

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Karlos Roberto da
Silva Braga Martins E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 23 / 07 / 2010


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Karlos Roberto da Silva Braga Martins

**Estudos de formação de “Frost” sobre tubos de
diferentes arranjos em escoamento de ar úmido**

Campinas, 2010.

Karlos Roberto da Silva Braga Martins

Estudos de formação de “Frost” sobre tubos de diferentes arranjos em escoamento de ar úmido

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail

Campinas

2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M366e Martins, Karlos Roberto da Silva Braga
Estudos de formação de "frost" sobre tubos de diferentes arranjos em escoamento de ar úmido / Karlos Roberto da Silva Braga Martins. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Gelo. 2. Solidificação. I. Ismail, Kamal Abdel Radi. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Studies of formation of "frost" on pipes of different arrangements in a wet air stream

Palavras-chave em Inglês: Ice, Solidification

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Alcides Padilha, Caio Glauco Sanchez

Data da defesa: 21/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

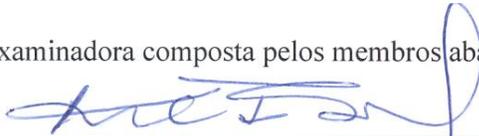
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

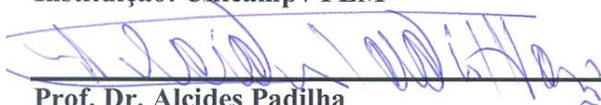
Estudos de formação de “Frost” sobre tubos de diferentes arranjos em escoamento de ar úmido

Autor: Karlos Roberto da Silva Braga Martins
Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail

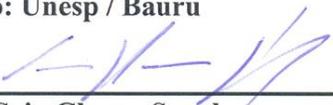
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail
Instituição: Unicamp / FEM



Prof. Dr. Alcides Padilha
Instituição: Unesp / Bauru



Prof. Dr. Caio Glauco Sanchez
Instituição: Unicamp / FEM

Campinas, 21 de julho de 2010.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família que sempre orou por mim e pelo apoio irrestrito em todos os momentos da minha vida e pela referência na formação dos meus princípios éticos e morais, indispensáveis na minha formação social e acadêmica.

Agradecimentos:

Agradeço primeiramente a DEUS por ter me dado a oportunidade, a capacidade física e mental nos momentos mais difíceis da minha vida para a realização deste trabalho de pós-graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail por confiar e acreditar no meu trabalho, conduzindo-me na direção correta e sempre contribuindo para o enriquecimento da pesquisa.

A Capes que financiou o meu mestrado, contribuindo para a realização das pesquisas e pela confiança depositada nesta parceria com a Unicamp e no meu trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Armazenamento Térmico e de Tubos de Calor: Setembrino Vaz, pelo direcionamento nos ajustes e modificações na bancada de testes sendo indispensável para a realização deste trabalho.

A todos os professores e demais técnicos que participaram desta minha caminhada, sempre dispostos a ajudar, transferindo o conhecimento e auxiliando na formação de novas idéias.

À minha família pelo carinho e apoio, sempre me fortalecendo e amparando nos momentos difíceis.

Aos meus amigos: Dalmo Inácio (o DJ), Lourival (maguinho), Jorge Biazussi, Kerlles Rafael, Fabiano (doidão), André, Raquel Cunha, Iberê Souza, Túlio, Lourival (bomba), Leandro Tapoja, Carol Matsuo, Adilto, Luis Jorge (L.J.) pelo incentivo, auxílio e companheirismo.

“E Ele muda os tempos e as estações; Ele remove os reis e estabelece os reis; Ele dá sabedoria aos sábios e conhecimento aos entendidos.”

(DANIEL 2.21)

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados experimentais e numéricos de uma investigação sobre a formação de frost em torno de um cilindro vertical, dois cilindros verticais em série e três cilindros verticais em arranjo triangular na presença de ar úmido. A Formação de frost sobre superfícies frias em contato com ar úmido provoca sérios problemas em muitos equipamentos de refrigeração, prejudicando o seu desempenho térmico resultando em graves gargalos, gastos energéticos desnecessários, além da interrupção do processo de congelamento para eliminar o “frost” formado ocasionando grandes paradas de manutenção desses equipamentos. O principal objetivo desta investigação é estudar as influências dos parâmetros geométricos e operacionais sobre a camada de frost depositada, sua espessura e sua velocidade da frente de solidificação. Tendo em vista que os evaporadores são compostos de arranjos de tubos onde passa o fluido refrigerante, esta simulação e modelagem serão de grande valia para caracterizar o problema e investigar os diferentes efeitos desse fenômeno. Um código computacional foi adaptado para simular o processo de formação de frost em torno de um cilindro vertical. As medidas experimentais são utilizadas para validação do modelo e corroborar a possibilidade de sua utilização na previsão de desempenho desse tipo de arranjo de tubos. São apresentados e discutidos os resultados experimentais e numéricos dos efeitos das variações da vazão volumétrica de ar úmido, da vazão mássica e da temperatura do fluido secundário (álcool) sobre a taxa de deposição de frost, sua velocidade e espessura, mostrando boa concordância.

Palavras Chave: formação de frost, velocidade da frente de solidificação, espessura de frost.

Abstract

This paper presents experimental and numerical results of an investigation into the formation of frost about a vertical cylinder, two vertical cylinders in series and three vertical cylinders in triangular arrangement in the presence of humid air. The formation of frost on cold surfaces in contact with moist air causes serious problems in many refrigeration, impairing its thermal performance resulting in serious bottlenecks, unnecessary energy expenses, beyond the cessation of the freezing process to eliminate the "frost" formed leading major stops maintenance of such equipment. The main objective of this research is to study the influences of operational and geometrical parameters on the layer of frost deposited, its thickness and its rate of deposition. Considering that the evaporators are composed of arrays of tubes where it passes the refrigerant, this modeling and simulation will be of great value to characterize the problem and investigate the different effects of this phenomenon to evaluate our contribution to the formation of frost. A computer code was adapted to simulate the process of formation of frost around a vertical cylinder. Samples are used to validate the model and corroborate the possibility of their use in predicting the performance of such an arrangement of pipe. The experimental and numerical results of the effects of changes in volume flow of moist air, the mass flow and temperature of secondary fluid (alcohol) on the frost deposition rate, their rate of deposition and thickness showed good agreement and are displayed and discussed.

Key Words: frost formation, velocity of solidification front, frost thickness.

Lista de Figuras

2.1	Formação de frost em seu estágio inicial	10
2.2	Etapas da infiltração do condensado	11
3.1	Arranjo experimental da bancada de teste	17
3.2	Vista geral do sistema experimental	19
3.3	Seção de teste do túnel de vento	19
3.4	Posicionamento dos termopares ao longo do túnel de vento	22
3.5	Vista geral do sistema de aquisição de dados (novus)	23
3.6	Esquema do procedimento experimental	29
4.1	Valores dos tempos de transição na faixa de -20 a 0°C	31
4.2	Esquema do modelo físico de crescimento do cristal de gelo	32
4.3	Cilindro de gelo circundado de ar num volume de controle	37
4.4	Modelo do volume utilizado dentro do meio poroso	38
4.5	Valores dos fatores F e F_s em função da Temperatura	41
6.1	Formação de frost poroso	56
6.2	Estágio de gelo glacial	57
6.3	Variação da espessura de frost em função da variação da vazão volumétrica de ar úmido para $T_{fsc} = -10^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028\text{kg/s}$ para um cilindro	58
6.4	Variação da espessura de frost em função da variação da vazão volumétrica de ar úmido para $T_{fsc} = -13^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028\text{kg/s}$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	59
6.5	Variação da espessura de frost em função da variação da vazão volumétrica de ar úmido para: $T_{fsc} = -20^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017\text{kg/s}$ para três cilindros (cilindro lateral)	61
6.6	Variação da espessura de frost em função da variação da temperatura do fluido secundário para $\dot{V}_{ar} = 0,03\text{m}^3/\text{s}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028\text{kg/s}$ para um cilindro	62
6.7	Variação da espessura de frost em função da variação da temperatura do fluido secundário para $\dot{V}_{ar} = 0,03\text{m}^3/\text{s}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028\text{kg/s}$ para dois	63

cilindros (cilindro trazeiro)	
6.8 Variação da espessura de frost em função da variação da temperatura do fluido secundário para $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	65
6.9 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão mássica de fluido secundário para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ um cilindro	66
6.10 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão mássica de fluido secundário para $T_{fsc} = -13^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	68
6.11 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão mássica de fluido secundário para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	69
6.12 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo para: $T_{fsc} = -18^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para um cilindro	71
6.13 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo para: $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	72
6.14 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo para: $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	73
6.15 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo para: $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para um cilindro	74
6.16 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo para: $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	75
6.17 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo para: $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	77
6.18 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo para: $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $T_{fsc} = -13^{\circ}C$ para um cilindro	78
6.19 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo	80

para: $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	
6.20 Variação da velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo	81
para: $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	
6.21 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para um cilindro	82
6.22 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro)	83
6.23 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	83
6.24 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	84
6.25 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para um cilindro	85
6.26 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro)	85
6.27 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	86
6.28 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	86
6.29 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para um cilindro	87
6.30 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a espessura da camada de	88

frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro)	88
6.31 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	
6.32 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	89
6.33 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para um cilindro	90
6.34 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro)	90
6.35 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	91
6.36 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3/s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	91
6.37 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ para um cilindro	92
6.38 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro)	93
6.39 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	93
6.40 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada	94

de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	
6.41 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ para um cilindro	95
6.42 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro)	95
6.43 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro)	96
6.44 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade da frente de solidificação de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3/s$ para três cilindros (cilindro lateral)	94
6.45 Teste realizado para escolha do dr e dt	97
6.46 Teste realizado para escolha do dr e dt	98
6.47 Teste realizado para escolha do dr e dt	98
6.48 Teste realizado para escolha do dr e dt	99
6.49 Variação da espessura da camada de frost ao longo do tempo e da baixa temperatura da parede do cilindro	100
6.50 Variação velocidade da frente de solidificação de frost em função do tempo e da baixa temperatura da parede do cilindro	101
6.51 Comparação numérico e experimental: crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo	102
6.52 Comparação numérico e experimental: velocidade da frente de solidificação de frost em função do tempo	102
6.53 Comparação numérico e experimental: crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo	103
6.54 Comparação numérico e experimental: velocidade da frente de solidificação de frost em função do tempo	103

6.55	Comparação numérico e experimental: crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo	104
6.56	Comparação numérico e experimental: velocidade da frente de solidificação de frost em função do tempo	104
6.57	Comparação numérico e experimental: crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo	105
6.58	Comparação numérico e experimental: velocidade da frente de solidificação de frost em função do tempo	105
B.1	Curva de calibração para o inversor de frequência	122
B.2	Curva de calibração da placa de orifício para um cilindro vertical	123
B.3	Curva de calibração da placa de orifício para dois cilindros verticais	124
B.4	Curva de calibração da placa de orifício para três cilindros	125
B.5	Curva de calibração do termopar 1	126
B.6	Curva de calibração do termopar 2	126
B.7	Curva de calibração do termopar 3	127
B.8	Curva de calibração do termopar 4	128
B.9	Curva de calibração do termopar 5	128
B.10	Curva de calibração do termopar 6	129

Lista de Tabelas

3.1	Propriedades dos Fluidos Refrigerantes R-22 * e Etanol	18
3.2	Variáveis experimentais para um cilindro vertical	26
3.3	Variáveis experimentais para dois cilindros	27
3.4	Variáveis experimentais para três cilindros	28
4.1	Valores de Kfac adotados	35
6.1	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.3	59
6.2	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.4	60
6.3	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.5	61
6.4	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.6	62
6.5	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.7	64
6.6	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.8	66
6.7	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.9	67
6.8	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.10	69
6.9	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.11	70
6.10	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.12	71
6.11	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.13	73
6.12	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.13	74
6.13	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.14	75
6.14	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.15	76
6.15	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.16	78
6.16	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.17	79
6.17	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.18	80
6.18	Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.19	81
A.1	Incertezas experimentais referentes às medidas para um cilindro	119
A.2	Incertezas experimentais referentes às medidas para dois cilindros	120
A.3	Incertezas experimentais referentes às medidas para três cilindros	121
B.1	Equações de ajuste de alguns termopares	129
C.1	Resultados da umidade relativa para um cilindro	131

C.2	Resultados da umidade relativa para dois cilindros	132
C.3	Resultados da umidade relativa para três cilindros	133

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

a - coeficientes que acompanham as propriedades após a discretização	
A - área da secção do túnel de vento	[m ²]
b - largura da secção do túnel de vento	[m]
c_p – calor específico	[J/kg.K]
d – diâmetro da coluna de frost	[m]
D – difusividade térmica	[m ² /s]
e – espessura da camada de frost	[m]
F – correção devido à tortuosidade do meio poroso	
Fr - frequência do inversor	[Hz]
ha - altura da secção do túnel de vento	[m]
h – coeficiente de película de transferência de calor	[W/m.K]
hm – coeficiente de película de transferência de massa	[W/m.K]
h_{lv} - entalpia da mistura líquido-vapor	[kJ/ kg]
h_v - entalpia do vapor	[kJ/ kg]
k - condutividade Térmica	[W/ m.K]
K_{frac} – fração utilizada na determinação do d ₀	
l_r – número de pontos ao longo da direção radial	
l_T – número de pontos ao longo da direção tangencial	
m_c - massa do béquer cheio	[kg]
m_v - massa do béquer vazio	[kg]
ṁ - taxa de deposição mássica	[kg/ s]
ṁ_{fsc} - vazão mássica do fluido secundário	[kg/ s]
Nu - número de Nusselt = $\frac{h.2R}{k}$	
P - pressão	[kPa]
p - pressão parcial	[kPa]

P_{atm} - pressão atmosférica local	[kPa]
Pr – número de Prandtl = $\frac{\mu \cdot c_p}{k}$	
P_{sat} - pressão de saturação	[kPa]
q – calor transferido	[W]
D - diâmetro do cilindro	[m]
D_{ext} - diâmetro externo do cilindro	[m]
D_{int} - diâmetro interno do cilindro	[m]
r – coordenada radial	[m]
R – raio do cilindro	[m]
Re - número de Reynolds = $\frac{v \cdot 2R}{\nu}$	
Sc - número de Schmidt = $\frac{\nu}{D}$	
Sh - número de Shewoord = $\frac{h_m \cdot 2R}{D}$	
t - tempo	[s]
T - temperatura	[°C]
T_{ar} - temperatura do ar	[°C]
T_{bu} - temperatura de bulbo úmido	[°C]
T_{fsc} - temperatura do fluido secundário	[°C]
Vaz_{ar} – Vazão volumétrica de ar	[m ³ /s]
Vaz_{fsc} – Vazão mássica de fluido secundário	[kg/s]
v – velocidade	[m/ s]
v_{δ} – velocidade de fronteira	[m/ s]
V_{sol} - velocidade da frente de solidificação de frost	[mm/ min]
$v_{méd}$ - velocidade média do ar	[m/ s]
\dot{V}_{ar} - vazão volumétrica de ar úmido	[m ³ / s]
x - fração de gás no meio poroso	
w – umidade de saturação do ar	[kg/kg _{ar}]
W – fração de massa	

W_1 - razão de umidade na entrada	[kg/ kg _{ar}]
W_2 - razão de umidade na saída	[kg/ kg _{ar}]

Letras Gregas

α – fator relacionado à turbulência do escoamento ($\alpha = 0,4$)	
ν – viscosidade cinemática do ar	[m ² /s]
ε – fração volumétrica de sólido no meio poroso	
φ - umidade relativa	[%]
ϕ - propriedade genérica	
λ - entalpia de sublimação do vapor	[kJ/kg.K]
ρ - densidade	[kg/ m ³]
∂ - derivada parcial	
μ_r - viscosidade dinâmica do fluido secundário	[kg/ m.s]
δ – espessura de frost	[m]
Δ - indica a distância e o tamanho do volume de controle (trabalha-se com grade uniforme) na direção da coordenada que o segue	
Δ_p - diferença de pressão	[mmHg]

Superescritos

+	- tempo posterior
*	- tempo intermediário
–	- tempo anterior
n	- valor em uma nova iteração
ν	- valor em uma nova iteração

Subscritos

ar	– indica propriedades do ar
∞	- condição de corrente livre
w	- condição na parede

e - propriedade avaliada na evaporação
E - propriedade avaliada no ponto nodal leste
e_f – propriedades de gelo como meio poroso
e_s - propriedade avaliada na face leste
f – propriedades do gelo com sua porosidade atual
fsc – fluido secundário
g - propriedades do gelo
l – líquido
N – propriedade avaliada no ponto nodal norte
n₀ - propriedade avaliada na face norte
P - propriedade avaliada no ponto nodal local
s - propriedade avaliada na superfície da camada de gelo
S - propriedade avaliada no ponto nodal sul
s₀ - propriedade avaliada na face sul
t – propriedade avaliada no tempo
tr – avaliado na transição entre as etapas
v - vapor
w - propriedade avaliada na parede
W – propriedade avaliada no ponto nodal oeste
w₀ - propriedade avaliada na face oeste
i, j - indica uma posição específica na malha
δ – propriedade avaliada na fronteira
γ – propriedades da fase vapor
β – propriedades da fase sólida
d – propriedades associada ao diâmetro
0 – associada aos valores iniciais admitidos
sat – propriedades de saturação
vap – propriedades de vapor
s – indica valores de propriedades na superfície

Abreviações

V.C. – Volume de controle

LU – Método de decomposição de matrizes

PRD - Produto genérico de adimensionais;

Siglas

DETF - Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Geral	3
1.1.2 Específicos	4
1.2 Organização do trabalho	5
2 REVISÃO DA LITERATURA	6
2.2 Estudos experimentais	6
2.3 Estudo do fenômeno de cristalização na formação de frost	9
2.4 Estudo dos modelos de formação de frost	12
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	15
3.1 Introdução	15
3.2 Descrição do sistema experimental	15
3.3 Equipamentos utilizados	20
3.4 Medidas realizadas	21
3.4.1 Sistema de medição de temperatura	21
3.4.2 Espessura do gelo	23
3.4.3 Vazão do fluido secundário	24
3.5 Descrição do procedimento experimental	24
4 MODELAGEM DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE FROST	30
4.1 Introdução	30
4.2 Crescimento unidimensional dos cristais	31
4.3 Equações de acoplamento entre os dois estágios	36
4.4 Fase de ramificação dos cristais	37
4.5 Modelo de Dietenberg para a condutividade térmica do gelo em função da densidade e da temperatura	43
5 ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE FROST	46
5.1 Introdução	46

5.2 Tratamento numérico da primeira fase: crescimento unidimensional dos cristais	47
5.3 Tratamento numérico da segunda fase: ramificação dos cristais	50
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6.1 Introdução	55
6.2 Variação da estrutura da camada de frost	56
6.3 Distribuição da camada de gelo com o tempo	57
6.4 Velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo	70
6.5 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido	82
6.6 Efeito da temperatura da superfície fria do cilindro	87
6.7 Efeito da vazão mássica do fluido secundário	92
6.8 Convalidação do modelo numérico proposto	97
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
7.1 Conclusão	106
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	107
REFERÊNCIAS	108
APENDICE A - Análise de incerteza experimental	113
APENDICE B - Curvas de calibração	122
APENDICE C - Cálculo da umidade relativa	130
APÊNDICE D - Correlações empíricas para o cálculo do Nusselt e Shewoord	134

1 INTRODUÇÃO

Quando um fluxo de ar úmido entra em contato com uma superfície fria mantida a uma temperatura abaixo de 0°C acontece o fenômeno de formação ou deposição de gelo. Este fenômeno é encontrado em muitas aplicações comerciais e industriais de baixa temperatura como no caso de asa de aviões, rotores de compressores, evaporadores de sistemas de refrigeração, sistemas de purificação de gases, transferência e armazenamento de líquidos criogênicos e muitos outros. A camada de gelo que se forma nestes casos, é na realidade uma camada porosa de gelo, ar e vapor de água denominada de “frost” onde complexos mecanismos de transferência de calor e de massa ocorrem. No processo de deposição de frost acontece transferência simultânea de calor e de massa sob condições de estado instáveis.

À medida que o tempo passa, a camada de frost cresce tornando-se mais densa e por este motivo, a formação de frost em equipamentos é responsável pela queda no seu desempenho, sendo necessário um processo de degelo para que o equipamento volte a operar em condições normais, significando maior gasto energético. No caso específico de evaporadores o processo de degelo é feito de maneira não técnica e, além disso, a distribuição das barras de degelo é feita sem qualquer fundamentação científica.

Uma avaliação mais exata de crescimento de frost requer a utilização de um modelo de formação de gelo mais exato, formulado a partir de equações básicas que regem os fenômenos de transferência de calor e de massa, visando fornecer melhores estimativas do crescimento da camada de frost com o tempo, que junto com os efeitos dos vários fatores operacionais e geométricos devem ajudar na melhora de projetos de sistemas de degelo.

