostrando-se apto em prover o fenômeno de formação de gelo poroso sobre superfícies planas.

Os resultados indicam uma boa concordância com a literatura, no que se refere ao comportamento da formação de gelo poroso e a velocidade de deposição.

Referente aos tratamentos superficiais utilizados, as amostras lisas e envernizadas apresentaram comportamentos coerentes e racionais, permitindo previsões numéricas, fato não visto nas superfícies ranhurada, as quais, mostram-se inaptas em prover superfícies hidrofílicas, demonstrando comportamentos incoerentes com os especificados pela literatura.

Os resultados indicam que a simples aplicação de verniz, a qual provê uma superfície hidrofóbica, resulta em uma efetiva diminuição na camada de gelo poroso, principalmente em matérias com alta condutividade térmica, uma vez que o mesmo transmite suas características e propriedades a superfície em questão.

Da análise numérica, de forma geral, pode-se concluir que o modelo matemático e o código numérico utilizados mostram-se capazes de predizer o aumento da espessura da camada de gelo poroso em superfícies planas de acordo com o material de base e os parâmetros ambientais utilizados, por meio da análise numérico-experimental realizada a partir da comparação com dados experimentais, tendo como maior erro percentual relativo ~24 % para o tempo de 20 minutos para a amostra I de cobre.

Por fim, ressalta-se que esta pesquisa traz uma contribuição para a ciência na medida em que os resultados numéricos e experimentais são compatíveis com os existentes na Literatura, podendo servir como suporte para novas investigações.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De maneira geral, encoraja-se estudos mais aprofundados, como:

- Aplicar melhorias na seção de teste do aparato experimental.
- Obter mais características e tratamentos superfícies.
- Analisar os efeitos do ângulo de contato.
- Estudar as características referentes a rugosidade das superfícies em teste.
- Implementar revestimentos constituídos por substâncias hidrofílicas ou hidrofóbicas.
- Desenvolver novos métodos de medição da espessura da camada de gelo poroso.
- Automatizar os processos de medição.
- Realizar testes experimentais com maiores durações.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE. (n.d.). **ASHRAE Handbook - Fundamentals (I-P Edition)**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2009.
- BRUS, G. et al. **Tortuosity of an SOFC anode estimated from saturation currents and a mass transport model in comparison with a real micro-structure**. *Solid State Ionics*, n. 265, p. 13-21, 2014.
- CAI, L. et al. Effects of different characteristic surfaces at initial stage of frost growth. *Journal of Central South University*, Berlin, n. 17, p. 413-418, 2010.
- CHENG, C.; SEKI, N. **Freezing and Melting Heat Transfer in Engineering: Selected topics on Ice-Water Sytems and Welding and Casting Processes**. 1 ed. New York: CRC Press, 815 f., 1991.
- DIETENBERGER, M. A. Generalized correlation of the water frost thermal conductivity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.26, n.4, 1983.
- FISCHER, S. K. et al. **Energy and Global Warming Impacts of Not in Kind and Next Generation CFC and HCFC Alternatives**. Washington, D.C.: Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS) and U.S. Department of Energy (DOE), 1994.
- HODAN, G. **Ice Cubes**. 1 arte, color, 1920 x 1275 px. Licença: CC0 Public Domain. Disponível em: <<http://www.publicdomainpictures.net/pictures/170000/velka/ice-cubes-1462093181CzQ.jpg>>. Acesso em: 7 abr. 2017.
- HUANG, L. et al. Effect of contact angle on water droplet freezing process on a cold flat surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Beijing, China, n. 40, p. 74-80, 2012.
- INCROPERA, F.P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6 ed. Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- ISMAIL, K. A. R. *et al.* Frost growth around a cylinder in a wet air stream. *International Journal Refrigeration*, v. 20, n. 2, 106-119, 1997.
- ISMAIL, K. ISMAIL, K. A. R. **Técnicas Experimentais em Fenômenos de Transferência**. 1 ed. Campinas, SP, 2000.
- KIM, H. et al. Microscopic observation of frost behaviors at the early stage of frost formation on hydrophobic surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, South Korea, n. 97, p. 861-867, 2016.

KIM, K; LEE, K. Frosting and defrosting characteristics of a fin according to surface contact angle. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, South Korea, n. 54, p. 2758-2764, 2011.

KINSARA, A. et al. Parametric study of an energy efficient air conditioning system using liquid desiccant. **Applied Thermal Engineering**, Kuwait, v. 18, n. 5, p. 327-335, 1997.

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

KOSHKINA, L. **Frost**. 1 arte, color, 1920 x 1275 px. Licença: CC0 Public Domain. Disponível em: <<http://www.publicdomainpictures.net/pictures/70000/velka/frost-patterns-on-windows-1387971944JG1.jpg>>. Acesso em: 5 abr. 2017.

LEE, Y. B.; RO, S. T. An Experimental Study of Frost Formation on a Horizontal Cylinder Under Cross Flow. **International Journal of Refrigeration**, 2001.

LIU, Z. et al. An experimental study of frost formation on cryogenic surfaces under natural convection conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Beijing, China, n. 96, p. 569-577, 2016.

LIU, Z. et al. An experimental study on minimizing frost deposition on a cold surface under natural convection conditions by use of a novel anti-frosting paint. part I. anti-frosting performance and comparison with the uncoated metallic surface. **International Journal of Refrigeration**, Beijing, china, n. 29, p. 229-236, 2006.

LIU, Z. et al. Frost formation on a super-hydrophobic surface under natural convection conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 25-26, p. 5975-5982, 2008.

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

MA, H. B.; PETERSON, G. P. Thermodynamic analysis of the influence of electric fields on frost formation. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, v. 9, n. 3, p. 562-564, 1995.

MORAN, M. J. et al. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7 th. Edition. Chichester: John Wiley, 2010.