Neste trabalho é centrado ao o estudo do fenômeno de formação de frost em cilindros verticais de diferentes arranjos, sendo essa configuração representativa dos evaporadores comerciais e industriais utilizados em aplicações de baixa temperatura.

Ao longo dos últimos anos muitas investigações foram realizadas visando caracterizar o problema, encontrando-se em Scalon (1993) uma boa síntese de trabalhos sobre o tema. Além dessas informações, muitas outras pesquisas foram feitas em diversos países que fornecem dados para um melhor entendimento do fenômeno de formação de frost, sendo que o primeiro trabalho

publicado, segundo Chung e Algren (1958), foi realizado por Pienning em 1933 e publicado na *Gesundhids Ingenieur*, revista alemã.

A queda no desempenho dos equipamentos e de sistemas devido à formação de frost tem sido objeto de muitos estudos, tanto na natureza do processo de transferência de calor e de massa que ocorre durante a formação de frost, como também na avaliação das suas propriedades.

Segundo Scalon (1993) a perda de energia pode ser vista por duas frentes: a primeira, e a mais óbvia, é a perda na transferência de calor que é desviada para solidificar as gotículas de água presentes no ar úmido e a segunda seria o aumento da perda de carga nos evaporadores devido à diminuição na área de fluxo provocada pelo aumento da espessura da camada de gelo acumulado entre os tubos do evaporador.

No entanto, o estudo do processo de formação de frost é complexo em parte porque a taxa na qual o vapor de água difunde-se na camada de frost depende da taxa na qual o calor é transferido da corrente de ar úmido que escoar na superfície da camada de frost. Outro fator que complica é a dependência temporal das propriedades do gelo, e a dependência da posição e do tempo da temperatura superficial da camada de frost. Isto implica em mudanças na estrutura da camada de frost, que tenderá a aumentar sua densidade e condutividade térmica efetiva com o tempo. Resumidamente, isto pode ser explicado da seguinte forma:

- » A fronteira da interface gelo-ar está em movimento com a formação das camadas de frost com o tempo, característica típica de problemas de mudança de fase;
- » A temperatura da superfície de frost varia com a espessura da camada de frost;
- » As condições do escoamento variam simultaneamente com o aumento da espessura da camada de frost, pois a geometria do corpo é constantemente alterada;
- » A solução de camada limite é transiente. Quando a camada de frost cresce, sua resistência térmica altera-se com respeito ao tempo e a posição. Quando a resistência térmica varia, a temperatura de superfície da camada de frost varia no tempo e no espaço e conseqüentemente a pressão parcial de vapor de água na superfície também varia. Isto acarreta mudança na estrutura das camadas limites térmica e de concentração de vapor de água, resultando em mudanças nas taxas de transferências de calor e de massa no tempo;
- » As propriedades do gelo variam de acordo com as condições do ar que está escoando ao seu redor, tem-se também que as propriedades do gelo variam no tempo e no espaço;

- » Existe um fenômeno de difusão da superfície da camada de frost para o seu interior, que alteram, de forma significativa, as propriedades das camadas internas de frost;
- » O processo de formação de frost envolve a transferência de calor e massa simultaneamente.

Devido a todas essas dificuldades descritas anteriormente a maioria dos estudos feitos na área são experimentais ou da investigação dos efeitos provocados pela presença da camada de frost.

O crescimento da camada de frost, a acumulação de massa e o fluxo de calor são fatores muito difíceis de serem medidos. A análise experimental, numérica e gráfica, predominante neste trabalho, traz mais facilidade na estimativa de propriedades e comportamento do gelo e demais aprimoramentos aos sistemas, nos quais esses fatores ocorrem.

Ao longo dos últimos trinta anos vários estudos, experimentais e numéricos, foram desenvolvidos para investigar a formação de frost sobre superfícies frias em contato com ar úmido, porém, ainda não existia um estudo experimental que permitisse estudar o fenômeno de formação de frost em torno de dois cilindros verticais em série e três cilindros verticais em arranjo triangular e assim, estudar, investigar e quantificar este fenômeno são os objetivos do presente trabalho.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O principal objetivo desta investigação é estudar a formação de frost sobre tubos de diferentes arranjos no escoamento de ar úmido avaliando a influência da variação de parâmetros operacionais tais como, a vazão volumétrica de ar úmido, temperatura e vazão mássica do fluido secundário sobre a camada de frost depositada, sua espessura e velocidade de deposição, além de avaliar os efeitos de interferência entre os cilindros e compará-los com um modelo numérico proposto para avaliar a sua concordância com os resultados experimentais.

1.1.2 Específicos

1. Modificar o equipamento existente para permitir colocar na seção de teste um tubo, dois tubos em série e três tubos na posição triangular todos na posição vertical;
2. Avaliar cada um dos conjuntos apresentados na etapa anterior e testá-los em várias condições de operação onde será fotografada a formação da camada de *frost* durante.
3. Utilizar o modelo desenvolvido por Scalon (1993) para avaliar o crescimento da espessura de frost em torno de um cilindro vertical em escoamento de ar úmido utilizando correlações empíricas na modelagem matemática;
4. Adaptar ao trabalho um código computacional já existente e desenvolvido por Scalon (1993) para permitir tratar estes casos diversos via sub-rotinas específicas para cada caso, testar o código e verificar seu comportamento, e otimizar as malhas de modo que os resultados tornem-se independentes do tamanho da malha.
5. Utilizar este código para obter resultados preliminares para convalidação de resultados experimentais e numéricos disponíveis na literatura.
6. Utilizar este código em simulações correspondentes aos resultados experimentais a serem obtidos na montagem experimental a ser modificada em laboratório;
7. Os dados obtidos para cada caso, comportamento da camada, velocidade de deposição de frost e sua espessura serão alimentados a respectiva sub-rotina e rodado o código sobre as mesmas condições. Os resultados numéricos obtidos serão comparados com os resultados experimentais.
8. Este processo computacional será repetido para todas as condições operacionais utilizadas nos experimentos para um cilindro vertical.

1.2 Organização do trabalho

Os próximos capítulos deste trabalho encontram-se assim organizados:

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que aborda os estudos experimentais sobre o tema, estudos do fenômeno de cristalização na formação de frost e os modelos de formação de frost desenvolvidos ao longo dos últimos anos.

O procedimento experimental adotado, como toda a montagem da bancada experimental e a metodologia utilizada na realização dos testes, está apresentada no capítulo 3.

No capítulo 4 está descrito a formulação matemática e o método utilizado para a avaliação numérica do fenômeno.

No capítulo 5 é apresentada a análise numérica com a discretização das equações.

No capítulo 6 são apresentados e discutidos todos os resultados e comparações obtidas.

O capítulo 7 traz as conclusões, juntamente com as sugestões para próximos trabalhos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Introdução

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo estudar várias investigações relacionadas aos problemas de formação de frost em superfícies frias, sendo divididos em estudos experimentais, estudos do fenômeno de cristalização na formação de frost e de modelos de formação de frost.

2.2 Estudos experimentais

Um dos primeiros estudos que investigou apenas os efeitos provocados pelo crescimento da frente de frost foi desenvolvido por Stoecker (1957). Através de uma análise comparativa dos efeitos da formação de frost na transferência de calor e na perda de pressão, concluindo que a formação de frost tem influência mais significativa sobre a perda de pressão.

Stoecker (1957) realizou um dos primeiros trabalhos a tentar medir o aumento da espessura de frost em função do tempo, porém, na época não eram bem conhecidos todos os parâmetros que influenciavam o processo de formação de frost. Através de procedimento experimental, ele validava suas hipóteses.

Considerando o assunto sobre perdas energéticas, Niederer (1976) avaliou a influência do fenômeno de formação de frost sobre a transferência de calor através de sua atuação nos parâmetros da expressão de um coeficiente global de transferência de calor.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{f_i} + \frac{R}{f_o}$$

Em que: U = coeficiente global de transferência de calor;

f_i = coeficiente interno de transferência de calor;

f_o = coeficiente externo de transferência de calor;

R = razão entre as áreas interna e externa;

Através desta análise Niederer (1976) mostrou que cerca de 20% do total da energia trocada no sistema deve ser utilizado para o degelo, o que acentua ainda mais a necessidade de um projeto correto que minimize os efeitos da formação de frost.

Muitos pesquisadores têm reconhecido a importância e dificuldade em medir o crescimento da camada de frost, a acumulação de massa e o fluxo de calor, como pode ser comprovado através de um grande número de trabalhos que fornecem dados dos efeitos da temperatura de superfície, umidade do ar, temperatura ambiente e o número de Reynolds.

O trabalho publicado por Chung e Algren (1958) faz uma descrição de uma montagem utilizada para um ensaio de formação de frost em torno de um cilindro. No final do trabalho os autores apresentam gráficos com os resultados obtidos, inclusive a partir desses dados apresentam estimativas de algumas propriedades do gelo, como por exemplo, a condutividade térmica.

O trabalho de Brian (1963) muito citado por diversos autores e a tese de doutorado de Shah (1969) estavam ambos voltados para a área físico-química, sendo os responsáveis por um novo impulso nas pesquisas do fenômeno de formação de frost no final da década de 60.

As medições e observações do crescimento de frost sob uma grande faixa de condições de teste e usando várias técnicas desenvolvidas por diversos pesquisadores, não conseguem mostrar de forma clara a influência de cada variável independente neste complexo fenômeno físico. Como exemplo têm-se Tokura et al. (1983), Schneider (1978), Yonko e Sepsy (1967), que concluem através de seus experimentos que a velocidade do ar não tem influência significativa na taxa de crescimento de gelo, no entanto Abdel-Wahed et. al (1984), Sander (1943), Yamakawa et. al (1972), Brian (1963), Hosoda e Uzuhashi (1967), apresentam resultados que mostram que a taxa de crescimento de gelo decresce com a velocidade do ar.

Num trabalho mais recente, Mao et. al. (1993), apresenta dados e correlações empíricas para o crescimento da camada de frost e as suas propriedades em função da distância da linha de ataque de uma placa plana, do tempo, da temperatura da placa, da temperatura do ar, da umidade

e da velocidade do ar, assim como faz uma descrição detalhada dos equipamentos de seus ensaios.

A análise mais exata das propriedades da camada porosa de frost tem sido objeto de muitos estudos, especialmente a obtenção da condutividade térmica dessa camada de frost, sendo esta indispensável para o desenvolvimento de um modelo analítico para o estudo da formação de frost.

Uma das pesquisas mais citadas é feita por Yonko e Sepsy (1967), no qual os autores apresentam uma correlação da condutividade térmica da camada porosa de frost em função da densidade, sob a base de seus resultados experimentais. A relação entre a densidade e a condutividade térmica não é uma novidade, ela é, muitas vezes, utilizada para obter estimativas da condutividade térmica de isolantes com bons resultados, o que sugeriu a eles e muitos outros autores a sua utilização em gelo de baixa densidade.

No entanto o trabalho mais abrangente para a obtenção da condutividade térmica de frost é o publicado por Dietenberg (1983), que é essencialmente teórico e parcialmente empírico, e que postula uma complicada estrutura do gelo na camada porosa para a difusão de vapor, padrões geométricos para o gelo e conceitos de associação de malhas em meios porosos para obter expressões para a condutividade máxima e mínima do gelo. Com estes valores e dados experimentais obtidos por outros autores elaborou-se uma equação interpolante válida para uma densidade maior que a do ar e menor do que a da água e para uma temperatura na faixa de 80 a 273K.

Lee e Ro (2001) realizaram um estudo experimental da formação de frost sobre um cilindro horizontal em escoamento de ar úmido e obtiveram resultados para o crescimento da camada de frost, para o fluxo de calor em torno do cilindro, para a condutividade térmica efetiva de frost e para a distribuição da temperatura na superfície do cilindro sob várias condições experimentais, variando o número de Reynolds, temperatura do ar e umidade.

Yang et. al. (2008) propuseram correlações adimensionais para as propriedades de frost depositado sobre a superfície fria de um cilindro. Através da realização de experimentos e da variação de parâmetros tais como: temperatura do ar, temperatura da superfície fria do cilindro, velocidade do ar e umidade absoluta, obtiveram resultados da distribuição angular da camada de frost em torno do cilindro e concluíram que ela cresce de forma uniforme a uma velocidade elevada do ar. As correlações adimensionais para a espessura, densidade, e temperatura da

superfície da camada de frost, e para o coeficiente de película foram obtidas como funções do número de Reynolds, número de Fourier, umidade absoluta e temperatura adimensional.

2.3 Estudo do fenômeno de cristalização na formação de frost

Este tipo de estudo é de fundamental importância para a melhor compreensão e base para a formulação de modelos que permitem avaliar o fenômeno de formação de frost. Através do entendimento desta linha de estudo, torna-se mais viável estabelecer as propriedades em função do tipo de estrutura cristalina formada no desenvolvimento da camada de frost. Os trabalhos de Hayashi et. al. (1977) são essenciais para a elaboração de modelos mais recentes, fazem uma descrição dos tipos de cristais formados de acordo com o período de formação de gelo. Esses períodos são divididos em:

1. Período de crescimento unidirecional do cristal;
2. Período de crescimento tridimensional;
3. Período de fronteira plenamente desenvolvida ou período de crescimento quase-estático.

Os modelos de formação de gelo são subdivididos de acordo com períodos citados acima.

Em seu estudo, Tokura, Saito e Kishinami (1983) elaboram parâmetros adimensionais para a determinação da condutividade térmica mesmo em estágios primários, partindo do seu conhecimento de como ocorre o fenômeno de cristalização do gelo. A figura 2.1 mostra como acontece a formação de gelo desde a formação de gotículas. Neste trabalho, o autor fornece formas de identificar o tipo de cristal a ser formado a partir da temperatura da superfície de gelo (T_s) e as diferenças das concentrações entre a corrente livre e a de saturação da superfície do gelo (ΔC), sem dar maiores detalhes a respeito do terceiro período.

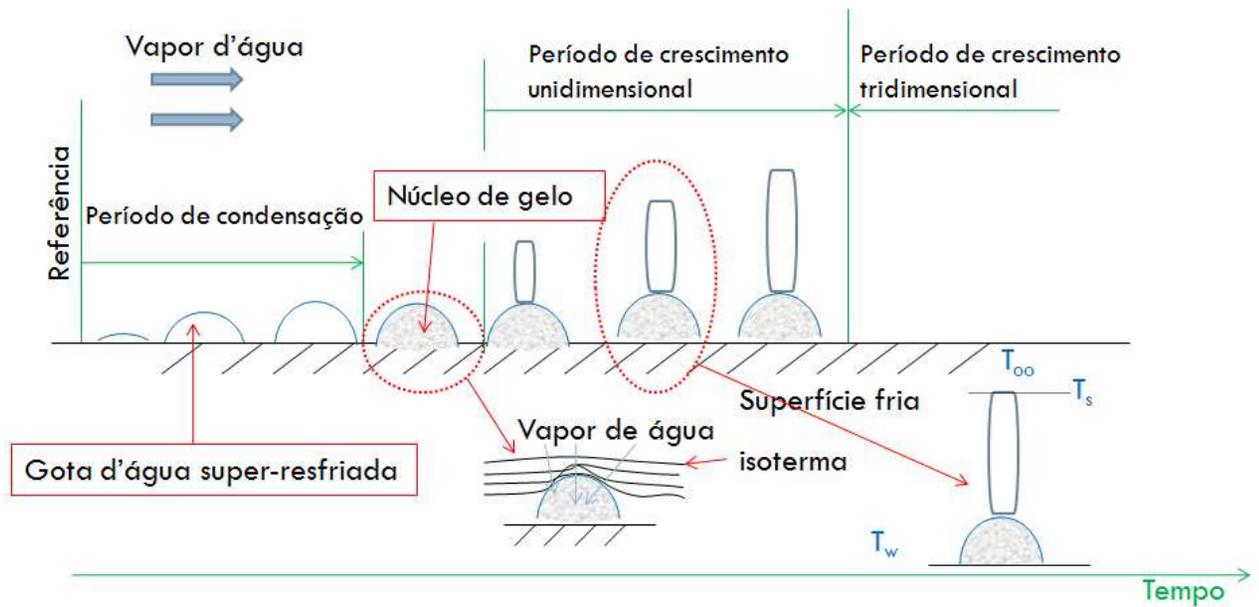


Figura 2.1 Formação de frost em seu estágio inicial (Tokura et al. 1983).

Aoki et. al. (1983) estudou o terceiro período com maior detalhe, sabe-se que este período é extremamente complexo, pois neste estágio a camada de gelo é porosa e pode envolver também a permeação da água formada na superfície de gelo quando a temperatura da superfície do mesmo atinge valores maiores, ou iguais à de fusão do gelo. Esta água condensada começa a escoar pelos poros do gelo, solidificando as camadas inferiores como é mostrado na figura 2.2.

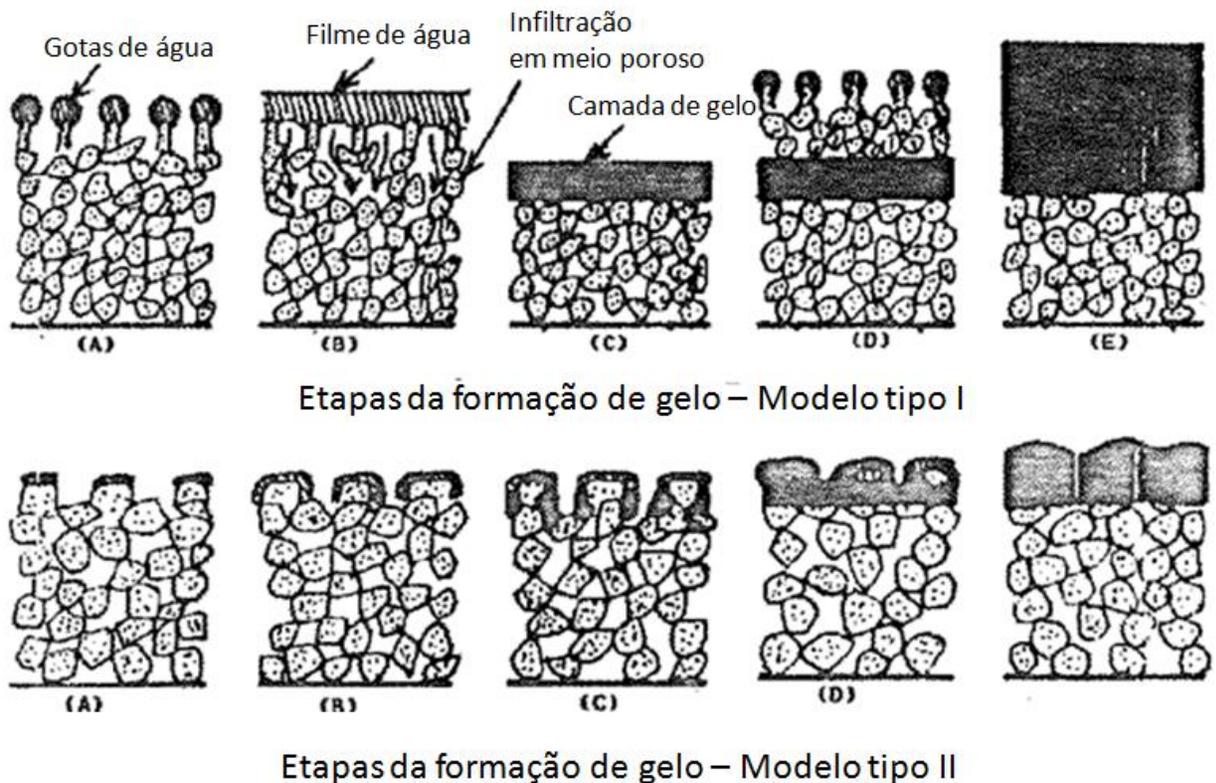


Figura 2.2 Etapas da infiltração do condensado (Abdel-Whahed et al. 1984).

Na figura 2.2 são descritos dois processos de permeação de água que são dependentes da temperatura atingida pela superfície da camada de gelo e indicam o tipo da configuração a ser formada. Obviamente que os processos de permeação acontecem quando a temperatura está relativamente próxima a 0°C (Abdel-Whahed et al. 1984).

Por causa deste fenômeno pode haver uma camada de gelo estratificada. O fato de o congelamento ocorrer nas camadas inferiores cria-se uma espécie de camada impermeável pela qual não há mais penetração de água e isto altera de forma significativa as propriedades desta camada impermeável. Porém, esta fase é dificilmente encontrada na prática em sistemas de refrigeração.

Mais tarde Seki et. al. (1984), fizeram um estudo do crescimento dos cristais para diversos ângulos de ataque de uma placa super resfriada e também obtiveram dados das propriedades físicas do gelo, como por exemplo, a condutividade térmica.

2.4 Estudo dos modelos de formação de frost

Ao longo dos últimos 30 anos foram realizados diversos estudos de modelagem do fenômeno de formação de frost que incluem modelos teórico, semi-empírico e numérico.