NA, B.; WEBB, R. A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Pennsylvania, n. 43, p. 3797-3808, 2003.

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

NASCIMENTO JUNIOR, V. S. **Uma Correlação Semi-Empírica para a Densidade da Gead**. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

OKOROAFOR, E.; NEWBOROUGH; M. Minimising frost growth on cold surfaces exposed to humid air by means of crosslinked hydrophilic polymeric coatings. **Applied Thermal Engineering**, Bedford, UK, n. 15, p. 737-758, 2000.

PARISH, H. C. **A numerical analysis of frost formation under convection**. 1 th. The Ohio State University, 1970.

PIUCCO, R. O. **Análise Teórico-experimental Da Formação De Gead Em Refrigeradores Domésticos**. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008.

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

SCALON, V. L. **Formação de Gelo em Torno de Cilindros Verticais**. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

SEDANO, C. T. S. **Formação de Gelo em Placa Plana**. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

SILVA, D. L. **Análise da formação de gelo e gead e seu efeito no desempenho termo hidráulico de evaporadores do tipo tubo**. 198f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2012.

SILVA, M. N. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Apostila: ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, R. C. R. **Estudo Experimental e Numérico da Formação de Frost em torno de três Cilindros com Arranjo Triangular**. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

SOMMERS, A. D. et al. Densification of Frost on Hydrophilic and Hydrophobic Substrates - Examining the Effect of Surface Wettability. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 75, pp. 25-34, 2016.

SOMMERS, A. D. et al. The Role of Surface Wettability on Natural Convection Frosting: Frost Growth Data and a New Correlation for Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 122, pp. 78-88, 2018.

STOECKER, J. W.; JONES, J. W. **Refrigeração e Ar Condicionado**. McGraw Hill, São Paulo, SP, 1985.

SWANSON, M.; LIBBRECHT, K. G. Crystals grow quicker in e-fields. **Caltech Undergraduate Research Journal**, California, n.1, p. 48-53, 2001.

TAHAVVOR, A. et al. Modeling of frost growth on a horizontal circular cylinder under natural convection using fractal geometry analysis. **Transactions of Mechanical Engineering**, Islamic republic of Iran, v. 38, p. 1-8, 2014.

TAO, Y. X. *et al.* A mathematical model for predicting the densification and growth of frost on a flat plate. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Saskatoon, Canada, v. 36, n. 2, p. 353-363, 1993.

TAO, Y. X. et al. Characteristics of frost growth on a flat plate during the early growth period. **ASHRAE Transactions**, Chicago, Illinois, v. 99, p. 746-753, 1992.

TUDOR, V.; OHADI, M. The effect of stationary and sweeping frequency ac electric fields on frost crystal removal on a cold plate. **International Journal of Refrigeration**, USA, n. 29, p. 669-667, 2006.

WANG, C. et al. Some observations of the frost formation in free convection: with and without the presence of electric field. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Taiwan, v. 47, p. 3491-3505, 2004.

WANG, F. et al. Research of anti-frosting technology in refrigeration and air conditioning fields: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 81, p. 707-722, 2018.

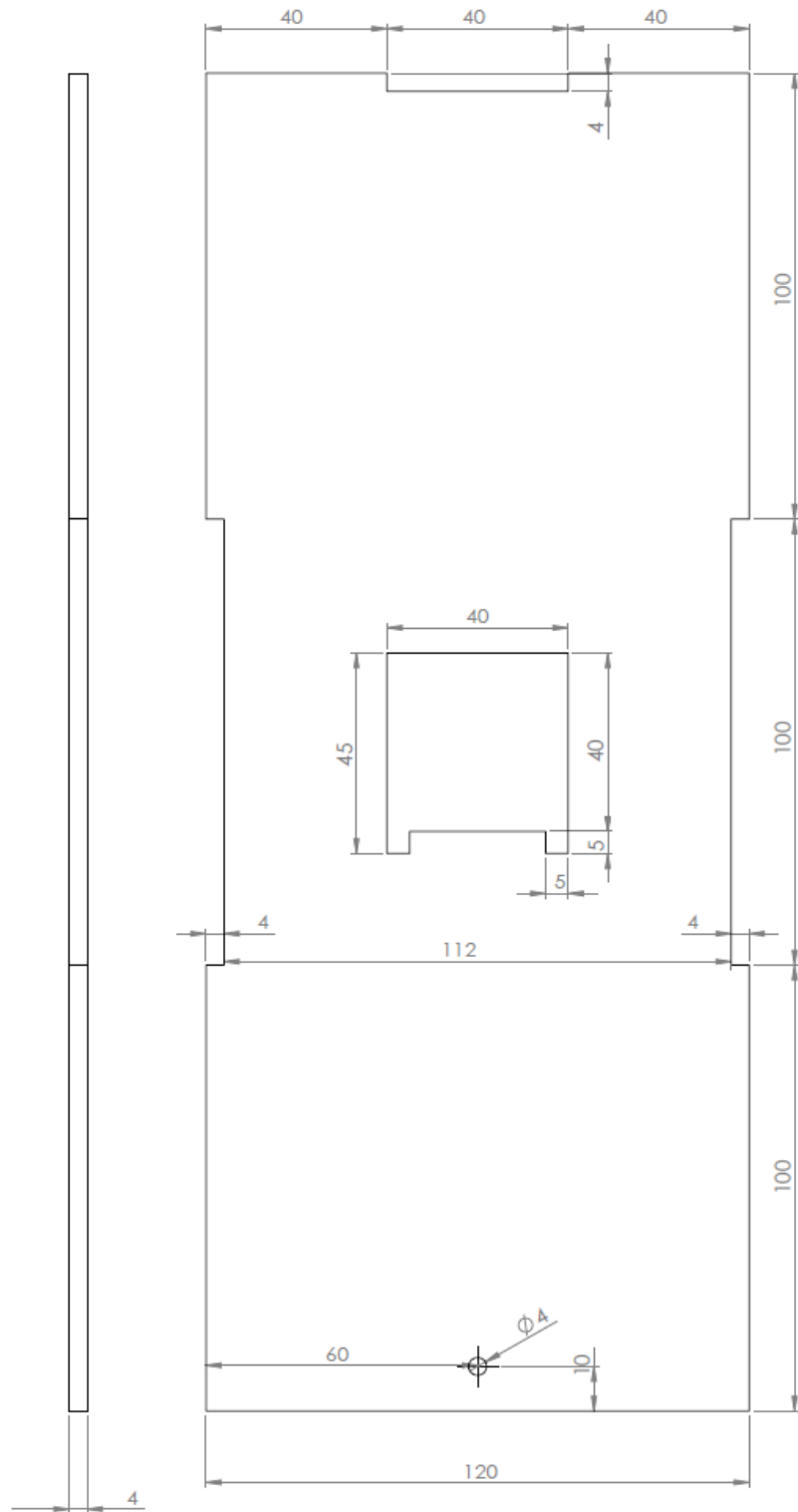
WANG, F. et al. Visualization study of the effect of surface contact angle on frost melting process under different frosting conditions. **International Journal of Refrigeration**, Nanjing, China, n. 64, p. 143-151, 2016.

WELTY, J.R. et al. **Fundamentals of momentum, heat and mass transfer**. 5 th. Edition. John Wiley & Sons, 2008.

WHITAKER, S. Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying. V. 13, p. 119-203. **Academic Press**, New York, 1977.

ZHANG, X.; LI, X.; CHEN, M. Role of the electric double layer in the ice nucleation of water droplets under an electric field. **Atmospheric Research**, China, n. 178, p. 150-154, 2016.

APÊNDICE A - DESENHOS TÉCNICOS: SEÇÃO DE TESTES



NOME:

Felipe Mercês Biglia

TÍTULO:

Base - Peltier

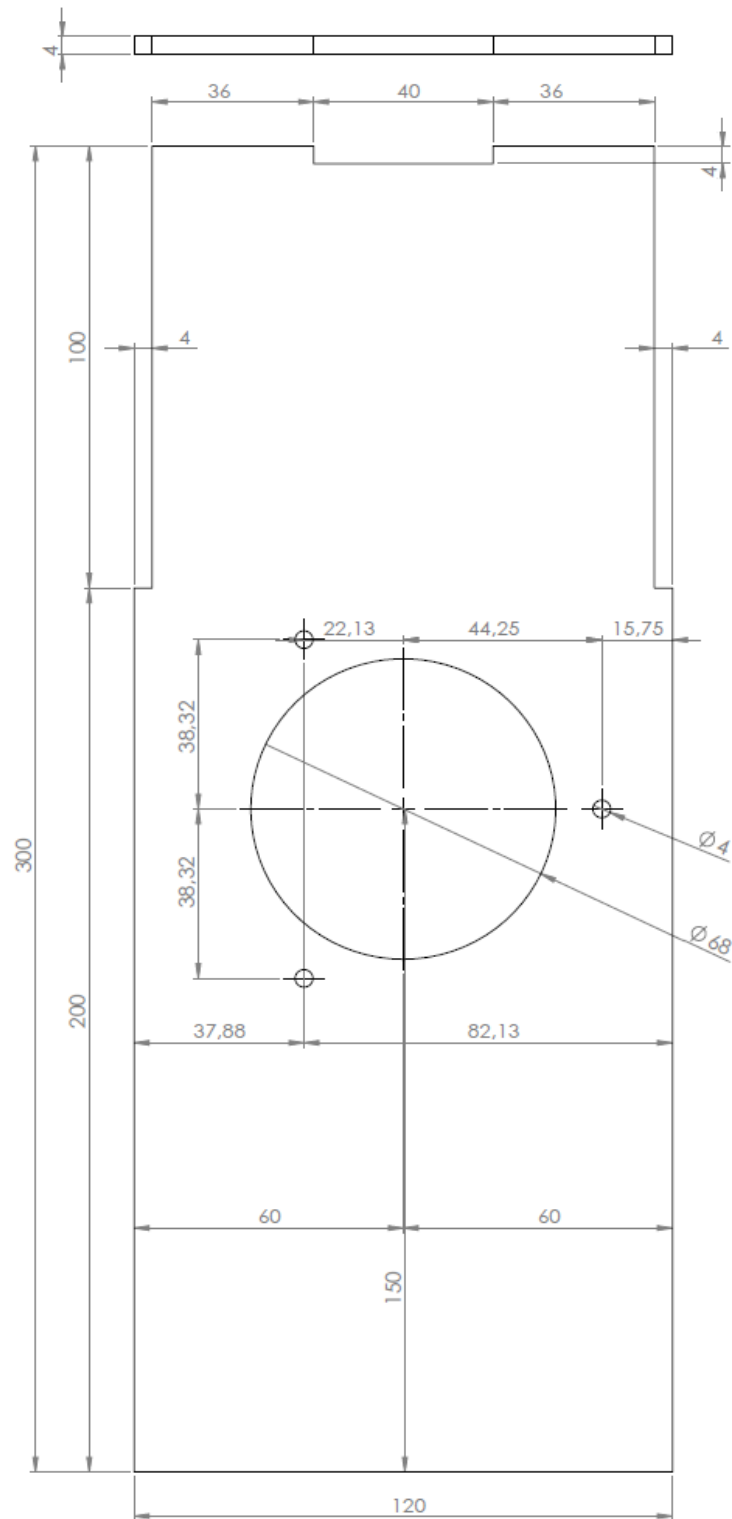
UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ESCALA: 1:2