Em sua dissertação de mestrado, Scalon (1993) realizou uma síntese e análise bastante detalhada de vários modelos existentes na literatura, como exemplo disso, citou o de Chung e Aldren (1958) que é um modelo que se baseia fortemente em dados experimentais obtidos por eles e composto principalmente por equações empíricas. O modelo de Parish et al. (1972), proposto para a formação de gelo em torno de um cilindro, que através de balanços globais das equações do momentum, da energia, e de concentração de vapor procura quantificar e avaliar o processo de formação de gelo. O modelo proposto por Jones e Parker (1975), que através de um balanço global, leva em conta todos os fenômenos do processo e principalmente a variação das propriedades internas da camada de gelo, tornando-o um balanço fisicamente mais representativo.

O trabalho de Sami e Duong (1989), fizeram algumas alterações do modelo anterior, procurando obter resultados de maior acurácia através da análise local de propriedades do gelo. Um modelo muito simples proposto por Padki et. al. (1989), para que se possa avaliar de forma rápida e sem grandes complicações valores para a formação de gelo em geometrias simples. Este método utiliza muitas correlações empíricas para a avaliação principalmente dos coeficientes de película para a transferência de calor e de massa. Sua principal vantagem está na obtenção de estimativas sobre a taxa de crescimento de gelo para quaisquer geometrias bastando para isso conhecer o coeficiente de transferência de calor ou algum método para avaliá-lo. No entanto se trata de um modelo muito aproximado e que só deve ser utilizado no caso de inoperância dos demais métodos ou para uma avaliação mais grosseira.

Um modelo mais elaborado é proposto por Tao et. al. (1993) para uma placa plana. Trata-se de um modelo extremamente teórico na sua formulação e que para a sua resolução fez uso de algumas correlações empíricas. Este modelo propõe a resolução do fenômeno em dois estágios, o primeiro que modela a primeira etapa de crescimento unidimensional, período de curta duração e que serve para obter os dados iniciais para o segundo estágio que é na realidade a soma dos períodos de ramificação dos cristais e de crescimentos quase-estático.

Em seu trabalho, Scalon (1993) aborda o problema de formação de gelo em torno de um cilindro vertical, baseado nas equações desenvolvidas por Tao et. al. (1993), nas quais fez algumas simplificações, mas diferente de Tao, resolve as equações do escoamento em torno do cilindro, considerando este como uma superfície lisa e estática, para obter os coeficientes convectivos e difusivos entre o escoamento e a superfície da camada de gelo.

Sherif et. al. (1993) procurando elaborar um modelo simples e de boa acuracidade, propôs um modelo transiente e semi-empírico para placa plana sob condições de convecção forçada. Este modelo utiliza o método de Euler, e avalia a temperatura de superfície e o crescimento da camada de gelo, usando correlações existentes na literatura para o coeficiente de transferência de calor por convecção e a analogia de Lewis para calcular o coeficiente de transferência de massa.

Salinas (1996) elaborou um estudo detalhado e propôs um modelo para a formação de gelo sobre a superfície de uma placa fria exposta a um fluxo de ar úmido. A formulação matemática transiente e unidimensional de fluxo e de transferência de calor e de massa foi baseada na técnica de média volumétrica local e permitiu prever a densidade, o crescimento da espessura da camada de gelo, a temperatura da superfície da camada porosa de gelo, a taxa de deposição de massa e a fração volumétrica das fases no interior da camada porosa de gelo. Dados experimentais e numéricos disponíveis foram utilizados para validar o seu modelo que apresentou boa concordância. Também foram realizados testes numéricos e através disso foram escolhidos os melhores valores iniciais de difusividade e raio inicial do cristal de gelo e também de difusão superficial. Este modelo foi utilizado para prever a formação de gelo em placas paralelas.

O modelo proposto por Tao et. al. (1993) é até o momento o mais completo de todos, pois envolve todos os fenômenos no processo de formação de gelo. Este modelo é representativo das duas principais fases do processo descritas anteriormente. O modelo permite a avaliação local de todas as propriedades e procura representar todos os processos envolvidos neste fenômeno.

Dong et al. (2004) desenvolveram um modelo analítico para a formulação da camada de frost sobre uma placa plana fria considerando a difusão molecular da água, e geração de calor devido à sublimação do vapor de água na camada de frost. No entanto, esse modelo avalia o fenômeno de crescimento global de frost. Os resultados foram comparados com dados experimentais e apresentaram boa concordância.

Lee e Ro (2004) realizaram uma análise do crescimento de frost sobre uma placa plana através da elaboração de um modelo simples desenvolvido a partir do pressuposto de que a concentração de vapor de água na superfície de frost está saturado e de que o gradiente de pressão de vapor é o mesmo que o valor obtido pela equação de Clapeyron - Clausius. Eles resolveram o problema de inconsistência da resistência à difusão de vapor de água na região de alta porosidade através da modificação do modelo anterior com a hipótese de condição de supersaturação do vapor de água na superfície de frost.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo é descrito o procedimento experimental realizado para a investigação da formação de gelo em torno de cilindros sob escoamento de ar úmido. É realizada uma descrição do sistema experimental, dos equipamentos utilizados e do procedimento executado para a obtenção das medidas.

3.2 Descrição do sistema experimental

A bancada experimental já era existente e esta foi projetada e testada no Laboratório de Armazenamento Térmico e Tubos de Calor do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos (DETF) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), UNICAMP, e foi modificada com o objetivo de estudar e avaliar o processo de formação de gelo em torno de cilindros de diferentes arranjos sob escoamento de ar úmido investigando a influência da variação da vazão volumétrica de ar úmido, da vazão mássica do fluido secundário e da temperatura do mesmo fluido sobre a camada de frost depositada, sua espessura e velocidade de deposição.

O desenvolvimento da bancada de teste foi de certa forma, bastante trabalhoso, por se tratar de um projeto experimental. Desta forma, todo o sistema foi montado com foco em detalhes e foram utilizadas várias técnicas para a criação de uma bancada eficiente e com o mínimo de imperfeições para permitir que o experimento ficasse o mais próximo possível da realidade e simulasse desde um sistema de ar condicionado até um grande trocador de calor de extrema importância para uma indústria.

Todavia, os equipamentos utilizados e listados a seguir, são extremamente caros, o que impediu a montagem de uma bancada de melhor qualidade. Mas ao mesmo tempo, utilizou-se a criatividade da engenharia em busca de sistemas mais baratos e com eficiência necessária para que o experimento não fosse prejudicado.

O sistema desenvolvido em laboratório simulou o processo de troca de calor em sistemas de refrigeração, em que o fluido secundário, que passa dentro do cilindro, feito a partir de um tubo de cobre de 1" de diâmetro, retira energia do ar úmido, resfriando-o. Desta forma, ocorrerá então a formação de gelo sobre a superfície externa do cilindro.

O arranjo experimental da bancada de teste é mostrado na figura 3.1. Este é composto de um túnel de vento de circuito aberto com uma seção de teste retangular com dimensões de 400mm x 400mm, com janelas de acrílico na lateral e superior com dimensões de 260mm x 410mm respectivamente para a visualização da formação de frost no cilindro permitindo fotografar a camada de frost durante todo o teste. Os cilindros foram chamados de: dianteiro, trazeiro e lateral e foram fixados verticalmente na seção de teste com dimensão útil de contato com o ar úmido de 400mm os quais são alimentados por um fluido secundário sendo este bombeado desde o tanque de resfriamento até o seu escoamento pelo interior do tubo através da utilização de uma bomba de 0,5HP de potência. A distância entre os centros dos cilindros foi baseada conforme a configuração geométrica dos tubos de evaporadores comerciais que são três vezes o diâmetro do tubo. Os fluidos de transferência de calor utilizados no sistema foram o monoclorodifluormetano (R-22) como refrigerante primário e o etanol como fluido secundário. Segundo Stoecker and Jones (1985), o refrigerante primário é usado em sistemas de refrigeração por compressão a vapor e refrigerante secundário ou fluido secundário é utilizado para transportar energia térmica à baixa temperatura de um local para outro, estando estes geralmente na fase líquida. O tanque de resfriamento foi totalmente isolado do ambiente através da utilização de camadas de isopor, possuindo dimensões de 110mm x 350mm e desta maneira foi utilizado como reservatório térmico para o fluido secundário. A tabela 3.1 apresenta algumas propriedades dos fluidos refrigerantes utilizados a uma temperatura de referência de 20°C. Através de um sistema convencional de refrigeração por compressão a vapor o refrigerante primário é resfriado e então troca calor com o fluido secundário em um trocador de calor de casco e tubos com 11 passes. Desta forma, o fluido secundário pode atingir baixas temperaturas específicas, utilizadas nos testes para avaliar o fenômeno de formação de gelo. A temperatura do tanque de resfriamento é

controlada através do uso de um termostato e assim pode ser ajustada para qualquer valor desejado. A vazão mássica do fluido secundário foi medida através da utilização de uma placa de orifício de latão adequadamente calibrada com duas tomadas de pressão ligadas a uma coluna de mercúrio, através de um sistema by-pass. A temperatura na entrada e saída do tubo de ensaio vertical é medida por termopares tipo T e que foram também calibrados (apêndice B).

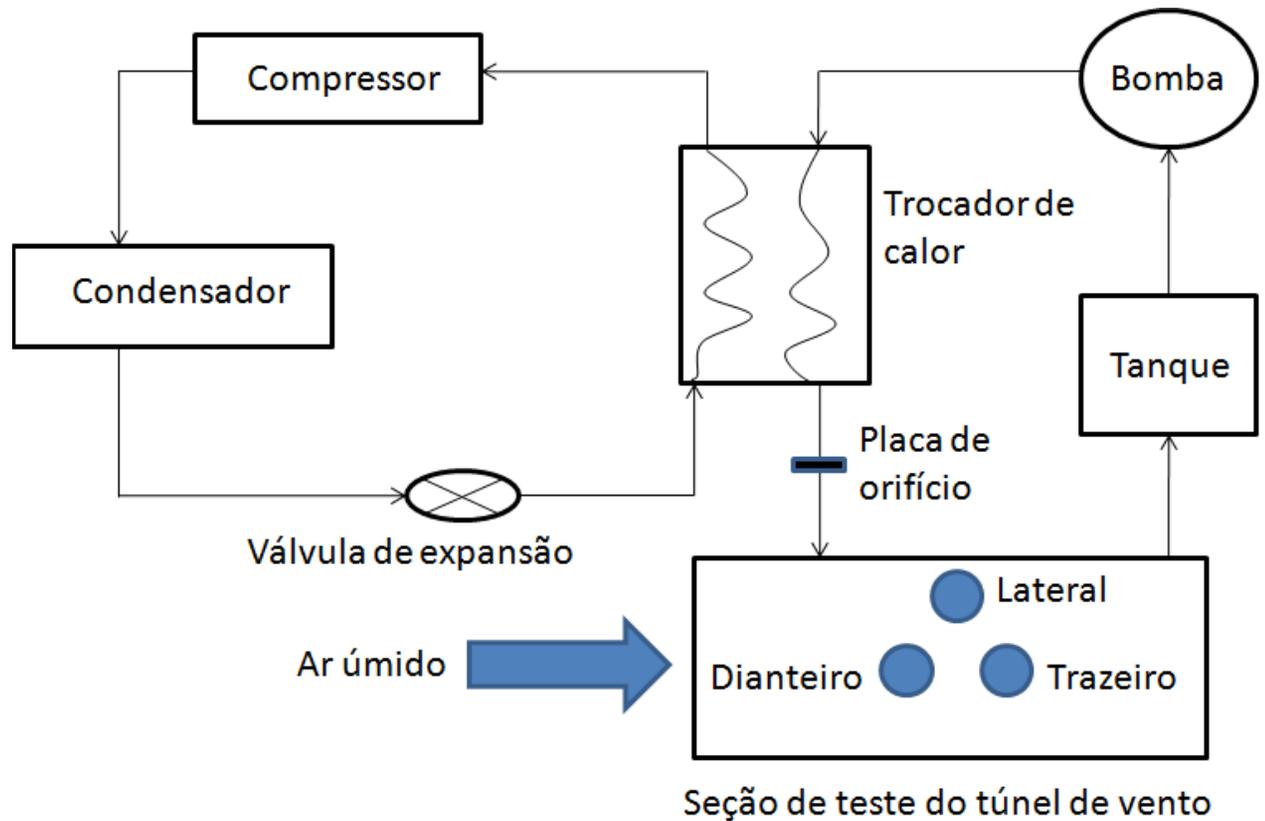


Figura 3.1 Arranjo experimental da bancada de teste

A vazão volumétrica de ar é controlada pela variação da frequência do motor de acionamento do túnel através da utilização de um inversor de frequência e este foi calibrado para medir a vazão volumétrica no túnel. A calibração foi realizada através da medição da velocidade do ar por um anemômetro de fio quente. Para isso, a seção de saída do túnel de vento foi dividida em oito seções retangulares e a velocidade medida pelo anemômetro de fio quente sendo este posicionado no centro de cada seção retangular. A somatória do produto das velocidades com a área de cada seção retangular resulta na vazão volumétrica de ar para cada frequência

especificada. Este procedimento foi repetido para todas as faixas de frequências e os resultados foram plotados para obter um gráfico entre a frequência e a vazão volumétrica de ar úmido.

Tabela 3.1 – Propriedades dos Fluidos Refrigerantes R-22 * e Etanol.

Propriedade	R - 22	Etanol
Temperatura de ebulição (°C)	-40,9	78,4
Temperatura de solidificação (°C)	-157	-112
Massa específica (kg/m ³)	1200	790
Condutividade térmica (W/mK)	0,090	0,176
Viscosidade dinâmica (mPa.s)	0,206	1,4

Gás liquefeito a 20°C
Fonte : Stoecker (1985).

A umidade do ar é fornecida pela utilização de um umidificador e o vapor de água é distribuído na seção do túnel de vento por um tubo de distribuição. As temperaturas de bulbo seco e úmido foram medidas por meio de termopares posicionados antes e depois dos cilindros. Para medir a espessura da camada de gelo transiente uma câmera digital de alta resolução foi utilizada para fotografar o processo de formação de gelo em torno dos cilindros em duas posições: uma na direção axial e a outra na direção radial aos cilindros. Para se evitar o problema de paralaxe, a câmera foi centralizada na área central do cilindro a uma distância fixa de 500mm onde uma escala de medição de precisão também foi colocada nessa região do tubo. As fotografias foram digitalizadas para obter a espessura real da camada de gelo.



Figura 3.2 Vista geral do sistema experimental.



Figura 3.3 Seção de teste do túnel de vento.

As medições foram realizadas utilizando seis valores para a vazão volumétrica de ar úmido, para a temperatura de fluido secundário e para a vazão mássica do mesmo fluido conforme mostram as tabelas 3.2, 3.3 e 3.4.. Os resultados são apresentados no capítulo seis.

3.3 Equipamentos utilizados

O sistema experimental mostrado na Figura 3.1 é constituído por:

1. Um túnel de vento com seção de testes para os cilindros verticais;
2. Reservatório térmico para o fluido secundário (Etanol);
3. Trocador de calor para resfriar o Etanol;
4. Placa de aquisição de dados;
5. Microcomputador;
6. Válvulas reguladoras;
7. Placa de orifício;
8. Bomba para circulação do Etanol;
9. Termopares;
10. Inversor de frequência;
11. Umidificador;
12. Unidade de refrigeração com refrigerante R-22;
13. Válvula solenóide;
14. Sistema de controle com termopar e transdutor;
15. Disjuntores;
16. Tubos de cobre;
17. Câmera fotográfica;
18. Isolamento Térmico à base de poliuretano para os tubos;
19. Janela de acrílico;

3.4 Medidas realizadas

As medidas realizadas durante os experimentos foram:

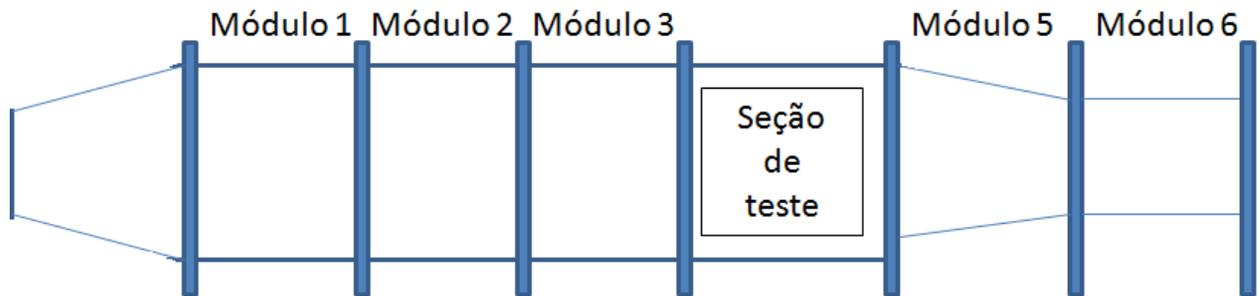
- Medidas das temperaturas na superfície do tubo, nas seções do túnel de vento, na entrada e saída do cilindro.
- Medida radial da espessura da camada de gelo em torno dos cilindros.
- Medida de vazão do fluido secundário.

3.4.1 Sistema de medição de temperatura

Para garantir a qualidade e a precisão necessárias para avaliação das temperaturas calibraram-se os termopares de acordo com as normas de medição de temperatura ANSI/ASHARE 41.1 – 1986. No sentido de cumprir as especificações da norma, todos os termopares devem apresentar uma incerteza de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Para a bancada experimental foram utilizados termopares do tipo T, isto é, de cobre e constantan, que atende com grande confiabilidade o intervalo de temperatura de interesse (-5°C a -25°C). Estes termopares foram distribuídos na seção de teste no seguinte modo:

- Termopar 1: localizado no módulo 1 (bulbo seco);
- Termopar 2: localizado no módulo 2;
- Termopar 3: localizado no módulo 3 (bulbo úmido);;
- Termopares 4, 5 e 6: na superfície dos tubos localizados na seção de teste;
- Termopares 7, 8, 9, 10, 11 e 12: na entrada e saída de fluido secundário nos cilindros, sendo dois termopares para cada tubo;
- Termopar 13: localizado no módulo 5;
- Termopar 14: localizado no módulo 6;



Módulos ao longo do túnel de vento para posicionamento dos termopares

Figura 3.4 – Posicionamento dos termopares ao longo do túnel de vento.

Para garantir o nível de incerteza exigido pela norma ASHRAE, optou-se pela calibração de todos os termopares em conjunto com o sistema de aquisição de dados da marca NOVUS, mostrado na figura 3.5. O sistema de aquisição de dados da NOVUS coleta os sinais digitais e através de uma interface que transmite ao computador. Foi configurado para fornecer, a temperatura instantânea, na escala Celsius [$^{\circ}\text{C}$], a cada 180 segundos, a partir do início dos registros dos dados para cada um dos termopares.

Para a calibração foi utilizado um equipamento calibrador, onde foram inseridos os termopares e um termômetro aferido pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), cuja precisão é de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Neste equipamento utiliza-se um banho termostático (etanol) cuja temperatura foi variada de -25 a -5°C . Para cada valor de temperatura foi feito o mesmo procedimento para obter a curva de calibração desejada.



Figura 3.5 Vista geral do sistema de aquisição de dados (novus).

3.4.2 Espessura do gelo

A espessura da camada de gelo foi determinada mediante aquisição de imagens, através de uma câmera fotográfica da marca SONY com alta resolução de 12,1 megapixels. Por meio de uma escala, em milímetros, colocada no ponto de estagnação e localizada na superfície central do tubo, foram obtidas imagens da evolução da camada de gelo em intervalos regulares e pré-determinados de tempo. As imagens foram descarregadas da memória da câmera e armazenadas no computador em formato JPEG para depois serem digitalizadas utilizando o software de computador AutoCAD 2006, o qual fornecia os valores reais da espessura da camada de gelo para cada intervalo de tempo, tendo como padrão a escala conhecida.

3.4.3 Vazão do fluido secundário

A vazão do fluido secundário ou fluido de trabalho foi determinada através de uma placa de orifício previamente calibrada. Esta placa estava conectada a duas tomadas de pressão de uma coluna de mercúrio que proporcionava a medida da queda de pressão ocasionada pelo escoamento do fluido secundário através da placa de orifício, esta queda de pressão foi convertida em medida de vazão e substituindo esta variável na equação de calibração da placa de orifício que foi encontrada através do software Origin 6.1, tinha para cada queda de pressão, uma medida de vazão (Apêndice B).

Para obter as medidas foi fornecida a quantidade em massa de etanol através da utilização de uma balança precisa e durante um determinado intervalo de tempo, sendo que para cada valor de vazão mássica obtinha-se um valor correspondente da perda de pressão. Foram realizadas varias medidas com valores diferentes de vazão para a construção da curva de calibração, além de que, para cada uma delas, eram feitas repetições objetivando a estimativa da incerteza.

A medida de cada massa de fluido secundário foi realizada numa média de tempo entre 20s evitando assim o problema de evaporação do etanol.