MATERIAL: Acrílico

UNIDADE: mm

FOLHA 1 DE 6



NOME:

Felipe Mercês Biglia

TÍTULO:

Topo

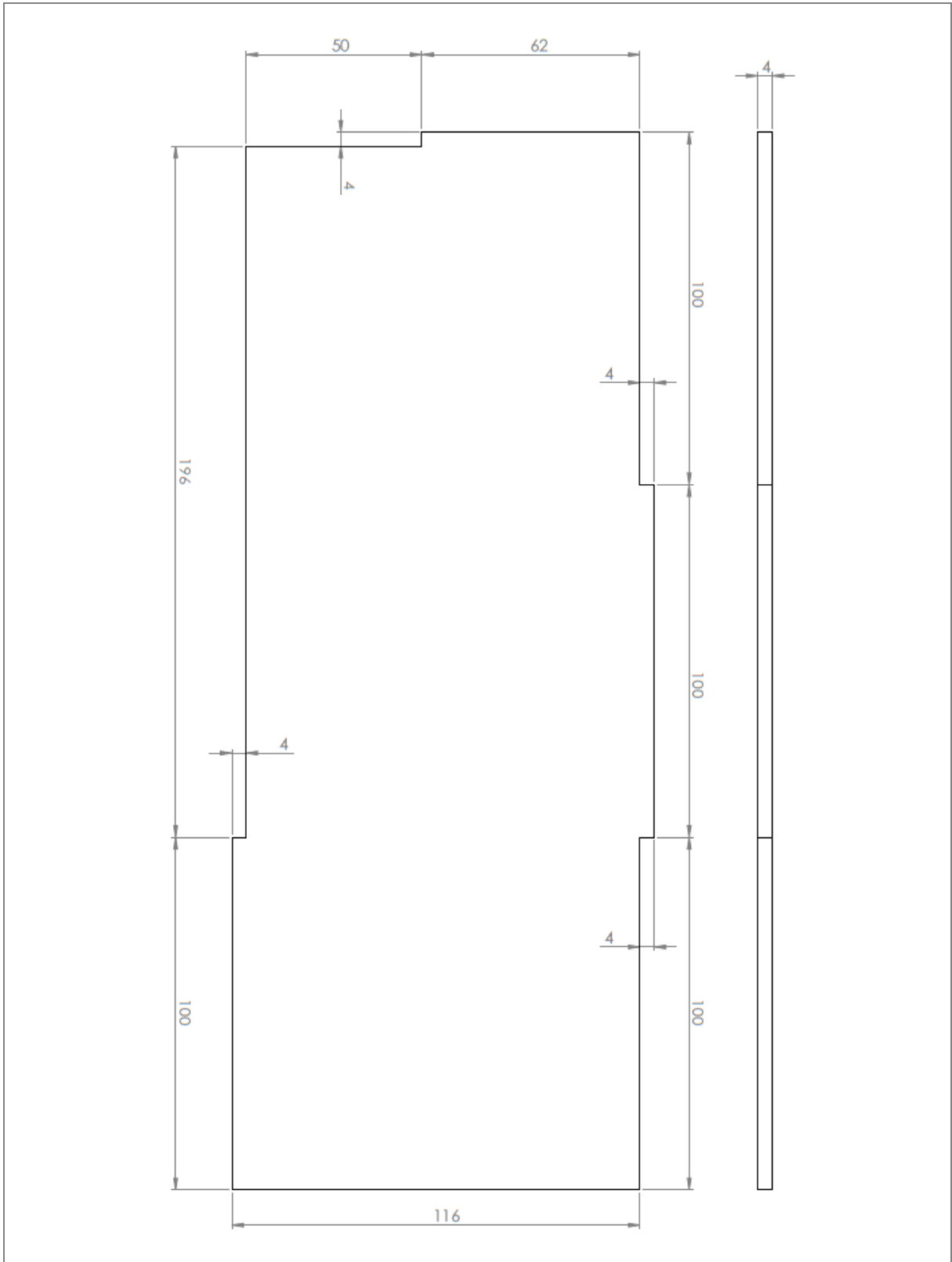
UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