3.5 Descrição do procedimento experimental

O procedimento experimental pode ser resumido da seguinte forma: primeiro ligava-se o disjuntor central responsável pela alimentação de energia para todo o sistema e depois o compressor para o funcionamento da unidade de refrigeração. Posteriormente, o termostato era ligado e indicado a sua temperatura de teste. Em seguida acionava-se a bomba para a circulação do fluido secundário.

Paralelamente a este procedimento o Etanol era resfriado em um trocador de calor pela unidade condensadora até atingir o regime permanente e estabilidade na temperatura de trabalho desejada. Por outro lado, enquanto o etanol era resfriado, este também circulava pelos cilindros

de ensaios colocados na seção de testes. Este procedimento foi realizado com o objetivo de que, ao momento de iniciar o ensaio o sistema estivesse em equilíbrio, com a temperatura de trabalho estável para ser utilizada durante o experimento.

A câmera fotográfica era colocada em duas posições: uma na direção axial e a outra na direção radial do cilindro permitindo a os registros de imagens da formação transiente de frost.

Após a estabilização da temperatura de trabalho, dava-se início aos ensaios.

A faixa de valores das variáveis experimentais utilizadas nos testes foi condicionada à faixa de valores que o sistema experimental permitia utilizar.

As tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 mostram a grade de ensaios utilizados e realizados durante os testes experimentais.

Tabela 3.2 Variáveis experimentais para um cilindro vertical.

Experimentos	T_{fsc} [°C]	\dot{m}_{fsc} [kg/s]	\dot{V}_{ar} [m ³ /s]
1	-10	0,028	0,03
2	-10	0,028	0,05
3	-10	0,028	0,07
4	-10	0,028	0,09
5	-10	0,028	0,1
6	-10	0,028	0,12
7	-13	0,021	0,03
8	-13	0,028	0,03
9	-13	0,038	0,03
10	-13	0,044	0,03
11	-13	0,054	0,03
12	-13	0,059	0,03
13	-10	0,028	0,03
14	-12	0,028	0,03
15	-15	0,028	0,03
16	-16	0,028	0,0,3
17	-17	0,028	0,03
18	-19	0,028	0,0,3

Tabela 3.3 Variáveis experimentais para dois cilindros.

Experimentos	T_{fsc} [°C]	\dot{m}_{fsc} [kg/s]	\dot{V}_{ar} [m ³ /s]
1	-20	0,028	0,03
2	-20	0,028	0,035
3	-20	0,028	0,04
4	-20	0,028	0,046
5	-20	0,028	0,05
6	-20	0,028	0,06
7	-20	0,019	0,03
8	-20	0,024	0,03
9	-20	0,026	0,03
10	-20	0,028	0,03
11	-20	0,029	0,03
12	-20	0,030	0,03
13	-15	0,028	0,03
14	-16	0,028	0,03
15	-17	0,028	0,03
16	-18	0,028	0,03
17	-19	0,028	0,03
18	-20	0,028	0,03

Tabela 3.4 Variáveis experimentais para três cilindros.

Experimentos	T_{fsc} [°C]	\dot{m}_{fsc} [kg/s]	\dot{V}_{ar} [m³/s]
1	-20	0,017	0,025
2	-20	0,017	0,03
3	-20	0,017	0,035
4	-20	0,017	0,04
5	-20	0,017	0,046
6	-20	0,017	0,05
7	-20	0,0079	0,025
8	-20	0,0089	0,025
9	-20	0,0135	0,025
10	-20	0,015	0,025
11	-20	0,016	0,025
12	-20	0,017	0,025
13	-15	0,017	0,025
14	-16	0,017	0,025
15	-17	0,017	0,025
16	-18	0,017	0,025
17	-19	0,017	0,025
18	-20	0,017	0,025

A figura 3.5 mostra resumidamente o procedimento utilizado para investigar a influência dos parâmetros usados na formação de gelo.

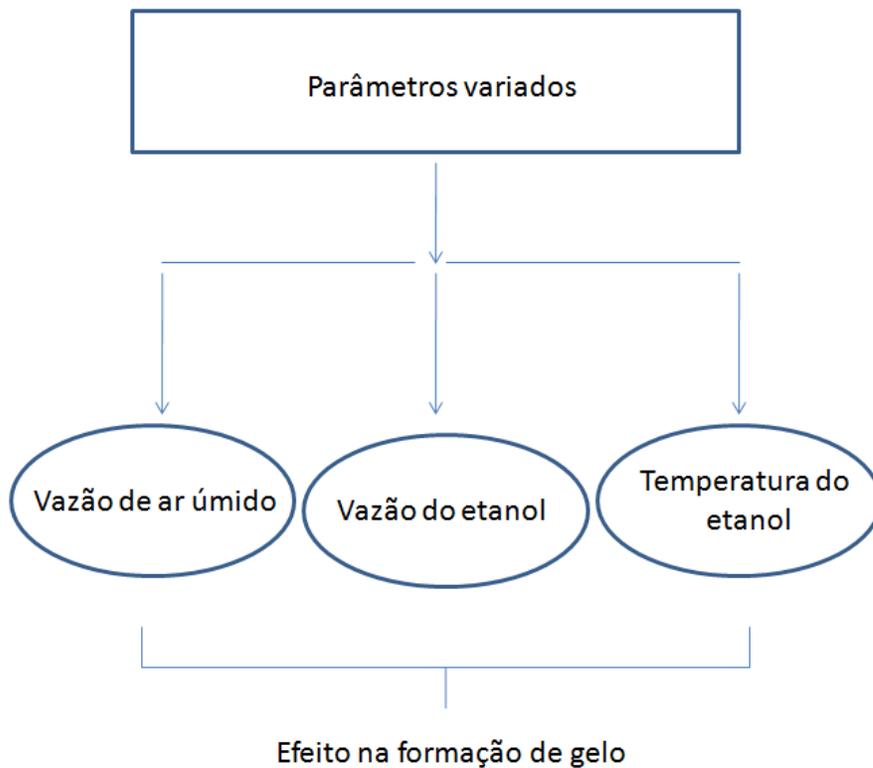


Figura 3.6 Esquema do procedimento experimental.

4 MODELAGEM DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE FROST

4.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se o modelo matemático desenvolvido por Scalon (1993) sendo este baseado no trabalho de Tao et. al. (1993) e que foi adaptado e utilizado neste trabalho para análise do processo de formação de frost em torno de um cilindro vertical. No capítulo 2 apresentou-se o processo de formação de gelo que pode ser subdividido em diversas etapas. Para uma modelagem mais abrangente e por se tratarem dos processos mais importantes neste fenômeno, Tao et. al. (1993) subdividiram o processo em duas fases:

1. Crescimento unidimensional dos cristais
2. Ramificação dos cristais.

O primeiro refere-se ao período no qual há formação e ocorrência do crescimento de gelo na direção vertical à superfície resfriada. Já o segundo é a fase onde os cristais vizinhos começam a interagir entre si formando uma rede complexa e porosa.

O método mais completo para simulação de fenômenos de formação de frost é o apresentado por Tao et. al. (1993). Esse modelo utiliza um parâmetro indicador chamado tempo de transição (t_{tr}) que estabelece que haja predominância de uma transição entre uma fase e outra.

Tanto Tao et. al. (1993) como Scalon (1993) utilizaram valores para esse tempo como sendo $\frac{2}{3}$ do tempo de transição fornecido por Hayashi et. al. (1977) e este trabalho utilizará essa mesma formulação do modelo, embora esta aproximação não seja exata, pois ainda não se obteve nenhum modelo que expresse uma variável de deposição. A figura 4.1 mostra os valores obtidos para o tempo de transição:

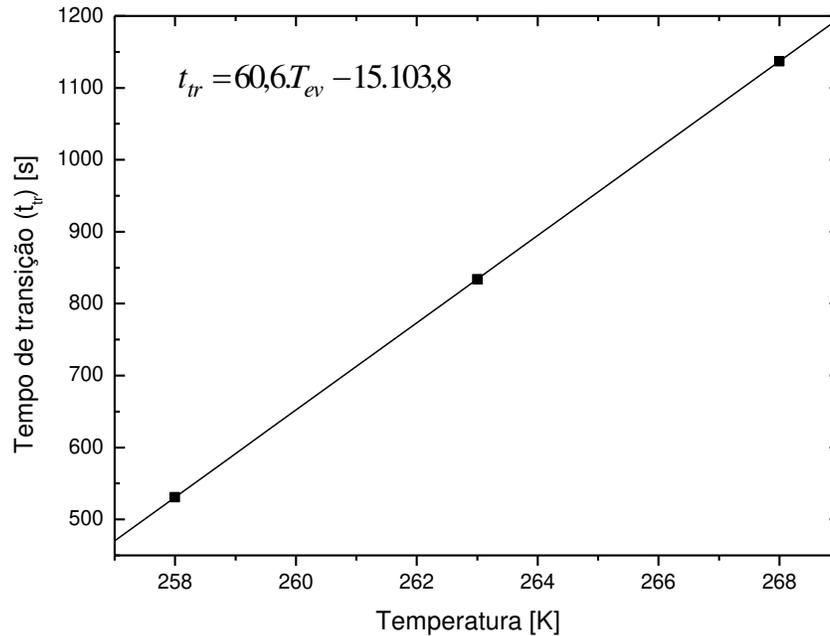


Figura 4.1 Valores dos tempos de transição na faixa de -20°C a 0°C .

Conhecendo o procedimento geral apresenta-se a seguir uma descrição mais detalhada do método que, apesar de se tratar de um método recente, aparece como o mais completo para simular fenômenos de formação de frost.

4.2 Crescimento unidimensional dos cristais

É a primeira etapa no processo de formação de frost e corresponde à formação de núcleos e seu conseqüente crescimento na direção perpendicular a superfície. Este processo mesmo sendo extremamente rápido, é importante na modelagem do processo de formação de frost e sua influência se notará na segunda fase, ou seja, a primeira fase é uma etapa que deve ser cumprida para que se chegue à próxima fase. No processo de formação de frost acontece de forma simultânea transferência de calor e de massa e conseqüentemente as equações governantes para

este estágio são derivadas de balanços de calor e de massa para o modelo físico que se encontra nas figuras 4.2 e 4.4 e que tem como características:

- Os núcleos de gelo formados sobre a superfície fria do cilindro simulam uma floresta de elementos de gelo de uma base, comprimento e espaçamento determinados, sobre os quais se tem ar úmido escoando.
- Ocorre transferência de calor e de massa sobre esses elementos.

Segundo Tao et. al. (1993) para formular este problema tem que ser admitido que o crescimento do cristal ocorra sempre em formato cilíndrico de raio não constante e unidirecional, conforme mostrado na figura 4.2:

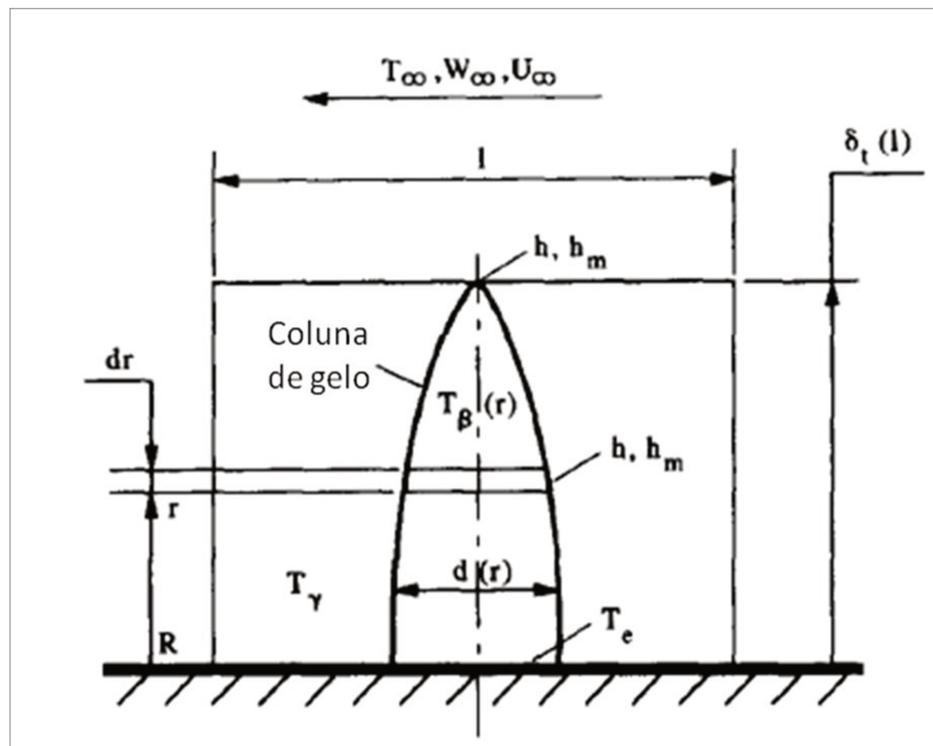


Figura 4.2 Esquema do modelo físico de crescimento do cristal de gelo.

Se considerarmos uma parcela dr e efetuando um balanço de energia e de massa, tem-se a seguinte forma:

Através da equação da energia, efetua-se o seguinte balanço de calor:

$$\{\text{Variação da energia interna}\} + \{\text{calor latente devido à mudança de fase na fronteira}\} = \{\text{fluxo de calor entrando no volume}\} - \{\text{fluxo de calor saindo do volume}\}$$

Substituindo as equações referentes aos termos da equação anterior, tem-se:

$$\rho_g \cdot c_{p,g} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot dr - \rho_g \cdot \lambda \cdot \frac{\pi}{4 \cdot dt} \left[\left(d + \frac{\partial d}{\partial t} \cdot dt \right)^2 - d^2 \right] \cdot dr = q_r + q_{conv} - q_{r+dr} \quad \therefore \quad (4.1)$$

$$\rho_g \cdot c_{p,g} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot dr - \rho_g \cdot \lambda \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2d \cdot \frac{\partial d}{\partial t} \cdot dr = -k_g \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + h \cdot (\pi \cdot d \cdot dr) \cdot (T_\gamma - T_\beta) - \left\{ k_g \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left[k_g \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right] dr \right\} \quad (4.2)$$

$$\rho_g \cdot c_{p,g} \cdot d \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 4 \cdot h \cdot (T_\gamma - T_\beta) + \frac{1}{d} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(k_g \cdot d^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + 2 \cdot \rho_g \cdot \lambda \cdot \frac{\partial d}{\partial t}$$

Após o balanço global de energia, resulta:

$$\rho_g \cdot c_{p,g} \cdot d \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 4 \cdot h \cdot (T_\gamma - T_\beta) + 2 \cdot k_g \cdot \frac{\partial d}{\partial r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + k_g \cdot d \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + 2 \cdot \rho_g \cdot \lambda \cdot \frac{\partial d}{\partial t} \quad (4.3)$$

Através da equação da difusão, efetua-se o seguinte balanço de massa:

$$\{\text{Variação de massa}\} = \{\text{taxa de transferência de massa}\}$$

Substituindo as equações referentes aos termos acima, tem-se:

$$\rho_g \cdot \frac{\pi}{4 \cdot dt} \cdot \left[\left(d + \frac{\partial d}{\partial t} \cdot dt \right)^2 - d^2 \right] \cdot dr = h_m \cdot (\pi \cdot d \cdot dr) \cdot (W_\gamma - W_\beta) \quad \therefore \quad (4.4)$$

$$\rho_g \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2d \cdot \frac{\partial d}{\partial t} \cdot dr = h_m \cdot (\pi \cdot d \cdot dr) \cdot (W_\gamma - W_\beta) \quad \therefore \quad (4.5)$$

Em que W_β indica concentração avaliada à temperatura T_β da fase sólida e leva a:

$$\rho_g \cdot \frac{\partial d}{\partial t} = 2 \cdot h_m \cdot (W_\gamma - W_\beta) \quad (4.6)$$

As equações (4.3) e (4.6) referem-se ao modelo do primeiro estágio do processo de formação de frost e este é considerado como unidimensional. Através das condições iniciais e de contorno para esse estágio pode-se obter a resolução das equações (4.3) e (4.6).

Condições de contorno

Desta maneira, as equações (4.3) e (4.6) estão sujeitas às seguintes condições de contorno:

a. $r = \delta$: nesse caso, há transferência de massa ocorrendo. Supondo o diâmetro da superfície da camada de frost igual a d_0 , tem-se:

$$d = d_0 \quad (4.7)$$

$$-\rho_g \cdot \lambda \cdot d_0 \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} = k_g \cdot d_0 \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\delta} + h \cdot d_0 \cdot (T_{\infty} - T_s) \therefore \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\delta} = \frac{h}{k_g} \cdot (T_{\infty} - T_s) + \frac{\rho_g \cdot \lambda}{k_g} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (4.8)$$

$$\rho_g \cdot d_0 \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} = h_m \cdot d_0 \cdot (W_{\infty} - W_{\delta}) \therefore \frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{h_m}{\rho_g} \cdot (W_{\infty} - W_{\delta}) \quad (4.9)$$

b. $r = 0$: na superfície do cilindro, ou seja, o diâmetro da superfície da camada de frost é assumido igual ao seu posterior e a temperatura de superfície de frost é igual à temperatura de evaporação:

$$T_s = T_e \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial d}{\partial r} = 0 \quad (4.11)$$

c. $t = 0$: Representam as condições iniciais do fenômeno:

$$d = d_0 \quad (4.12)$$

$$\delta = \delta_0 \quad (4.13)$$

$$T_{\delta} = T_e \quad (4.14)$$

Considerações importantes

A temperatura na fase gasosa T_γ é unção da temperatura ambiente e da temperatura da superfície fria do cilindro. O valor de T_γ depende também do fator α (fator relacionado à turbulência do escoamento) que pode variar entre 0, para números de Reynolds muito baixos, e 1, para Re muito altos. Assim:

$$T_\gamma = \alpha T_\infty + (1 - \alpha) T_\beta \quad (4.15)$$

Não se compreende bem como ocorre o fenômeno de nucleação, o que implica num desconhecimento do número e da distância entre si dos núcleos. Desta forma, foi estabelecida a condição de um núcleo por volume. Obviamente que o diâmetro do núcleo formado não pode superar o tamanho do volume, para isso o diâmetro adotado é tal que forneça uma continuidade entre a velocidade de fronteira nas etapas:

$$d_0 = K_{frac}$$

Em que K_{frac} se refere ao tamanho do volume na direção paralela à superfície e teve como valores adotados os mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 Valores de K_{frac} adotados.

$\Delta C < 0,008$	$0,008 < \Delta C < 0,01$	$0,01 < \Delta C < 0,013$	$\Delta C > 0,013$
0,5	0,65	0,7	0,75

Os valores de ΔC são dados em kg / m^3 .

Outra observação é que δ_0 não pode ser zero, basicamente por dificuldades numéricas, como subdividir regiões que não existem. Assim, é assumido um valor bem pequeno para δ_0 , sendo:

$$\delta_0 = \frac{d_0}{30}$$

4.3 Equações de acoplamento entre os dois estágios

Para aplicar o modelamento de um estágio para outro é preciso que se tratem apropriadamente os resultados obtidos na primeira etapa para serem utilizados na seguinte. A forma de tratamento são as seguintes, para cada uma das i subdivisões:

A fração volumétrica $\varepsilon_{\beta,i}$, é avaliada de:

$$\varepsilon_{\beta,i} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4 \cdot l^2} \quad (4.16)$$

A temperatura T_i pode ser avaliada utilizando a equação:

$$T_i = \varepsilon_{\beta,i} \cdot T_\beta + (1 - \varepsilon_{\beta,i}) T_\gamma \quad (4.17)$$

A densidade $\rho_{f,i}$ e o calor específico $c_{p,i}$ são avaliados respectivamente por:

$$\rho_{f,i} = \varepsilon_{\beta,i} \cdot \rho_\beta + (1 - \varepsilon_{\beta,i}) \rho_\gamma \quad (4.18)$$

$$c_{p,i} = \varepsilon_{\beta,i} \cdot c_{p,\beta,i} + (1 - \varepsilon_{\beta,i}) c_{p,\gamma,i} \quad (4.19)$$

É importante relatar que aqui existe uma conversão que tem semelhança a um efeito degrau. Na realidade o processo de transformação de colunas de gelo para um meio poroso é um processo que não ocorre instantaneamente, no entanto na simulação numérica torna-se obrigatória essa transformação instantânea. Isto implica em transformar as colunas de gelo da primeira fase em meio poroso, fazendo com que o gelo agrupado nas colunas de repente se espalhasse por todo o volume, formando um meio poroso com as propriedades médias entre o gelo e o ar. A figura 4.3 mostra esta transformação:

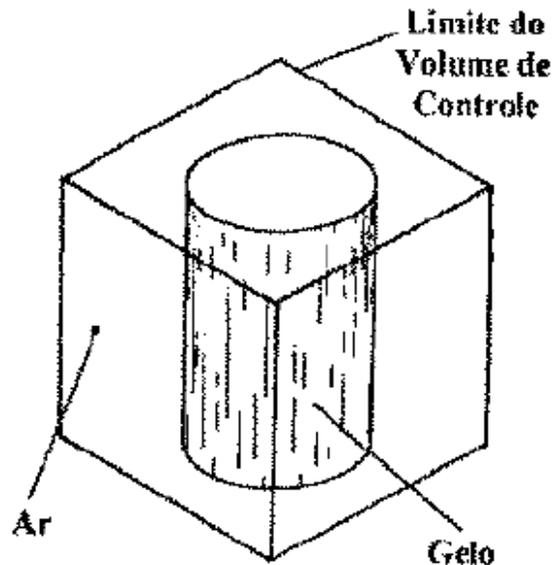


Figura 4.3 Cilindro de gelo circundado de ar num volume de controle (Scalon, 1993).