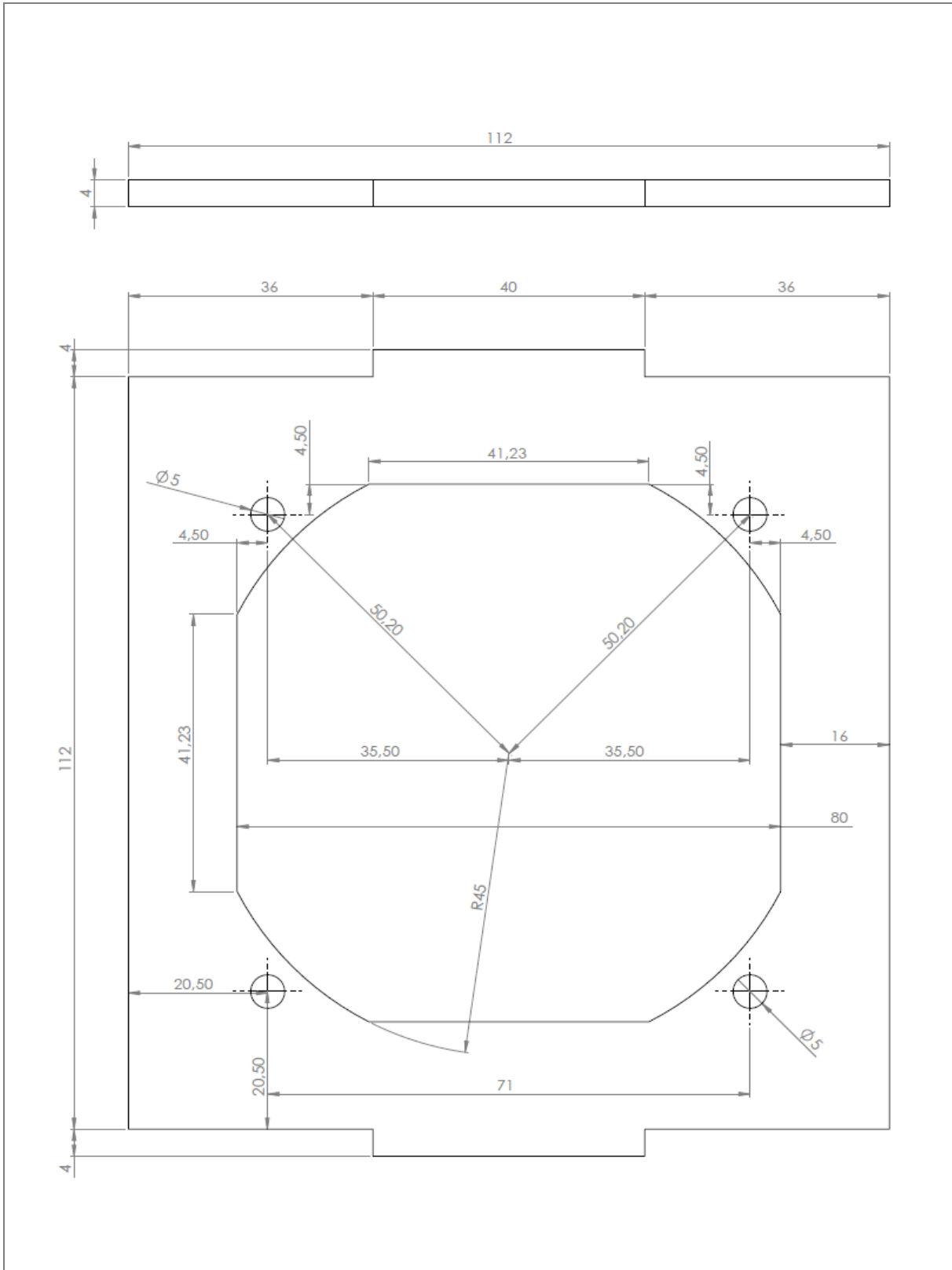
ESCALA: 1:2

MATERIAL: Acrílico

UNIDADE: mm

FOLHA 2 DE 6

**NOME:****Felipe Mercês Biglia****TÍTULO:****Laterais****UTFPR**
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**ESCALA: 1:2****MATERIAL: Acrílico****UNIDADE: mm****FOLHA 3 DE 6**



NOME:

Felipe Mercês Biglia

TÍTULO:

Lateral - Aberta

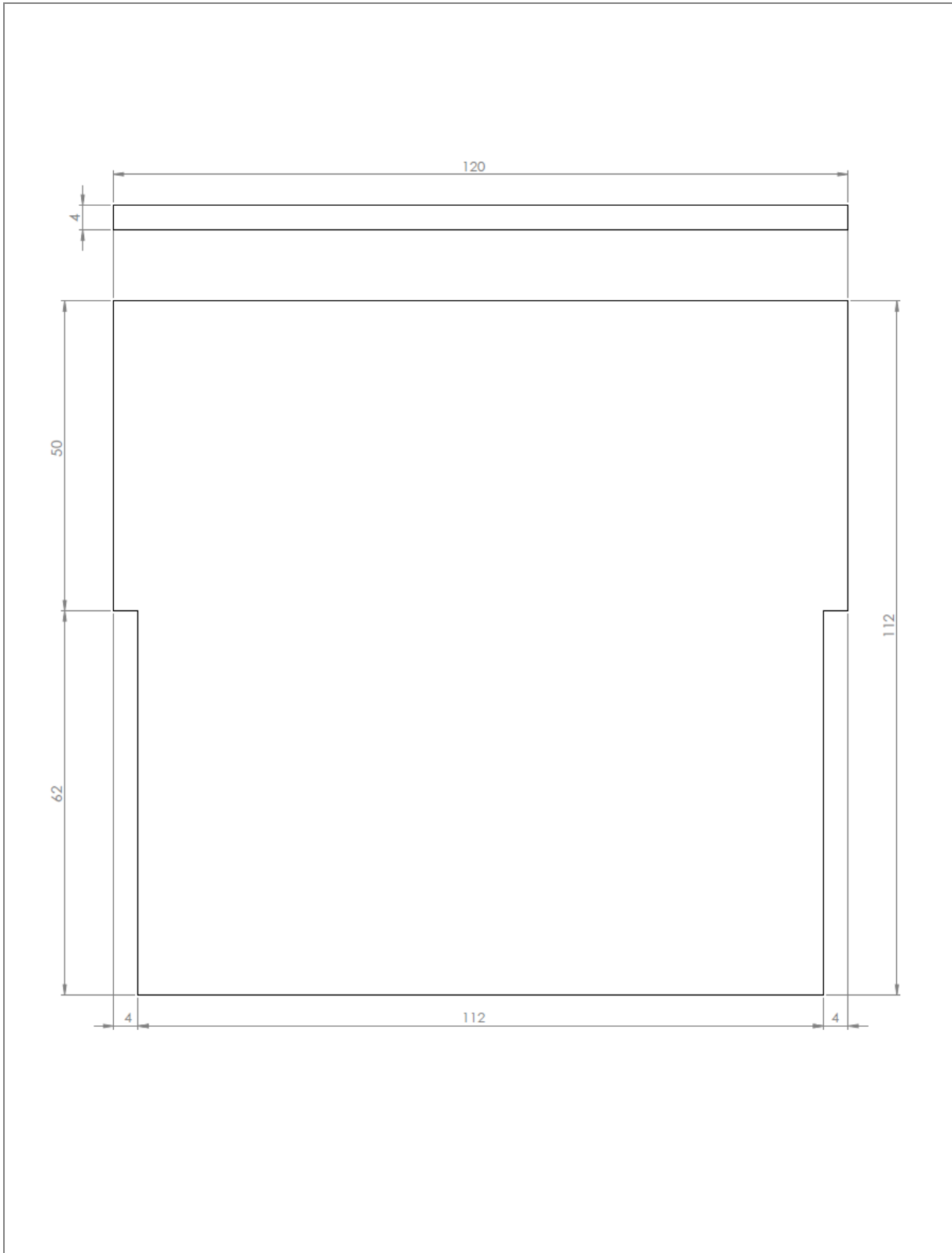
UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ESCALA: 1:2

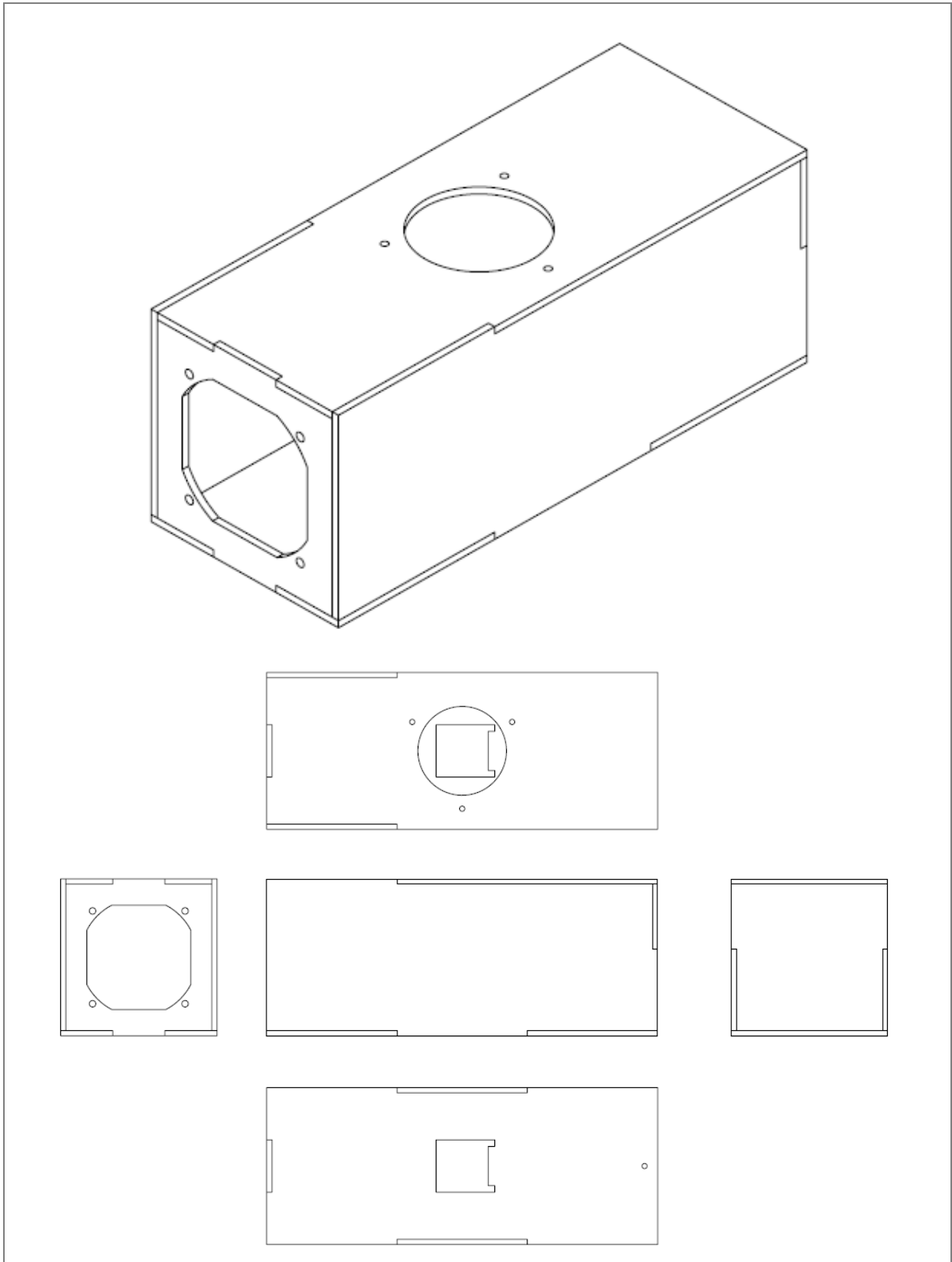
MATERIAL: Acrílico

UNIDADE: mm

FOLHA 4 DE 6



NOME: Felipe Mercês Biglia		TÍTULO: Lateral - Fechada
	ESCALA: 1:2	FOLHA 5 DE 6
	MATERIAL: Alumínio	
	UNIDADE: mm	



NOME:

Felipe Mercês Biglia

TÍTULO:

Montagem

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ESCALA: 1:5

MATERIAL: Acrílico

UNIDADE: mm

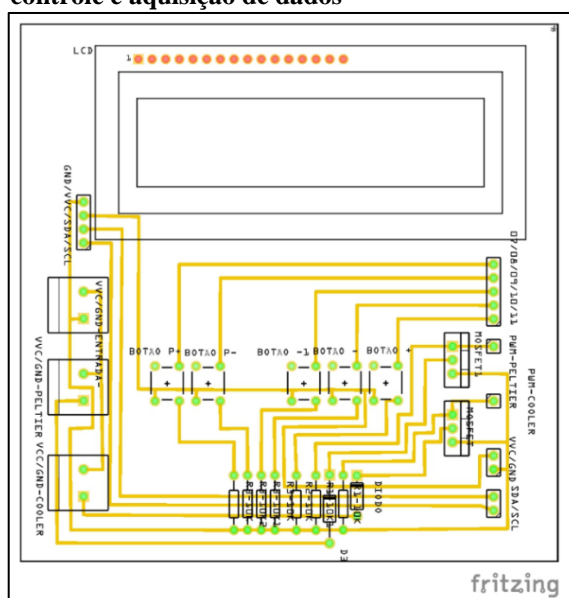
FOLHA 6 DE 6

APÊNDICE B - SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste apêndice, é apresentado o projeto para construção do sistema de controle e aquisição de dados (Fotografia 3).