4.4 Fase de ramificação dos cristais

Segundo Scalon (1993) a fase de ramificação dos cristais é a etapa de processo de formação de gelo que é tratada como um meio poroso e sua formulação é representada fisicamente pela infiltração do condensado na camada de gelo e isto ocorre de forma preponderante quando a temperatura de superfície $T_s = -5^\circ\text{C}$.

O modelamento realizado foi desenvolvido sob as seguintes restrições:

- Transferência de calor e de massa unidimensional;
- Pressão interna do meio poroso uniforme;
- Equilíbrio termodinâmico entre a fase sólida β e líquida ($T_{fasesólida} = T_{fase líquida}$);
- Processo de difusão mais significativo que o processo convectivo dentro do meio poroso;
- Ar na condição de saturação dentro do meio poroso.

Especificando um elemento de volume ΔV dentro do meio poroso conforme mostra a figura 4.4, obtêm-se diretamente as equações (4.20), (4.21) e (4.22) depois se efetua os seguintes balanços:

- Balanço de energia:

$$\rho_f \cdot c_{p,f} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{m} \cdot \lambda = \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{ef} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4.20)$$

- Balanço de massa para um determinado V.C.:

✓ Fase γ - sob a hipótese do efeito de difusão ocorrendo primeiramente, a equação da difusão da fase gás-vapor fica:

$$\frac{\partial \varepsilon_\gamma W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{ef} \frac{\partial W}{\partial r} \right) \quad (4.21)$$

✓ Fase β - a equação da continuidade da fase gelo em meio poroso sob a hipótese de presença de ar saturado:

$$\frac{\partial \varepsilon_\beta}{\partial t} = \dot{m} = W - W_{sat} \quad (4.22)$$

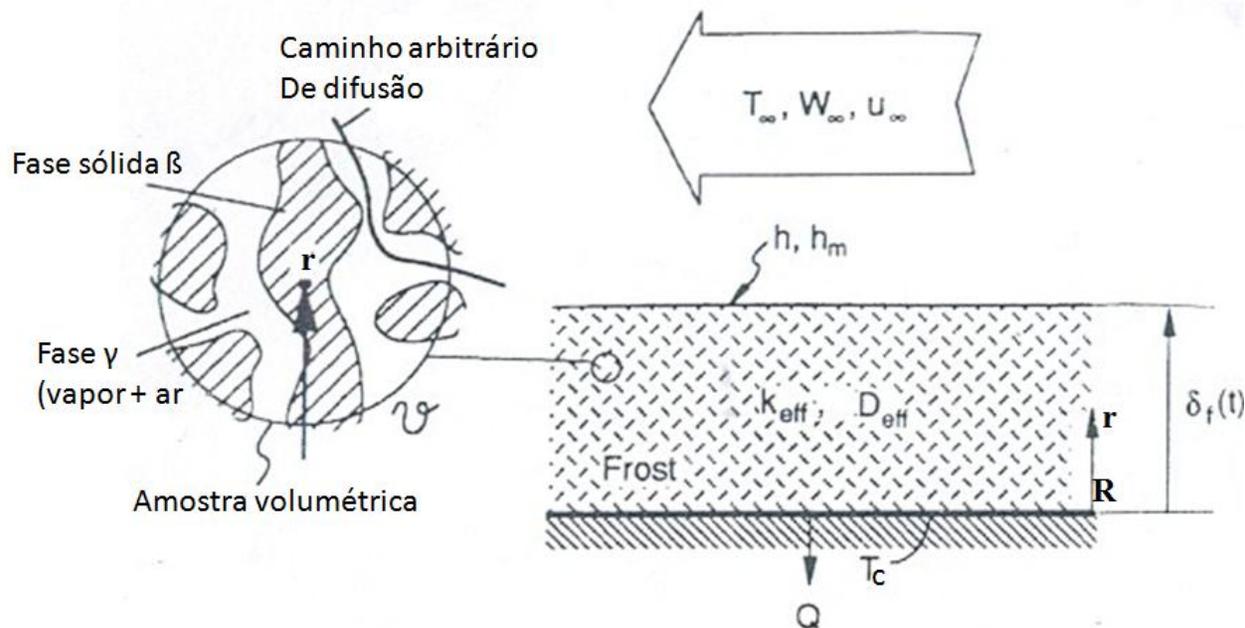


Figura 4.4 Modelo do volume utilizado dentro do meio poroso (Tao, 1993).

Verifica-se que entre os valores de umidade determinados existem alguns acima da condição de saturação, os que forem encontrados serão sublimados, ou seja, convertidos para gelo aumentando a fração de sólido.

As equações (4.20), (4.21) e (4.22) referem-se ao modelo do segundo estágio do processo de formação de frost e este é também considerado como unidimensional. Através das condições iniciais e de contorno para esse estágio pode-se obter a resolução das equações (4.20), (4.21) e (4.22).

Condições de contorno

As equações (4.20), (4.21) e (4.22) estão sujeitas às mesmas condições iniciais da formulação para o primeiro estágio, sendo elas obtidas pelas equações de acoplamento utilizando os resultados da primeira fase.

Na superfície do cilindro em $r=0$:

$$T_s = T_e$$

$$\frac{\partial \varepsilon_d}{\partial r} = 0$$

As condições de fronteira móvel em $r = \delta$ são expressas de forma diferente:

$$h_m.(W_\infty - W_\delta) = D_{ef,s} \cdot \frac{\partial W}{\partial r} + \rho_{f,s} \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (4.23)$$

$$h.(T_\infty - T_s) = k_{ef} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} - \rho_{f,s} \cdot \lambda \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\delta}{\partial r} = 0$$

Avaliação das propriedades

As propriedades do gelo são avaliadas utilizando as correlações empíricas encontradas na literatura:

- A condutividade térmica k_g é dada por (Dietenberg, 1983),:

$$k_g = \frac{630}{T} \quad [\text{W/m.K}], \text{ onde } T \text{ em K.} \quad (4.25)$$

- O calor específico $c_{p,g}$ pode ser expresso por (Padilha, 1990):

$$c_{p,g} = 2116,56 + 7,2845 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad [\text{kJ/kg.K}], \text{ onde } T \text{ em K.} \quad (4.26)$$

- Segundo a ASHRAE (1989) o volume específico v_g é dado por:

$$v_g = 1,0907 \cdot 10^{-3} + 1,4635 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad [\text{m}^3/\text{kg}], \text{ onde } T \text{ em K.} \quad (4.27)$$

- Segundo Sami et. al. (1989), a densidade ρ_g é

$$\frac{1}{\rho_g} = 0,0010907 + 1,4635 \cdot 10^{-7} \cdot T \quad [\text{kg/m}^3], \text{ onde } T \text{ em K.} \quad (4.28)$$

As propriedades do ar seco, segundo a ASHRAE (1989) são avaliadas de:

- Condutividade térmica k_{ar}

$$k_{ar} = 0,001968 + 8,15 \cdot 10^{-5} \cdot T \quad [\text{W/m.K}], \text{ onde } T \text{ em K.} \quad (4.29)$$

- Calor específico $c_{p,ar}$

$$c_{p,ar} = 1,004 \quad [\text{kJ/kg.K}], \text{ onde } T \text{ em K.} \quad (4.30)$$

- Densidade ρ_{ar}

$$\rho_{ar} = \frac{344,9}{T} \quad [\text{kg/m}^3], \text{ onde } T \text{ em K.} \quad (4.31)$$

- O coeficiente efetivo de difusão é um dos parâmetros de determinação mais difícil, devido aos complexos mecanismos de difusão que acontecem neste fenômeno, Tao et. al. (1993) propõe a seguinte equação:

$$D_{ef} = \varepsilon_{\gamma} \cdot D \cdot (1 + F) \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (4.32)$$

Onde D é o coeficiente binário de difusão e pode ser avaliado de Eckert (1954):

$$D = 2,19 \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,81} \cdot 10^{-5} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (4.33)$$

- O coeficiente efetivo de difusão na superfície será:

$$D_{eff} = \varepsilon_{\gamma} \cdot D \cdot (1 + F_s) \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (4.34)$$

Onde os fatores F e F_s são fornecidos por Tao et. al. (1993), e são mostrados na figura 4.5.

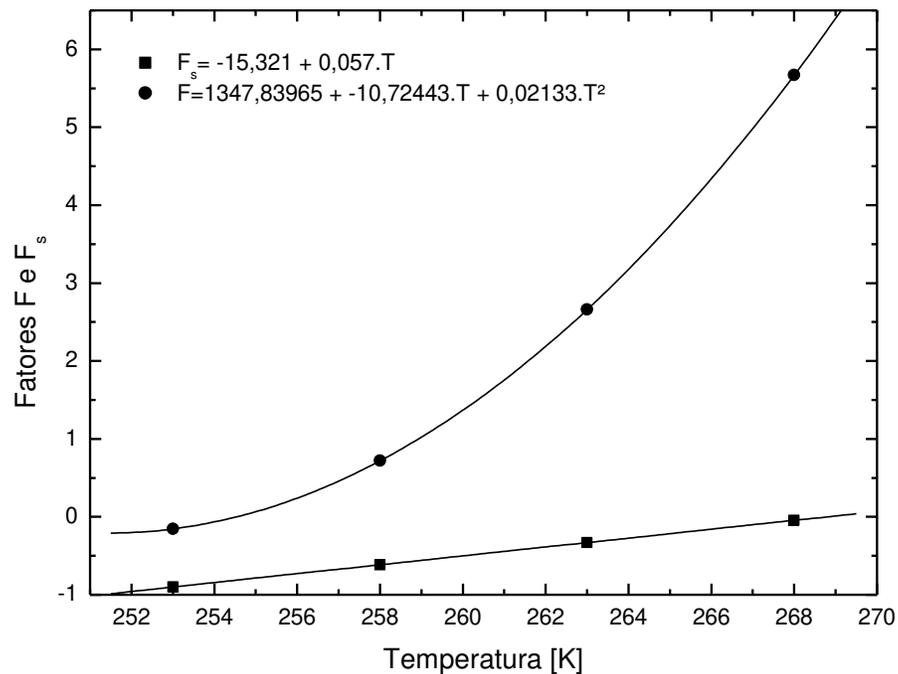


Figura 4.5 Valores dos fatores F e F_s em função da temperatura.

- A umidade de saturação do ar w é avaliada em função da pressão de saturação a uma determinada temperatura pela expressão:

$$w = 0,6218 \cdot \frac{P_{vap,sat}}{P_{total} - P_{vap,sat}} \quad (4.35)$$

- Se for necessária a concentração da fase ar γ pode-se aproximar através de:

$$W = U \cdot A \cdot \rho_{ar}$$

- Onde a pressão de saturação em qualquer tempo e posição da camada de gelo é avaliada em função da temperatura utilizando a equação empírica apresentada por Padki et. al. (1989):

$$\ln(P_{vap,sat}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 \cdot T + C_4 \cdot T^2 + C_5 \cdot T^3 + C_6 \cdot T^4 + C_7 \cdot \ln(T) \quad (4.36)$$

Onde:

$$\begin{aligned} C_1 &= -5674,5359, & C_5 &= 0,207477825 \cdot 10^{-8} \\ C_2 &= 6,392547 & C_6 &= -0,9484024 \cdot 10^{-12} \\ C_3 &= -0,9677843 \cdot 10^{-2} & C_7 &= 4,1635019 \\ C_4 &= 0,62215701 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

A equação 4.36 é válida para a faixa $-100^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$, onde T em K e $P_{vap,sat}$ em Pa.

- O volume específico total segundo Sanches (1986) para o ar úmido pode ser obtido pela expressão (convertida para unidades no SI):

$$\nu = 1,61168 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{T}{P} \left(1 + \frac{P_{vap}}{P} \right) \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

- O valor do calor latente de sublimação pode ser dado pela expressão mostrada em Parish et. al. (1972):

$$\lambda = h_{vap,T} - h_{gelo,T} = -0,195386 \cdot T[\text{K}] + 2837,77[\text{kJ} / \text{kg}] \quad (4.37)$$

- No término do procedimento deve-se recalculer o valor da densidade, condutividade e coeficiente de difusão na superfície e na camada interna de frost para cada um dos volumes, o que pode ser realizado através das expressões (4.17), (4.39) e (4.34) respectivamente.

A avaliação da condutividade efetiva da camada porosa de gelo é de vital importância para o modelamento do fenômeno. Existem várias expressões que permitem sua avaliação, a maioria delas relaciona-se com a densidade da camada de gelo. Uma expressão proposta por Yonko e Sepsy (1967) é muito utilizada em diversos trabalhos, no entanto, tem-se um modelo muito mais completo proposto por Dietenberg (1983) e este foi utilizado neste trabalho e é descrito na seção 4.5.

4.5 Modelo de Dietenberg para a condutividade térmica do gelo em função da densidade e da temperatura

A determinação da condutividade térmica do gelo a partir das condições do escoamento foi motivo de diversos estudos, desde alguns da década de 60, como o trabalho de Brian (1963), até os dias de hoje. A limitação desses estudos iniciais estava na aplicação em faixas relativamente pequenas com condições específicas. A partir dos trabalhos de Biguria e Wenzel, Dietenberg (1983) generalizou esta faixa e obteve um procedimento que funciona para qualquer densidade entre a do ar e a do gelo, e ainda se aplica para temperaturas entre 80 a 273 K.

O modelo de Dietenberg (1983) se baseia no tratamento do gelo como um meio poroso, e para tanto define a fração volumétrica ε como:

$$\varepsilon = \frac{\rho_g - \rho_f}{\rho_g - \rho_a} \quad (4.38)$$

Este modelo parte do princípio de que o gelo é formado por cilindros de gelo com bolhas de ar, ou ainda por placas e esferas de gelo. Desta maneira, a combinação de todos estes componentes fornece a condutividade do gelo. A expressão final para o cálculo da condutividade térmica do gelo é dada pela equação (4.39):

$$k_{ef} = \frac{1}{4} \cdot \left\{ (3 \cdot \varepsilon_c - 1)k_1 + (3 \cdot x_c - 1)k_u + \sqrt{[(3 \cdot \varepsilon_c - 1)k_1 + (3 \cdot x_c - 1)k_u]^2 + 8 \cdot k_1 \cdot k_u} \right\} \quad (4.39)$$

Onde:

$$k_u = (1 - \varepsilon)k_b + \varepsilon.k_c \text{ (limitante superior)}$$

$$k_l = (1 - \varepsilon)k_p + \varepsilon.k_s \text{ (limitante inferior)}$$

Definindo:

$$a = \frac{k_{e,ar}}{k_{gelo}}$$

$$k_{e,ar} = k_{ar} + \frac{T_s \cdot k_v}{\varepsilon}$$

$$T_s = \frac{1}{(1 + F_s)}$$

As parcelas que participam do cálculo da condutividade térmica do gelo são descritas a seguir:

I. Parcela devido às bolhas de ar (k_b):

$$k_b = k_g \cdot \frac{1 - 2 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{1 - a}{2 + a}\right)}{1 + \varepsilon \cdot \left(\frac{1 - a}{2 + a}\right)}$$

II. Parcela devido aos cilindros de gelo (k_c):

$$k_c = (1 - \varepsilon)k_g + \varepsilon.k_{e,ar}$$

III. Parcela devido às esferas de gelo (k_s):

$$k_s = k_g \cdot \frac{3 + \varepsilon \cdot (a - 1)}{3 - \varepsilon \cdot \left(\frac{a - 1}{a}\right)}$$

IV. Parcela devido às placas de gelo (k_p):

$$k_p = \frac{k_g \cdot k_{e,ar}}{(1 - \varepsilon)k_{e,ar} + \varepsilon.k_g}$$

O valor de ε_c é dado pela expressão obtida através da correlação com dados experimentais:

$$\varepsilon_c = 13,6 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon - \varepsilon_1)^2 \cdot \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} + \frac{\varepsilon - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \right) + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_1)^2}{2 \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \right]$$

Sendo:

$$\varepsilon_1 = 0,1726 \cdot \left(\frac{T}{273,16} \right)$$

$$\varepsilon_2 = 0,751$$

$$\varepsilon_3 = 0,3 \cdot \sin \left\{ \frac{\pi}{2} \cdot \left[\frac{\left[1 - \left(\frac{T}{273,16} \right) \right]}{\left[1 - \left(\frac{T_c}{273,16} \right) \right]} \right] \right\}$$

No entanto, se $\varepsilon < \varepsilon_1$, então $\varepsilon_c = 0$.

O valor de x_c é definido como:

$$x_c = 1 - \varepsilon_c$$

5 ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE FROST

5.1 Introdução

O programa numérico utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Scalon (1993) para prever o crescimento da fronteira de frost em torno de um cilindro vertical em escoamento de ar úmido. Este programa foi implementado e adaptado em linguagem de programação C++. Os parâmetros modificados para este estudo foram:

- Razão de umidade em kg/kgar
- Fração de volume K_{frac}
- Temperatura do ar úmido em °C
- Temperatura da superfície fria do cilindro em °C
- Raio do cilindro em m
- Incremento de tempo em s
- Diâmetro inicial da coluna de gelo em m
- Parâmetro α para condições de turbulência

Para a discretização das equações (4.3), (4.6), (4.8), (4.9), (4.20), (4.21), (4.23) e (4.24) foi utilizado o método de diferenças finitas com as condições na fronteira alteradas em casos onde é necessário conhecer a propriedade e têm-se na fronteira a condição de Newman. Para isto utilizou-se a extrapolação baseada na série de Taylor:

$$\phi_{n-1} = \phi_n - \frac{d\phi}{dx} \cdot \Delta x$$

É importante ressaltar ainda que esse método de discretização utilizado no tempo trabalha com as propriedades de forma implícita, ou seja, no tempo avançado. Segundo Scalon (1993) este

método foi escolhido por se tratar de um método estável e que no caso unidimensional não aumenta de forma significativa o custo computacional.

5.2 Tratamento numérico da primeira fase: crescimento unidimensional dos cristais

As equações básicas para esta fase são as de crescimento diametral e radial. Portanto, partindo da equação (4.3) para o crescimento diametral, a partir do balanço de energia, tem-se:

$$\rho.c_{p,g}.d \frac{\partial T}{\partial t} = 4.h.(T_\gamma - T_\beta) + 2.k_g \cdot \frac{\partial d}{\partial r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + k_g \cdot d \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + 2.\rho_g \cdot \lambda \cdot \frac{\partial d}{\partial t}$$

Integrando a equação acima, tem-se:

$$\int_{t_0}^{n_0} \int_{s_0} \rho.c_{p,g}.d \frac{\partial T}{\partial t} dt dr = \int_{t_0}^{n_0} \int_{s_0} 4.h.(T_\gamma - T_\beta) dr dt + \int_{t_0}^{n_0} \int_{s_0} 2.k_g \cdot \frac{\partial d}{\partial r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} dr dt + \int_{t_0}^{n_0} \int_{s_0} k_g \cdot d \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} dr dt + \int_{t_0}^{n_0} \int_{s_0} 2.\rho_g \cdot \lambda \cdot \frac{\partial d}{\partial t} dt dr$$

Resolvendo as integrais e dividindo a expressão por Δt , tem-se:

$$\begin{aligned} \rho.c_{p,g}.d \frac{(T_p^+ - T_p^-)}{\Delta t} \Delta r &= 4.h.(T_\gamma - T_p^+) \Delta r + 2.k_g \left[\left(T \cdot \frac{\partial d}{\partial r} \right)_{n_0}^+ - \left(T \cdot \frac{\partial d}{\partial r} \right)_{s_0}^+ \right] + \\ k_g \left[\left(d \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{n_0}^+ - \left(d \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{s_0}^+ \right] &+ \frac{2.\rho_g \lambda}{\Delta t} (d_p^+ - d_p^-) \Delta r \end{aligned} \quad (5.1)$$

Utilizando uma aproximação por diferenças centrais e elaborando também uma aproximação linear das propriedades da fronteira, tem-se que para uma propriedade qualquer ϕ numa interface f entre os pontos P e F numa discretização de fronteiras centradas e grade homogênea, ϕ pode ser expressa por:

$$\phi_f = \frac{\phi_P + \phi_F}{2} \quad (5.2)$$

Isto resulta na discretização da equação (5.1):

$$\rho \cdot c_{p,g} \cdot d \frac{(T_p^+ - T_p^-)}{\Delta t} \Delta r = 4 \cdot h \cdot (T_\gamma - T_p^+) \Delta r + 2 \cdot k_g \left[\frac{T_N^+ + T_P^+}{2} \cdot \frac{d_N^+ - d_P^+}{\Delta r} - \frac{T_N^+ + T_S^+}{2} \cdot \frac{d_P^+ - d_S^+}{\Delta r} \right] + \quad (5.3)$$

$$k_g \left[\frac{d_N^+ + d_P^+}{2} \cdot \frac{T_N^+ - T_P^+}{\Delta r} - \frac{d_N^+ + d_S^+}{2} \cdot \frac{T_P^+ - T_{sS}^+}{\Delta r} \right] + \frac{2 \rho_g \lambda}{\Delta t} \cdot (d_p^+ - d_p^-) \Delta r$$

Note que a condição de fluxo de calor para os pontos internos tem que ser resolvida por meio de algum método de resolução de sistemas, no nosso caso TDMA.