A placa de circuito utilizado no sistema de controle e aquisição de dados, cujo projeto encontra-se na Figura 20, demonstra todas as interligações eletrônicas entre os componentes, feito por meio do programa de código aberto (*open-source*) *Fritzing*®, que é destinado à criação de esquemas e diagramas eletrônicos, prototipagem e *layout* de placas de circuito impresso (*PCB*, do inglês *printed circuit board*).

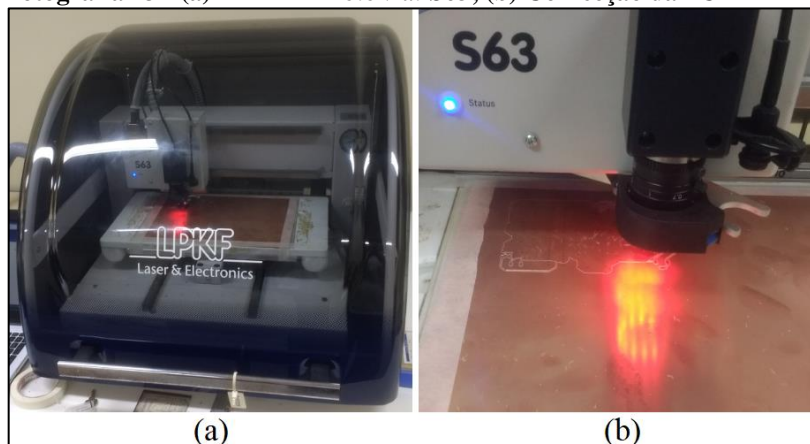
Figura 20 - Projeto base da *PCB* do sistema de controle e aquisição de dados



Fonte: Autoria própria.

A confecção (aquisição) da placa de prototipagem utilizada se deu por meio da *LPKFTM ProtoMat S63*, mostrada pela Fotografia 13 (a), e em funcionamento na (b).

Fotografia 13 - (a) *LPKFTM ProtoMat S63*, (b) Confecção da *PCB*



Fonte: Autoria própria.

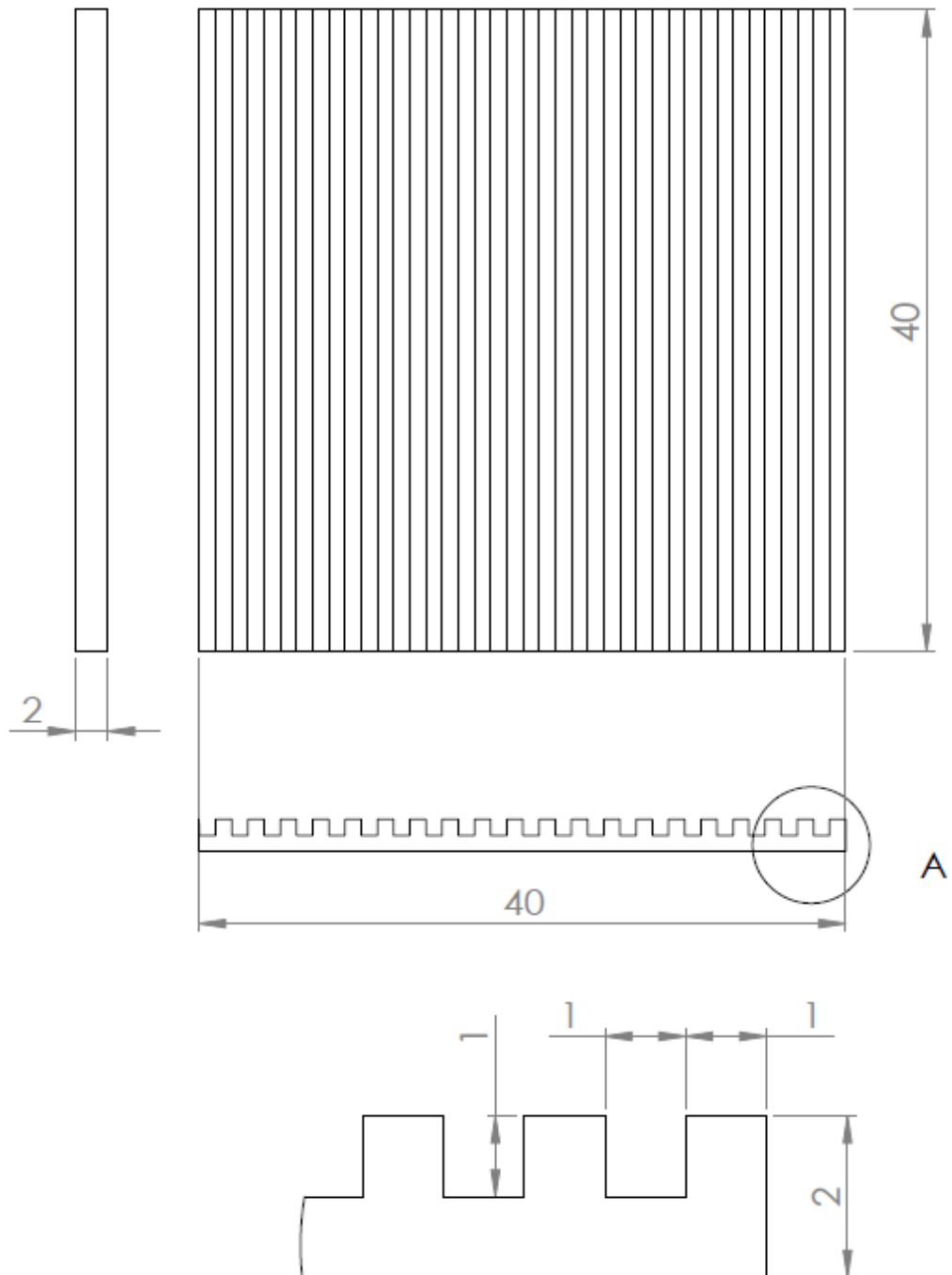
Um resumo com todos os componentes utilizados, quantidades e funções referentes ao projeto e aplicação em questão são mostrados pela Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo dos componentes utilizados

Componente	Quantidade	Função
Borne KRE 2 vias	3	Alimentação e saída
Botão <i>Push Button</i>	5	Interação homem-máquina
Diodo 1N004	2	Impede que a corrente aplicada prejudique o sistema
<i>Display LCD 16x2</i>	1	Interface homem-máquina
Transistor <i>MOSFET</i> canal N 6N60C	2	Controlar a tensão de saída utilizando a porta <i>PWM</i> do Arduino©
Resistor de 10 k Ω	7	Protege a porta digital do Arduino©
Soquete de Barra 1x10 MCI 180° Graus passo 2,54 mm	1	Facilitar as conexões

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C - DESENHO TÉCNICO: PLACA RANHURADA



DETALHE A
ESCALA 10 : 1

NOME:

Felipe Mercês Biglia

TÍTULO:

Placa Ranhurada

UTFPR
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ESCALA: 5:1

MATERIAL: Indefinido

UNIDADE: mm

FOLHA 1 de 1

APÊNDICE D - CÁLCULO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Este Apêndice tem como objetivo apresentar as incertezas experimentais associadas a espessura da camada de gelo poroso, temperatura, velocidade, umidade e tempo, obtidos por diferentes instrumentos.

De acordo com Ismail (2003), medidas experimentais de grandezas como comprimento, temperatura, velocidade, umidade, tempo, entre outras, sempre apresentarão variações se elas forem repetidas várias vezes, mesmo utilizando instrumentos extremamente precisos.

Assim, a análise de incerteza consiste em quantificar a validade dos dados e sua exatidão possibilitando a estimativa do erro aleatório presente nos resultados experimentais, sendo o erro definido como a diferença entre o valor real e o indicado (ISMAIL, 2000).

Os instrumentos de medição utilizados durante os procedimentos experimentais desta pesquisa são do tipo direta, nas quais utiliza-se a observação visual para obter os valores medidos, ou seja, não há a necessidade de cálculos para obtenção de dados, desta forma, a incerteza de medição, na maioria dos casos é a indicada pelo fabricante, sendo, geralmente informada no manual do equipamento ou obtida com base na precisão do mesmo.

D.1 - INCERTEZA DA ESPESSURA DA CAMADA DE GELO POROSO

O método utilizado para medir a camada de gelo poroso foi através do tratamento de imagens obtidas por meio da Câmera Digital *SonyTM Cyber-Shot DSC-W530* com 14.1 MP e 90 DPI. A medição nesse caso é do tipo direta, ou seja, a incerteza vai ser a mesma da escala presente no aplicativo *open-source software ImageJ*®, o qual permite a conversão do comprimento referente a altura em pixels para milímetros, que nesse caso é de $\pm 0,265$ mm.

D.2 - INCERTEZA DAS TEMPERATURAS

A medição da temperatura ambiente e da superfície da camada de gelo poroso, foi efetuada por meios da utilização de um termômetro infravermelho e por termopares, respectivamente.

Em relação ao Termômetro Infravermelho *MinipaTM MT-330*, a incerteza de medição considerada foi a mesma informada no manual, a qual, como indicado pelo fabricante, para o intervalo de temperaturas contidas de -60°C a 0°C é de $\pm 2,05^{\circ}\text{C}$.

No caso dos termopares, optou-se pela utilização do Tipo T (cobre-constantan), que, além de possuir a melhor exatidão entre os termopares de metal base, é adequado para medições contínuas de -270°C a 370°C , cuja a incerteza calculada após o procedimento de calibração (Calibrador *Multical* 2500) é de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

D.3 - INCERTEZA DA VELOCIDADE DO AR

As medições da velocidade de ar úmido na seção de teste do aparato experimental foram feitas utilizando um Anemômetro Digital Portátil ITAN 720, fixado paralelamente ao fluxo de ar.

A incerteza obtida, assim como no caso anterior (termômetro infravermelho), foi a mesma informada pelo manual do dispositivo, que é de $\pm 3\%$ do valor da leitura adicionado $0,2\text{ m/s}$, desta forma, para a velocidade do ar estimada em $0,5\text{ m/s}$ a incerteza calculada é de $\pm 0,215\text{ m/s}$.

D.4 - INCERTEZA DA UMIDADE

As medições de umidade no ambiente de teste foram feitas por meio do Sensor de Umidade *DHT22 (AM2302)*, cuja incerteza informada e assegurada pelo fabricante para o intervalo de temperaturas contidas de -40°C a 125°C é de $\pm 5\%$.

D.5 - INCERTEZA DO TEMPO

As medições de tempo foram realização através da utilização de um cronômetro digital, cuja incerteza de escala do aparelho é de $\pm 0,01\text{ s}$.