Agora a equação (4.6) obtida a partir do balanço de massa, foi dada por:

$$\rho_g \cdot \frac{\partial d}{\partial t} = 2 \cdot h_m \cdot (W_\gamma - W_\beta)$$

Integrando a equação (4.6), tem-se:

$$\int_t^{n_0} \int_{s_0} \rho_g \cdot \frac{\partial d}{\partial t} dt dr = \int_t^{n_0} \int_{s_0} 2 \cdot h_m \cdot (W_\gamma - W_\beta) dt dr \quad (5.4)$$

Resolvida a integral na equação (5.4), tem-se como resultado:

$$\frac{d_p^+ - d_p^-}{\Delta t} = \frac{2 \cdot h_m}{\rho_g} \cdot (W_\gamma - W_\beta) \quad (5.5)$$

A equação (5.5) é proveniente da localização nos pontos internos e permite o cálculo do diâmetro da coluna de gelo sendo resolvido explicitamente com base no último campo de temperaturas determinado por Scalon (1993).

Sendo que W_β representa a umidade de saturação avaliada em T_p^+ e W_γ à temperatura T_γ .

Considerando o mesmo balanço feito agora na superfície do tubo, determina-se o crescimento da fronteira e tem-se que o diâmetro já é conhecido por hipótese:

$$d_p^+ = d_0 \text{ (diâmetro da coluna de gelo na fronteira em } r = r_{cil} \text{)} \quad \text{e} \quad (5.6)$$

$$T_0 = T_e$$

E ainda que a taxa mássica transmitida pela superfície superior é transformada em gelo incrementando a fronteira como mostrado na equação (4.9):

$$\int_{t=s_0}^{n_0} \int \rho_g \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} dt dr = \int_{t=s_0}^{n_0} \int h_m \cdot (W_\infty - W_s) dt dr \quad (5.7)$$

Que implica em termos na superfície da camada do gelo:

$$\frac{\delta^+ - \delta^-}{\Delta t} = \frac{h_m}{\rho_g} \cdot (W_\infty - W_s) \text{ (posição da interface na fronteira em } r = r_{cil} + \delta \text{)} \quad (5.8)$$

Realizando o balanço de energia na fronteira, ou seja, na superfície da camada do gelo como mostrado na equação (4.8) e integrando-o, obtém-se:

$$\int_t \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_\delta dt = \int_t \frac{h}{k_g} \cdot (T_\infty - T_s) dt + \int_t \frac{\rho_g \cdot \lambda}{k_g} \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} dt \quad (5.9)$$

Para a avaliação das propriedades na superfície da camada do gelo seguiu-se uma simplificação realizada por Tao et. al. (1993) que equivale a uma expansão em série de Taylor de primeira ordem. Assim, para a propriedade ϕ , tem-se:

$$\phi_{n-1} = \phi_n - \frac{d\phi}{dr} \Big|_n \cdot \Delta r \quad (5.10)$$

Desta forma, a equação integrada dividida por Δt torna-se:

$$\frac{T_p^+ - T_s^+}{\Delta r} = \frac{h}{k_g} \cdot (T_\infty - T_p^+) + \frac{\rho_g \cdot \lambda}{k_g} \cdot \frac{\delta^+ - \delta^-}{\Delta t} \text{ (fluxo de calor na fronteira em } r = r_{cil} + \delta \text{)} \quad (5.11)$$

Finalmente, as condições na superfície do cilindro:

$$T_p = T_e \quad \text{(fluxo de calor na situação inicial de todos os pontos em } t=0 \text{)} \quad (5.12)$$

$$\frac{dd}{dr} = 0 \therefore d_p = d_N \quad (5.13)$$

A posição da interface na condição $t=0$ é dada por:

$$\delta = \frac{d_0}{30}$$

5.3 Tratamento numérico da segunda fase: ramificação dos cristais

As equações básicas da segunda fase do processo de formação de frost foram dadas no capítulo 4 e para obter as equações discretizadas utilizou-se o método de volumes finitos. Dessa maneira, a equação para o balanço de massa da fase γ é obtida a partir da equação da difusão dada pela equação (4.20) integrada:

$$\int_t^{n_0} \int_{s_0} \frac{\partial \varepsilon_\gamma W}{\partial t} dt dr = \int_t^{n_0} \int_{s_0} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{ef} \frac{\partial W}{\partial r} \right) dr dt \quad (5.14)$$

Resolvendo a integração da equação (5.14) supondo que a variação da fração de sólido seja pequena e desprezando-a, dividindo por Δt , temos:

$$(1 - \varepsilon_p^-) \frac{W_p^+ - W_p^-}{\Delta t} \cdot \Delta r = D_{ef} \cdot \left[\left(\frac{\partial W}{\partial r} \right)_{n_0} - \left(\frac{\partial W}{\partial r} \right)_{s_0} \right] \quad (5.15)$$

Que discretizada torna-se:

$$(1 - \varepsilon_p^-) \frac{W_p^+ - W_p^-}{\Delta t} \cdot \Delta r = D_{ef} \cdot \left(\frac{W_N^+ - W_p^+}{\Delta r} - \frac{W_p^+ - W_s^+}{\Delta r} \right) \quad (5.16)$$

A equação (5.16) fornece a umidade para os pontos internos.

A equação de balanço de massa para a fase β é dada pela parcela de umidade que está acima da saturação que após o cálculo:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} = \dot{m}_p = W_p - W_{sat} \quad (5.17)$$

Para os pontos internos, a equação da energia (4.19) integrada resulta:

$$\int_t^{n_0} \int_{s_0} \rho_f \cdot c_{p,f} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dt dr + \int_t^{n_0} \int_{s_0} \dot{m} \cdot \lambda dr dt = \int_t^{n_0} \int_{s_0} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{ef} \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr dt \quad (5.18)$$

Resolvendo a integral acima e dividindo por Δt , tem-se:

$$\rho_f \cdot c_{p,f} \cdot \frac{T_P^+ - T_P^-}{\Delta t} \cdot \Delta r + m \cdot \lambda \cdot \Delta r = k_{ef} \cdot \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{n_0} - \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{s_0} \right] \quad (5.19)$$

Que discretizada resulta:

$$\rho_f \cdot c_{p,f} \cdot \frac{T_P^+ - T_P^-}{\Delta t} \cdot \Delta r + m \cdot \lambda \cdot \Delta r = k_{ef} \left(\frac{T_N^+ - T_P^+}{\Delta r} - \frac{T_P^+ - T_S^+}{\Delta r} \right) \quad (5.20)$$

A equação (5.20) calcula o fluxo de calor para os pontos internos.

Para o ponto na superfície do gelo aplicam-se as mesmas considerações realizadas para a primeira fase. Assim, a equação (4.22) integrada toma a seguinte forma:

$$\int_t h_m \cdot (W_\infty - W_\delta) dt = \int_t D_{ef,s} \cdot \frac{\partial W}{\partial r} dt + \int_t \rho_{f,s} \frac{\partial \delta}{\partial t} dt \quad (5.23)$$

Aplicando a expressão de primeira ordem da série de Taylor, integrando e dividindo por Δt , tem-se:

$$h_m \cdot (W_\infty - W_P^+) = D_{ef,s} \cdot \frac{W_P^+ - W_S^+}{\Delta r} + \rho_{f,p} \cdot \frac{\delta^+ - \delta^-}{\Delta t} \quad (5.24)$$

A equação (5.24) refere-se à posição da interface determinada na fronteira ($r = r_{cil} + \delta$)

A umidade na fronteira é $W_P^+ = W_{sat}^+$.

A equação (4.23) que corresponde ao balanço de energia na fronteira integrada resulta em:

$$\int_t h \cdot (T_\infty - T_s) dt = \int_t k_{ef} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} dt - \int_t \rho_{f,s} \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \delta}{\partial t} dt \quad (5.25)$$

Resolvendo a integração da equação (5.25) e substituindo pela série de Taylor e dividindo por Δt , tem-se:

$$h \cdot (T_\infty - T_P^+) = k_{ef} \cdot \frac{T_P^+ - T_S^+}{\Delta r} + \rho_{f,p} \cdot \lambda \cdot \frac{\delta^+ - \delta^-}{\Delta t} \quad (5.26)$$

A equação (5.26) é obtida na superfície do gelo em $r = r_{cil} + \delta$.

Na superfície do tubo tem-se o seguinte balanço de massa integrado:

$$\int_t^{n_0} \int_{s_0} \dot{m} dt dr = \int_t^{n_0} \frac{D_{ef}}{\varepsilon_\gamma} \cdot \frac{d^2 W}{dr^2} dr dt \quad (5.27)$$

Dividindo por Δt e considerando a mudança de ε desprezível no incremento do tempo, tem-se a seguinte equação:

$$\dot{m} \cdot \frac{\Delta r}{2} = \frac{D_{ef}}{1 - \varepsilon_p^-} \cdot \left[\left(\frac{dW}{dr} \right)_{n_0}^+ - \left(\frac{dW}{dr} \right)_{s_0}^+ \right] \quad (5.28)$$

Como não existe saída de massa pela superfície do tubo, a equação (5.28) resulta em:

$$\dot{m}_p \cdot \frac{\Delta r}{2} = \frac{D_{ef}}{1 - \varepsilon_p^-} \cdot \frac{W_N^+ - W_P^+}{\Delta r} \quad (5.29)$$

A fração solidificada, como já mencionada anteriormente, é obtida a partir dos valores calculados de umidade que estiverem acima da saturação. É evidente que se ocorrer que todas as umidades estejam acima da temperatura de orvalho não haverá parcela solidificada. A expressão para a massa solidificada é dada por:

$$\dot{m}_p = (W_p - W_{sat, T_p}) \Delta t \text{ se } W_p > W_{sat, T_p}$$

Finalmente, as novas densidades podem ser calculadas a partir da massa depositada \dot{m} (exceto na fronteira que é assumida igual à imediatamente anterior, conforme mostra a equação 5.32). Assim, as expressões para as densidades em cada volume podem ser dadas pela seguinte equação integrada:

$$\int_t \frac{\partial \rho_f}{\partial t} dt = \int_t \dot{m} dt \quad (5.30)$$

Resultando em:

$$\rho_{f,p}^+ = \rho_{f,p}^- + \dot{m} \Delta t \quad (5.31)$$

Na fronteira de mudança de fase adotamos a seguinte hipótese:

$$\rho_{f,P}^+ = \rho_{f,S}^+ \quad (5.32)$$

Acoplamento

As condições de acoplamento são as fornecidas pelas equações (4.15) a (4.18) que são válidas para qualquer ponto i .

Nas seções anteriores foi relatado sobre o efeito degrau utilizado no acoplamento da densidade entre as duas fases que Scalon (1993) usou como artifício para resolver um problema que é eminentemente físico. Ele considerou outra limitação numérica: o crescimento da fronteira faz com que ao trabalhar com número de divisões fixas o tamanho de cada volume de controle se torne muitas vezes maior em relação ao volume que se iniciou e isto poderia levar a erros significativos se não fosse considerada uma correção para a densidade. Para evitar tais erros, foi calculada uma nova densidade média pra cada um dos V.C. quando se obteve um novo δ . Com isso, conseguiu-se que a densidade, na média continue representando aquele novo V.C. maior. Dessa forma, considerou-se que todo o crescimento ($\Delta\delta$) ocorreu com a densidade do último V.C. e os demais volumes podem ter a sua densidade recalculada utilizando a seguinte equação genérica:

$$\rho_i = \frac{\rho_i \cdot \Delta r [\rho_{i+1}(i+1) - \rho_i i] \Delta\delta / l_r}{\Delta r + \Delta\delta / l_r} \quad (5.33)$$

Onde l_r é o número de subdivisões radicais e:

$$\Delta\delta = \delta^+ - \delta^-$$

Scalon (1993) realizou uma verificação a respeito da equação (5.33) para investigar se a mesma não provocaria grandes discrepâncias sobre o modelo. Para isso, comparou os resultados de um programa que se utilizava da correção e outro que trabalhava com o número limite de pontos variando procurando deixar o Δr aproximadamente constante. Ele concluiu que os

resultados não apresentaram uma diferença significativa de valores e a demanda do custo computacional do primeiro programa era muito menor do que o segundo.

Para as demais discussões sobre o modelo de formação de frost em torno de um cilindro em escoamento de ar úmido verificar em Scalon (1993).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Introdução

Neste capítulo serão mostrados e discutidos os resultados dos testes experimentais realizados para um cilindro vertical, dois cilindros em série e três cilindros verticais em arranjo triangular. A convalidação do modelo numérico proposto para o crescimento da fronteira de frost sobre um cilindro vertical em escoamento de ar úmido é mostrada na seção 6.8 e observou-se boa concordância após a sua comparação com os resultados experimentais.

Conforme mostrado no capítulo 3, a investigação experimental foi realizada utilizando seis valores para cada variável experimental, para a vazão volumétrica de ar, para a temperatura do fluido secundário e para a vazão mássica do mesmo fluido, sendo que a cada intervalo de tempo foram registradas fotografias do crescimento da frente de frost em duas posições distintas: na direção axial e na direção radial ao cilindro. A condição de saturação para a umidade do fluxo de ar foi determinada com o auxílio do programa Engineering Equation Solver – EES. As imagens referentes às fotografias foram digitalizadas para a obtenção da espessura real da camada de frost.

Os efeitos da variação da vazão volumétrica de ar úmido, da temperatura do fluido de trabalho e da sua vazão mássica sobre a espessura da camada de frost e velocidade da frente de solidificação são comentados e discutidos.

6.2 Variação da estrutura da camada de frost

No começo do processo de deposição de frost o gradiente de temperatura entre a superfície do cilindro e o fluxo de ar é alto e conseqüentemente gotículas de água presentes no ar úmido colidem com a superfície fria do cilindro e se solidificam formando cristais de gelo em torno da superfície do tubo. Com a continuidade do processo mais cristais são depositados em torno da superfície do cilindro formando uma estrutura porosa. Com o aumento da espessura da camada de frost, a resistência térmica também aumenta e o gradiente térmico diminui, provocando a fusão de partículas que foram solidificadas na superfície do cilindro formando uma fase líquida. Quando isto acontece a resistência térmica decresce e mais partículas de gelo são formadas através da deposição de novos cristais de gelo. Esse processo se repete e o resultado final é a formação de uma estrutura bastante densa que denominamos de gelo glacial. Essa estrutura é bastante prejudicial ao sistema e deve ser evitada, pois em todos os aspectos é uma característica indesejável. As figuras 6.1 e 6.2 mostram os estágios poroso e glacial de gelo.

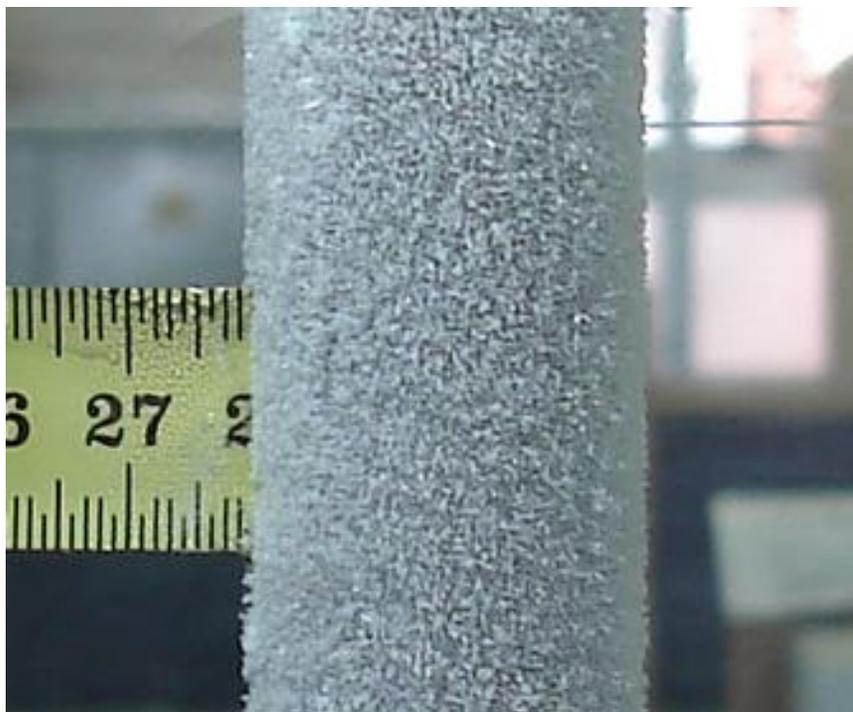


Figura 6.1 Formação de frost poroso.



Figura 6.2 Estágio de gelo glacial.

6.3 Distribuição da camada de gelo com o tempo

As figuras 6.3 a 6.11 mostram a distribuição da espessura da camada de gelo em torno da superfície do cilindro com desvio médio de $\pm 0,5mm$ para a espessura de frost e $\pm 0,5s$ para o tempo. Os resultados mostram o crescimento da camada de frost no ponto de estagnação em função do tempo e os seus respectivos ajustes baseado no método dos mínimos quadrados para validar os testes experimentais. Para os ajustes das curvas para os dados experimentais foi utilizado o programa Origin 6.0. Pode-se observar que inicialmente a variação da espessura com o tempo é quase linear, e com o aumento do tempo a resistência térmica aumenta e a taxa de deposição de gelo diminui e depois de um longo período de tempo, a taxa de deposição decresce

a ponto de se aproximar de zero. Isto pode ser visto também para o caso de dois cilindros em série e três cilindros em arranjo triangular ambos sob escoamento de ar úmido.

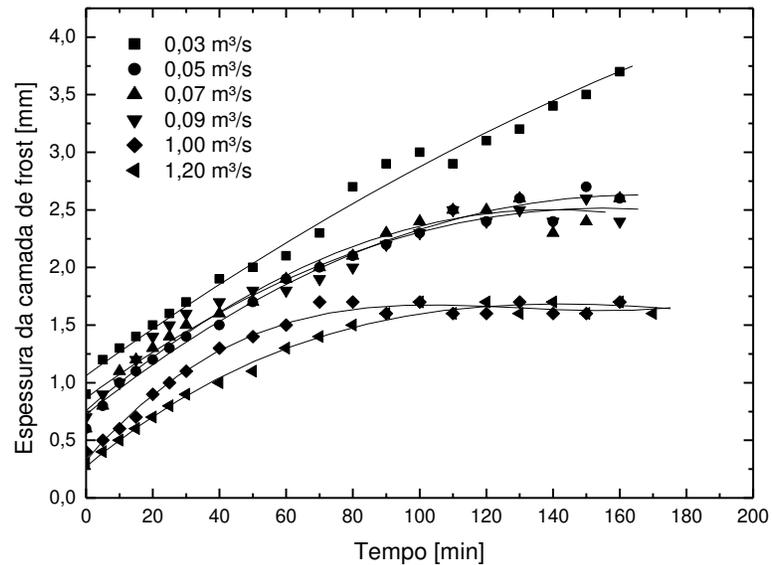


Figura 6.3 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão volumétrica de ar úmido para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028 kg/s$ para um cilindro.

A figura 6.3 mostra o crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo variando-se a vazão volumétrica de ar úmido para um cilindro vertical. Pode-se observar que o aumento da vazão de ar úmido causa numa diminuição da espessura de frost com o tempo.

A tabela 6.1 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.3:

Tabela 6.1 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.3.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,03 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,03\text{m}^3/\text{s})} = 1,06276 + 0,02082t - 2,70128 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,99055
0,05 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,05\text{m}^3/\text{s})} = 0,67661 + 0,02736t - 1,37331 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 2,7032 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$	0,99092
0,07 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,07\text{m}^3/\text{s})} = 0,72686 + 0,02799t - 1,39781 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 2,14502 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$	0,98888
0,09m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,09\text{m}^3/\text{s})} = 0,80146 + 0,02713t - 1,59699 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 3,619 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$	0,97409
1,00 m ³ /s	$e_{\text{frost}(1,00\text{m}^3/\text{s})} = 0,33249 + 0,03329t - 2,67405 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 6,86462 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$	0,98509
1,20 m ³ /s	$e_{\text{frost}(1,20\text{m}^3/\text{s})} = 0,27529 + 0,02397t - 1,27892 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 2,03629 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$	0,99066

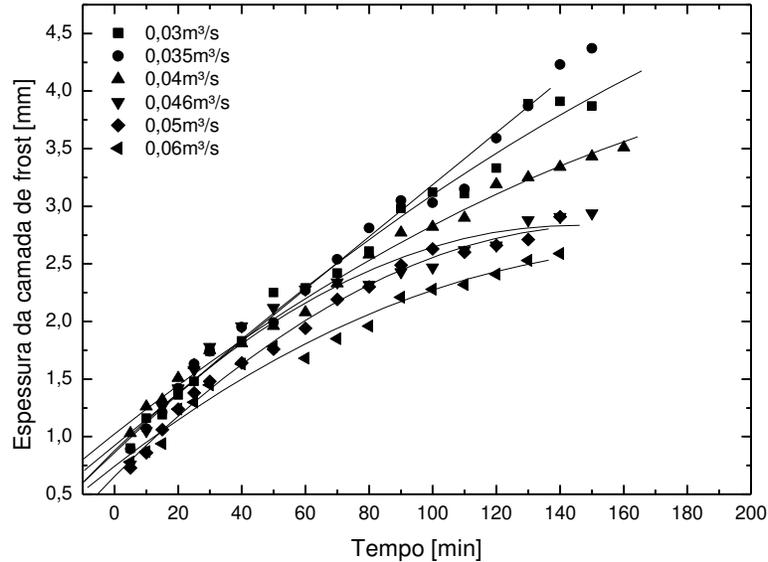


Figura 6.4 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão volumétrica de ar úmido para $T_{fsc} = -13^{\circ}\text{C}$ e $m_{fsc} = 0,028\text{kg} / \text{s}$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

A figura 6.4 mostra o crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo variando-se a vazão volumétrica de ar úmido para o cilindro trazeiro para o caso de dois cilindros

em série. Pode-se observar também que o aumento da vazão de ar úmido causa numa diminuição da espessura de frost com o tempo.

A tabela 6.2 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.4:

Tabela 6.2 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.4.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,03 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,03\text{m}^3/\text{s})} = 0,86293 + 0,02601t - 3,6274 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98794
0,035 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,035\text{m}^3/\text{s})} = 1,2404 + 0,02018t - 2,92747 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,96698
0,04 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,04\text{m}^3/\text{s})} = 0,92354 + 0,02266t - 1,97437 \cdot 10^{-7} \cdot t^2$	0,98888
0,046 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,046\text{m}^3/\text{s})} = 1,0780 + 0,02449t - 9,76743 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,9919
0,05 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,05\text{m}^3/\text{s})} = 1,05382 + 0,02125t - 9,04043 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,97812
0,06 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,06\text{m}^3/\text{s})} = 1,35427 + 0,01091t - 3,08393 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,81789

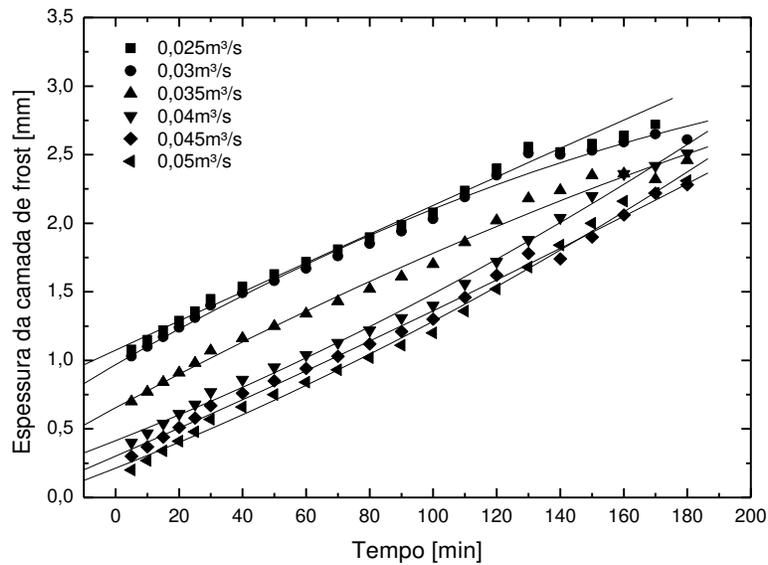


Figura 6.5 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão volumétrica de ar úmido para: $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg / s$ para três cilindros (cilindro lateral).

A figura 6.5 mostra o crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo variando-se a vazão volumétrica de ar úmido para o cilindro lateral para o caso de três cilindros em arranjo triangular. Pode-se observar que o aumento da vazão de ar úmido causa numa diminuição da espessura de frost com o tempo como mencionado anteriormente para o caso de um cilindro e dois cilindros em série.

A tabela 6.3 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.5:

Tabela 6.3 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.5.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,025 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,025\text{m}^3/\text{s})} = 1,07379 + 0,01068t - 1,22188 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0,98502
0,03 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,03\text{m}^3/\text{s})} = 0,96803 + 0,01347t - 2,10628 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,99037
0,035 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,035\text{m}^3/\text{s})} = 0,65365 + 0,0125t - 1,22812 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,99097
0,04 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,04\text{m}^3/\text{s})} = 0,41322 + 0,00911t - 1,60654 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,99526
0,045 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,045\text{m}^3/\text{s})} = 0,30158 + 0,01006t - 5,45712 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0,9956
0,05 m ³ /s	$e_{\text{frost}(0,05\text{m}^3/\text{s})} = 0,21322 + 0,00911t - 1,60654 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,99526

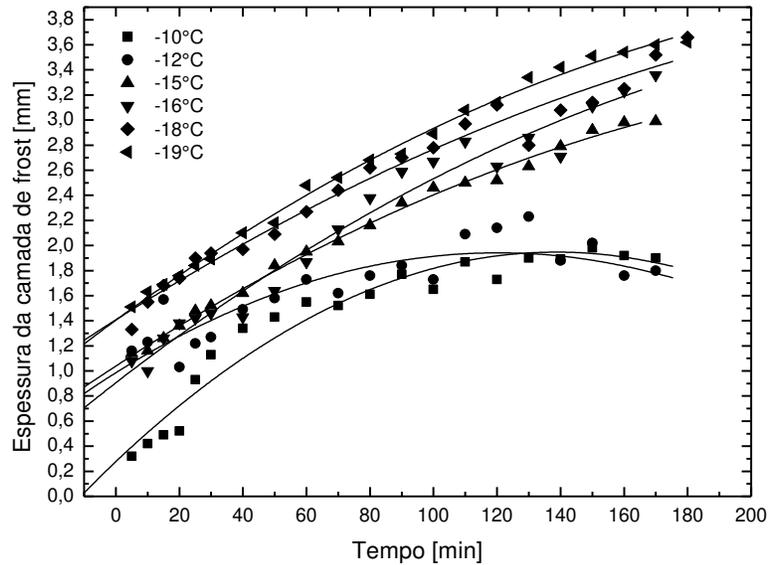


Figura 6.6 Variação da espessura de frost em função da variação da temperatura do fluido secundário para $\dot{V}_{ar} = 0,03\text{m}^3 / \text{s}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028\text{kg} / \text{s}$ para um cilindro.

A figura 6.6 mostra que o aumento da temperatura de fluido secundário provoca o aumento da espessura da camada de frost com o tempo para o caso de um cilindro vertical.

A tabela 6.4 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.6:

Tabela 6.4 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.6.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
-10°C	$e_{\text{frost}(-10^\circ\text{C})} = 0,0792 + 0,038t - 2,7886 \cdot 10^{-4}t^2 + 6,99852 \cdot 10^{-7}t^3$	0,97093
-12°C	$e_{\text{frost}(-12^\circ\text{C})} = 1,21746 - 05,4035 \cdot 10^{-6}t + 1,537 \cdot 10^{-4}t^2 - 8,01657 \cdot 10^{-7}t^3$	0,84259
-15°C	$e_{\text{frost}(-15^\circ\text{C})} = 1,01801 + 0,0182t - 5,30345 \cdot 10^{-5}t^2 + 9,13176 \cdot 10^{-8}t^3$	0,99603
-16°C	$e_{\text{frost}(-16^\circ\text{C})} = 0,9225 + 0,01846t - 1,67107 \cdot 10^{-5}t^2 - 6,36099 \cdot 10^{-8}t^3$	0,97158
-18°C	$e_{\text{frost}(-18^\circ\text{C})} = 1,40764 + 0,01607t - 2,46394 \cdot 10^{-5}t^2$	0,97477
-19°C	$e_{\text{frost}(-19^\circ\text{C})} = 1,40551 + 0,01857t - 3,27803 \cdot 10^{-5}t^2$	0,99611

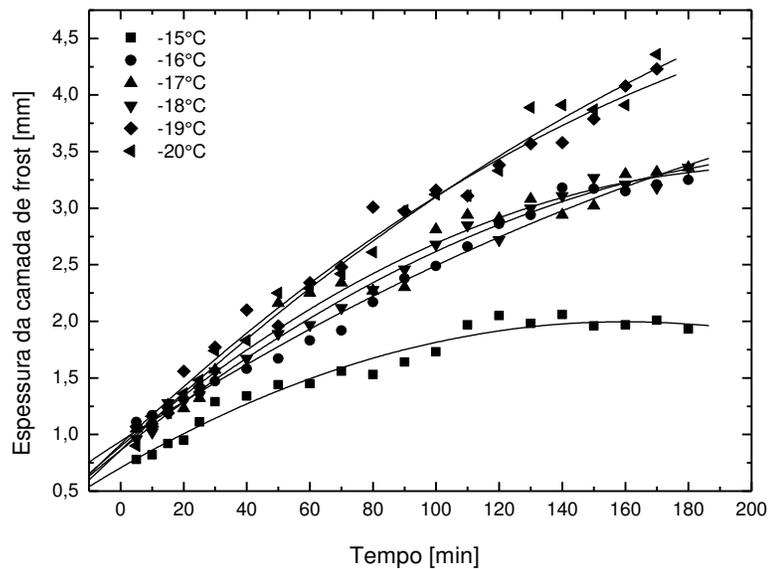


Figura 6.7 Variação da espessura de frost em função da variação da temperatura do fluido secundário para $\dot{V}_{ar} = 0,03\text{m}^3/\text{s}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028\text{kg}/\text{s}$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

A figura 6.7 mostra que o aumento da temperatura de fluido secundário provoca o aumento da espessura da camada de frost com o tempo também para o caso dois cilindros em série.

A tabela 6.5 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.7:

Tabela 6.5 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.7.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
-15°C	$e_{\text{frost}(-15^\circ\text{C})} = 0,70639 + 0,01616t - 5,05447 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,9692
-16°C	$e_{\text{frost}(-16^\circ\text{C})} = 0,94102 + 0,01798t - 2,45104 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98731
-17°C	$e_{\text{frost}(-17^\circ\text{C})} = 0,89587 + 0,02361t - 5,64479 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,97662
-18°C	$e_{\text{frost}(-18^\circ\text{C})} = 0,86251 + 0,02224t - 4,67517 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,99235
-19°C	$e_{\text{frost}(-19^\circ\text{C})} = 0,91599 + 0,02634t - 4,43642 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98515
-20°C	$e_{\text{frost}(-20^\circ\text{C})} = 0,86293 + 0,02601t - 3,6274 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98794

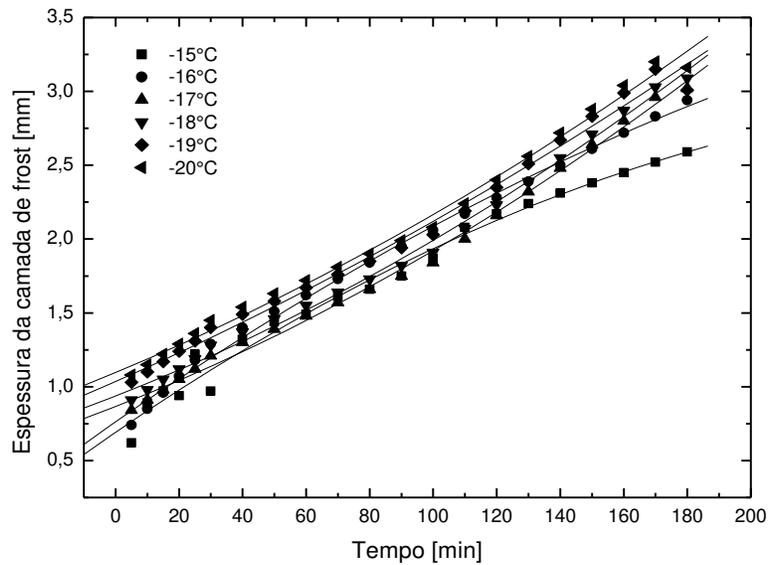


Figura 6.8 Variação da espessura de frost em função da variação da temperatura do fluido secundário para $\dot{V}_{ar} = 0,025m^3 / s$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg / s$ para três cilindros (cilindro lateral).

A figura 6.8 mostra que o aumento da temperatura de fluido secundário provoca o aumento da espessura da camada de frost com o tempo para o cilindro lateral para o caso de três cilindros em arranjo triangular como mencionado anteriormente para o caso de um cilindro e dois cilindros em série.

A tabela 6.6 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.8:

Tabela 6.6 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.8.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
-15°C	$e_{\text{frost}(-15^\circ\text{C})} = 0,6917 + 0,01478t - 2,35168 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98538
-16°C	$e_{\text{frost}(-16^\circ\text{C})} = 0,76151 + 0,01501t - 1,74625 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,99584
-17°C	$e_{\text{frost}(-17^\circ\text{C})} = 0,87722 + 0,00788t + 2,51654 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,9964
-18°C	$e_{\text{frost}(-18^\circ\text{C})} = 0,94722 + 0,00788t + 2,51654 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,9964
-19°C	$e_{\text{frost}(-19^\circ\text{C})} = 1,06722 + 0,00788t + 2,51654 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,9964
-20°C	$e_{\text{frost}(-20^\circ\text{C})} = 1,11722 + 0,00788t + 2,51654 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,9964

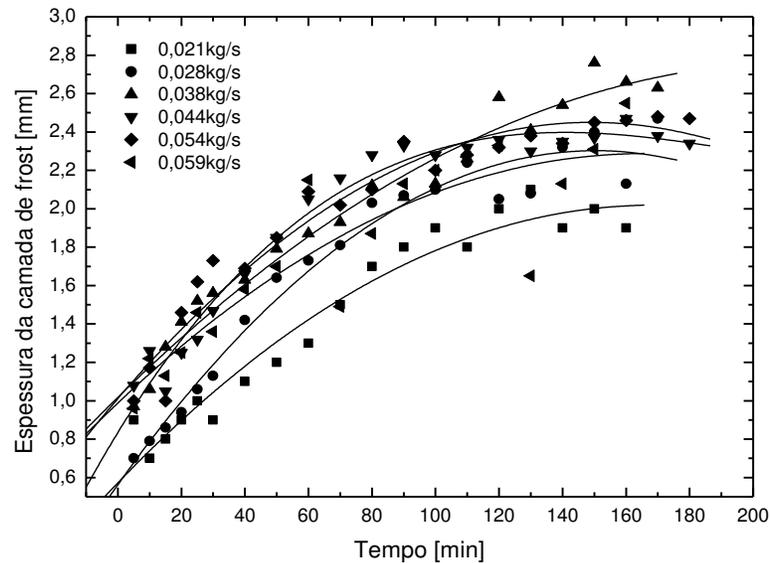


Figura 6.9 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão mássica de fluido secundário para $T_{fsc} = -10^\circ\text{C}$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03\text{m}^3/\text{s}$ um cilindro.

A figura 6.9 mostra que inicialmente o processo de deposição de frost é alto apresentando uma região do gráfico quase linear e aumenta com o aumento da vazão mássica de fluido

secundário à medida que o tempo cresce. Porém, para certo intervalo de tempo, como por exemplo, 90 minutos, a taxa de deposição de frost começa então a ser reduzida.

A tabela 6.7 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.9:

Tabela 6.7 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.9.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,021kg/s	$e_{\text{frost}(0,021\text{kg/s})} = 0,57404 + 0,01725t - 5,14514 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,95312
0,028kg/s	$e_{\text{frost}(0,028\text{kg/s})} = 0,56608 + 0,02316t - 7,70764 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,97082
0,038kg/s	$e_{\text{frost}(0,038\text{kg/s})} = 1,01945 + 0,01622t - 3,77182 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,97119
0,044kg/s	$e_{\text{frost}(0,044\text{kg/s})} = 0,90955 + 0,02216t - 8,05475 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,97043
0,054kg/s	$e_{\text{frost}(0,054\text{kg/s})} = 0,84006 + 0,02697t - 1,47048 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 2,42431 \cdot 10^{-7} \cdot t^3$	0,97361
0,059kg/s	$e_{\text{frost}(0,059\text{kg/s})} = 1,01393 + 0,0193t - 6,47298 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,94678

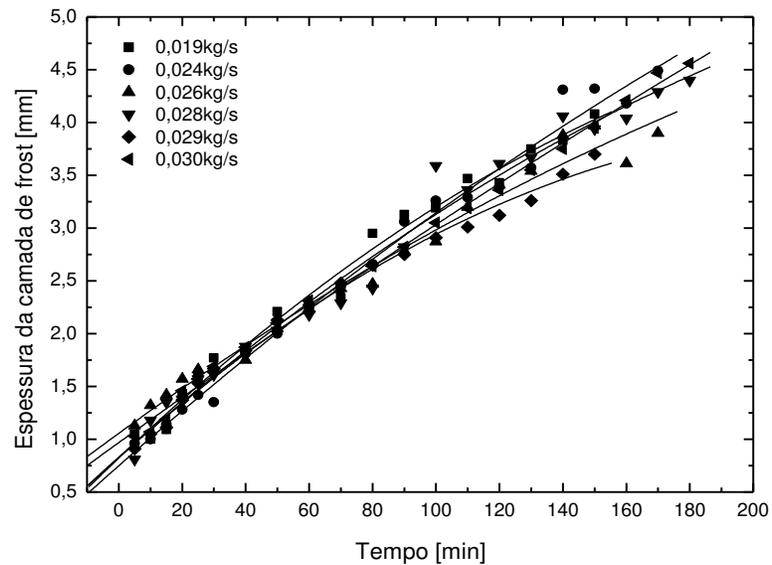


Figura 6.10 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão mássica de fluido secundário para $T_{fsc} = -13^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03m^3/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

A figura 6.10 mostra que inicialmente o processo de deposição de frost aumenta de forma considerável apresentando uma região do gráfico quase linear e aumenta com o aumento da vazão mássica de fluido secundário à medida que o tempo cresce. Depois para certo intervalo de tempo, a taxa de deposição de frost começa então a ser reduzida.

A tabela 6.8 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.10:

Tabela 6.8 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.10.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,019kg/s	$e_{\text{frost}(0,019\text{kg/s})} = 0,82363 + 0,0286t - 4,81244 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98808
0,024kg/s	$e_{\text{frost}(0,024\text{kg/s})} = 0,75006 + 0,02642t - 0,02642 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98851
0,026kg/s	$e_{\text{frost}(0,026\text{kg/s})} = 1,05672 + 0,02186t - 2,58843 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98165
0,028kg/s	$e_{\text{frost}(0,028\text{kg/s})} = 0,82985 + 0,02672t - 3,6938 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,98085
0,029kg/s	$e_{\text{frost}(0,029\text{kg/s})} = 0,82875 + 0,02689t - 5,7558 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,99304
0,030kg/s	$e_{\text{frost}(0,030\text{kg/s})} = 0,96784 + 0,02163t - 9,66034 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0,99677

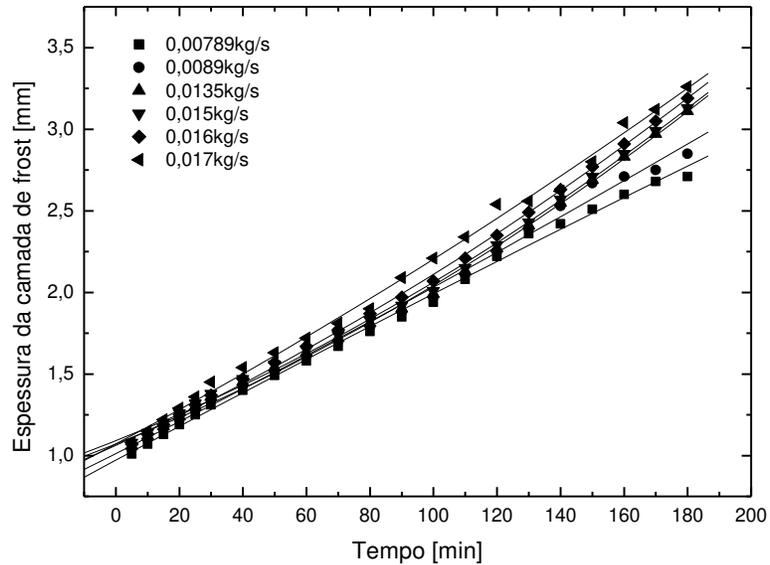


Figura 6.11 Variação da espessura de frost em função da variação da vazão mássica de fluido secundário para $T_{fsc} = -20^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V}_{ar} = 0,025\text{m}^3/\text{s}$ para três cilindros (cilindro lateral).

A figura 6.11 mostra que o aumento da vazão mássica de fluido secundário causa o aumento da espessura da camada de frost em torno do cilindro lateral para o caso de arranjo triangular dos cilindros. Pode-se observar que a espessura de frost cresce com o tempo.

A tabela 6.9 mostra os resultados para o ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.11:

Tabela 6.9 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.11.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,00789kg/s	$e_{\text{frost}(0,00789\text{kg/s})} = 0,97193 + 0,01044t - 2,36258 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0,99696
0,0089kg/s	$e_{\text{frost}(0,0089\text{kg/s})} = 1,01197 + 0,00976t + 4,33884 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0,99561
0,0135kg/s	$e_{\text{frost}(0,0135\text{kg/s})} = 1,07111 + 0,00769t + 2,01342 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,9983
0,015kg/s	$e_{\text{frost}(0,015\text{kg/s})} = 1,09111 + 0,00769t + 2,01342 \cdot 10^{-5} \cdot t^2$	0,9983
0,016kg/s	$e_{\text{frost}(0,016\text{kg/s})} = 1,06211 + 0,00881t + 1,67424 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0,99912
0,017kg/s	$e_{\text{frost}(0,017\text{kg/s})} = 1,07147 + 0,01034t + 9,85932 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$	0,99623

6.4 Velocidade da frente de solidificação de frost com o tempo

As figuras 6.12 a 6.20 mostram a variação da velocidade de deposição de frost com o tempo e os seus respectivos ajustes baseado no método dos mínimos quadrados para validar os testes experimentais. Inicialmente a taxa de deposição é alta pelo fato da resistência térmica ser pequena, pois nesse período se forma apenas uma fina camada de frost em torno do cilindro. Com o passar do tempo a espessura da camada de frost aumenta e conseqüentemente a resistência térmica aumenta o que diminui a velocidade da frente de solidificação de frost. Nos instantes finais dos testes, a espessura de frost se torna bastante espessa e densa e a resistência térmica é consideravelmente aumentada resultando em baixíssimas velocidades de deposição.

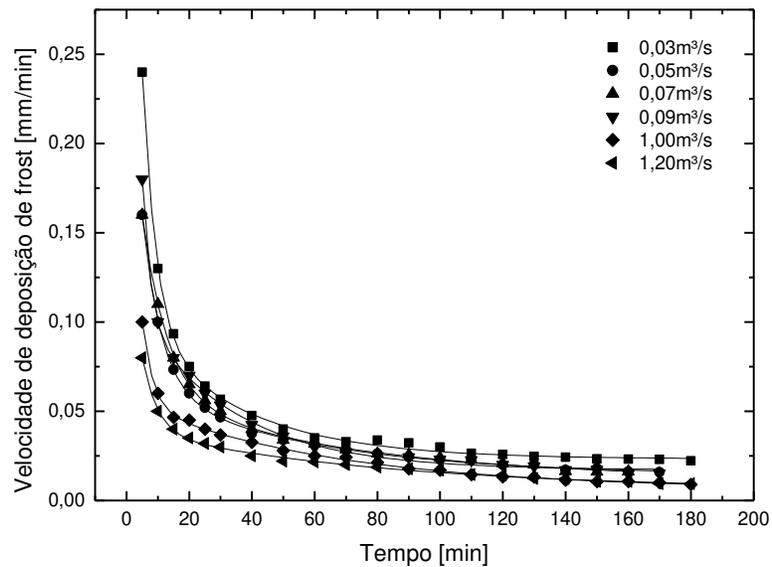


Figura 6.12 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para: $T_{fsc} = -18^{\circ}\text{C}$
e $\dot{m}_{fsc} = 0,028\text{kg / s}$ para um cilindro.

A tabela 6.10 mostra os resultados para o ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.12:

Tabela 6.10 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.12.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,03 m ³ /s	$v_{frost(0,03\text{m}^3/\text{s})} = 0,02326 + 0,44994 \cdot e^{-\frac{t}{4,41068}} + 0,08324 \cdot e^{-\frac{t}{33,37083}}$	0,99907
0,05 m ³ /s	$v_{frost(0,05\text{m}^3/\text{s})} = 0,01443 + 0,22058 \cdot e^{-\frac{t}{6,10061}} + 0,05282 \cdot e^{-\frac{t}{53,22045}}$	0,99935
0,07 m ³ /s	$v_{frost(0,07\text{m}^3/\text{s})} = 0,01168 + 0,18828 \cdot e^{-\frac{t}{8,16917}} + 0,04963 \cdot e^{-\frac{t}{67,56623}}$	0,99922
0,09 m ³ /s	$v_{frost(0,09\text{m}^3/\text{s})} = 0,01711 + 0,51353 \cdot e^{-\frac{t}{2,67955}} + 0,0981 \cdot e^{-\frac{t}{30,79127}}$	0,99874
1,00 m ³ /s	$v_{frost(1,00\text{m}^3/\text{s})} = 0,00623 + 0,20889 \cdot e^{-\frac{t}{3,39236}} + 0,04971 \cdot e^{-\frac{t}{63,69645}}$	0,99877
1,20 m ³ /s	$v_{frost(1,20\text{m}^3/\text{s})} = 0,00601 + 0,11731 \cdot e^{-\frac{t}{4,88429}} + 0,03369 \cdot e^{-\frac{t}{79,9828}}$	0,99773

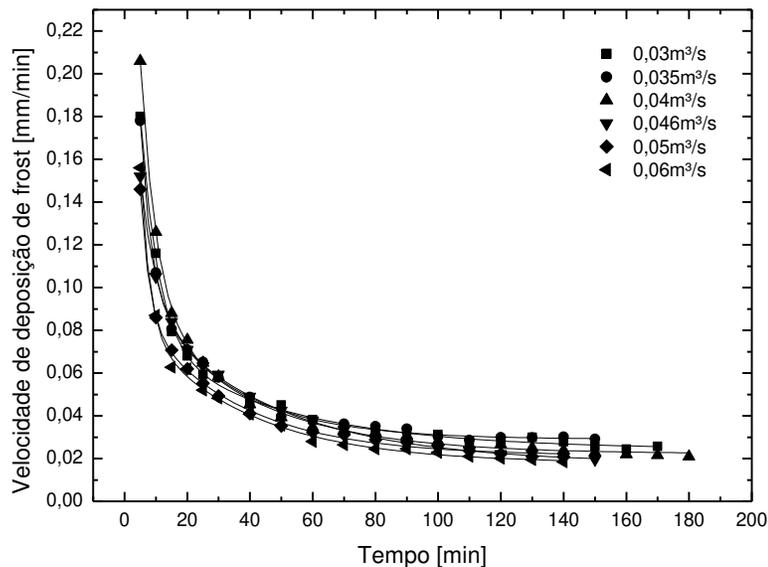


Figura 6.13 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para: $T_{fsc} = -20^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028\text{kg} / \text{s}$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

A figura 6.13 mostra a variação da velocidade de deposição de frost com o tempo variando a vazão de ar volumétrica para o cilindro trazeiro no caso de dois cilindros em série no escoamento de ar úmido. Pode-se observar que com o aumento da vazão de ar úmido a taxa de deposição de frost sobre a superfície do cilindro diminui de forma transiente, pois com o aumento do tempo, a espessura da camada de frost cresce e isso provoca o aumento da resistência térmica. Durante os instantes finais dos testes, a resistência térmica aumenta consideravelmente resultando em baixíssimas taxas de deposição de frost apresentando o mesmo comportamento em relação ao caso para um cilindro vertical. O mesmo efeito de diminuição da deposição de frost sobre a superfície do cilindro pode ser observado também para o cilindro lateral no caso de três cilindros em arranjo triangular conforme mostra a figura 6.14.

A tabela 6.11 mostra os resultados para o ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.13:

Tabela 6.11 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.13.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,03 m ³ /s	$v_{frost(0,03m^3/s)} = 0,02435 + 0,25454.e^{-\frac{1}{5,70546}} + 0,05608.e^{-\frac{1}{45,02083}}$	0,99788
0,035 m ³ /s	$v_{frost(0,035m^3/s)} = 0,02901 + 0,02901.e^{-\frac{1}{3,40252}} + 0,0859.e^{-\frac{1}{27,08948}}$	0,9989
0,04 m ³ /s	$v_{frost(0,04m^3/s)} = 0,02222 + 0,30411.e^{-\frac{1}{5,15552}} + 0,07888.e^{-\frac{1}{35,43407}}$	0,99872
0,046m ³ /s	$v_{frost(0,046m^3/s)} = 0,01764 + 0,16586.e^{-\frac{1}{5,05903}} + 0,08181.e^{-\frac{1}{42,02646}}$	0,99975
0,05 m ³ /s	$v_{frost(0,05m^3/s)} = 0,99848 + 0,34719.e^{-\frac{1}{2,87433}} + 0,07453.e^{-\frac{1}{31,7011}}$	0,99877
0,06 m ³ /s	$v_{frost(0,06m^3/s)} = 0,01778 + 0,40032.e^{-\frac{1}{3,02913}} + 0,07096.e^{-\frac{1}{34,91344}}$	0,99773

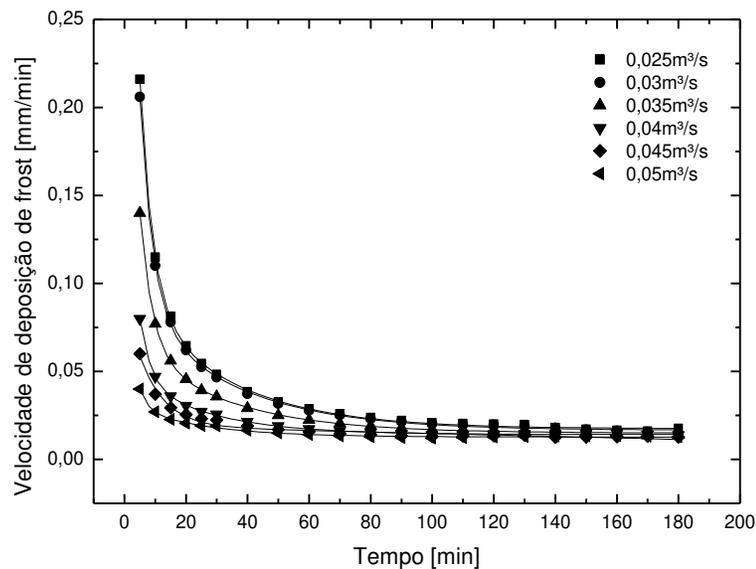


Figura 6.14 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para: $T_{fsc} = -20^{\circ}\text{C}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017\text{kg} / \text{s}$ para três cilindros (cilindro lateral).

A tabela 6.12 mostra os resultados para o ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.14:

Tabela 6.12 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.14.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,025 m ³ /s	$v_{frost(0,025m^3/s)} = 0,01737 + 0,42361.e^{-t/4,15213} + 0,08446.e^{-t/29,86088}$	0,99967
0,03 m ³ /s	$v_{frost(0,03m^3/s)} = 0,01651 + 0,39997.e^{-t/4,22854} + 0,07827.e^{-t/31,3597}$	0,99788
0,035 m ³ /s	$v_{frost(0,035m^3/s)} = 0,02901 + 0,02901.e^{-t/3,40252} + 0,0859.e^{-t/27,08948}$	0,9995
0,04 m ³ /s	$v_{frost(0,04m^3/s)} = 0,0149 + 0,26727.e^{-t/4,06565} + 0,05536.e^{-t/30,08182}$	0,9995
0,045m ³ /s	$v_{frost(0,045m^3/s)} = 3,9282 + 0,07408.e^{-t/8,12378} - 3,90934.e^{-t/94132,45}$	0,98374
0,05 m ³ /s	$v_{frost(0,05m^3/s)} = 0,01268 + 0,08309.e^{-t/2,56032} + 0,0192.e^{-t/23,27077}$	0,99447

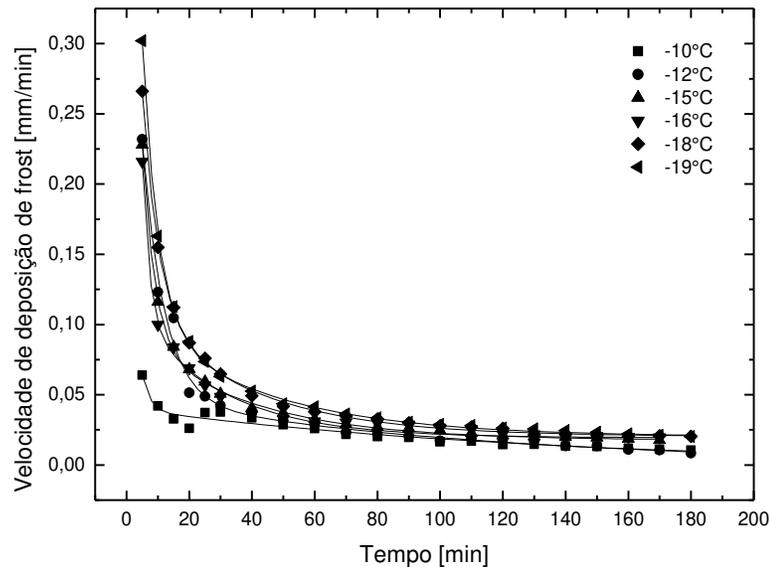


Figura 6.15 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para:

$$\dot{V}_{ar} = 0,03 \frac{m^3}{s} \text{ e } \dot{m}_{fsc} = 0,028 \frac{kg}{s} \text{ para um cilindro.}$$

A tabela 6.13 mostra os resultados para o ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.15:

Tabela 6.13 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.15.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
-10°C	$v_{frost(-10^\circ C)} = -9,04128 \cdot 10^{-4} + 0,18891 \cdot e^{-\frac{t}{2,49746}} + 0,04093 \cdot e^{-\frac{t}{134,59302}}$	0,95234
-12°C	$v_{frost(-12^\circ C)} = 0,04884 \cdot e^{-\frac{t}{109,09834}} + 0,37619 \cdot e^{-\frac{t}{6,95306}}$	0,98902
-15°C	$v_{frost(-15^\circ C)} = 0,01759 + 0,49818 \cdot e^{-\frac{t}{3,95618}} + 0,07966 \cdot e^{-\frac{t}{36,16818}}$	0,99914
-16°C	$v_{frost(-16^\circ C)} = 0,01936 + 0,99313 \cdot e^{-\frac{t}{2,30703}} + 0,09944 \cdot e^{-\frac{t}{27,3565}}$	0,99425
-18°C	$v_{frost(-18^\circ C)} = 0,02031 + 0,4079 \cdot e^{-\frac{t}{5,24841}} + 0,10131 \cdot e^{-\frac{t}{35,17021}}$	0,99908
-19°C	$v_{frost(-19^\circ C)} = 0,02011 + 0,54145 \cdot e^{-\frac{t}{5,0844}} + 0,0889 \cdot e^{-\frac{t}{41,46005}}$	0,99946

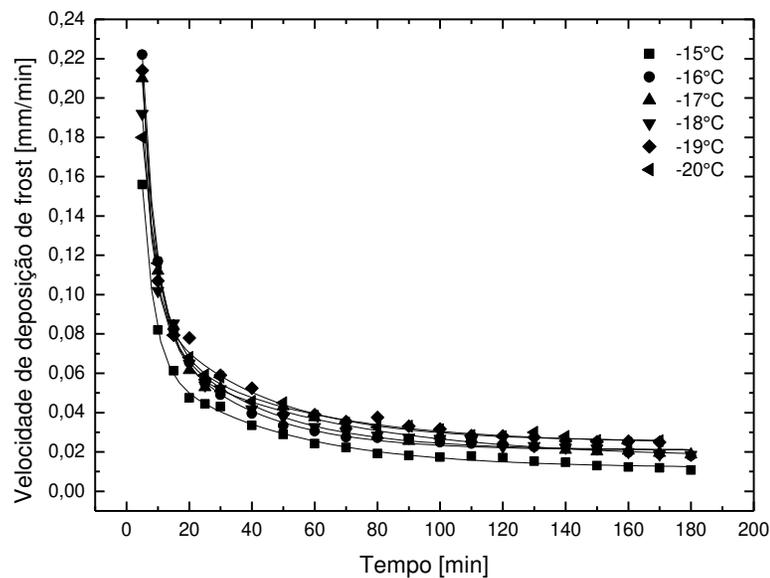


Figura 6.16 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para:

$$\dot{V}_{ar} = 0,03 \frac{m^3}{s} \text{ e } \dot{m}_{fsc} = 0,028 \frac{kg}{s} \text{ para dois cilindros (cilindro trazeiro).}$$

A figura 6.16 mostra a variação da velocidade de deposição de frost em função do tempo variando a temperatura do fluido secundário. Pode-se observar que inicialmente, para baixas temperaturas do fluido secundário têm-se altas taxas de deposição de frost como consequência da baixa resistência térmica, pois nesse período se forma uma fina camada de frost sobre a superfície do cilindro. Com a redução da temperatura do fluido têm-se maiores taxas de deposição de frost como resultado do aumento da taxa de transferência de calor. Com o passar do tempo a espessura da camada de frost aumenta e isso ocasiona o aumento da resistência térmica diminuindo a velocidade da frente de solidificação de frost sobre a superfície do cilindro. O mesmo efeito pode ser observado para o caso de um cilindro vertical mostrado na figura 6.15.

A tabela 6.14 mostra os resultados para o ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.16:

Tabela 6.14 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.16.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
-15°C	$v_{frost(-15^\circ C)} = 0,01187 + 0,34629 \cdot e^{-\frac{t}{3,75537}} + 0,0595 \cdot e^{-\frac{t}{40,6905}}$	0,99842
-16°C	$v_{frost(-16^\circ C)} = 0,02092 + 0,43866 \cdot e^{-\frac{t}{4,22361}} + 0,07924 \cdot e^{-\frac{t}{28,86136}}$	0,99909
-17°C	$v_{frost(-17^\circ C)} = 0,01668 + 0,39602 \cdot e^{-\frac{t}{4,81345}} + 0,05763 \cdot e^{-\frac{t}{56,97078}}$	0,9979
-18°C	$v_{frost(-18^\circ C)} = 0,02092 + 0,40463 \cdot e^{-\frac{t}{3,61644}} + 0,08093 \cdot e^{-\frac{t}{31,71602}}$	0,99623
-19°C	$v_{frost(-19^\circ C)} = 0,02531 + 0,63989 \cdot e^{-\frac{t}{2,99431}} + 0,0787 \cdot e^{-\frac{t}{34,8693}}$	0,99545
-20°C	$v_{frost(-20^\circ C)} = 0,02435 + 0,25454 \cdot e^{-\frac{t}{5,70545}} + 0,05608 \cdot e^{-\frac{t}{45,0207}}$	0,99788

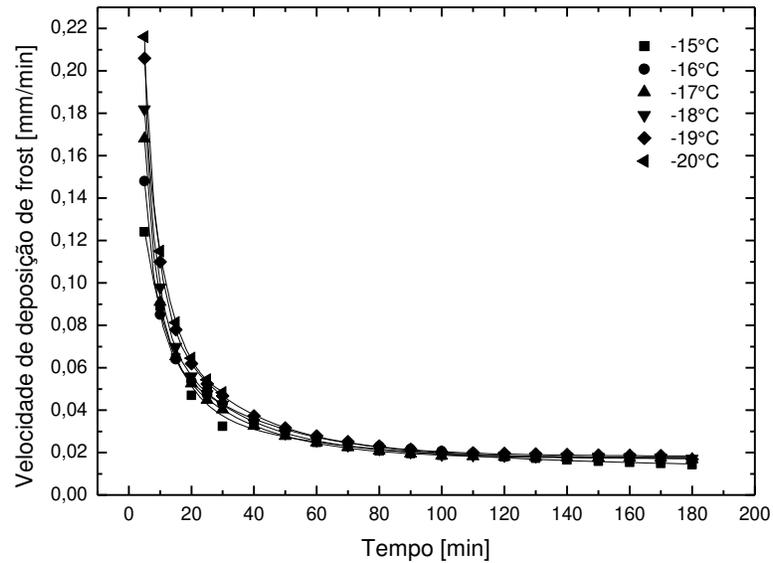


Figura 6.17 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para:

$$\dot{V}_{ar} = 0,025 m^3 / s \text{ e } \dot{m}_{fsc} = 0,017 kg / s \text{ para três cilindros (cilindro lateral)}.$$

A figura 6.17 mostra a variação da velocidade de deposição de frost em função do tempo variando a temperatura do fluido secundário para o cilindro lateral no caso de três cilindros em arranjo triangular. Os resultados obtidos para a figura 6.17 mostram que para temperaturas mais baixas do fluido secundário têm-se maiores taxas de deposição de frost.

A tabela 6.15 mostra os resultados para o ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.17:

Tabela 6.15 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.17.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
-15°C	$v_{frost(-15^\circ C)} = 0,01278 + 0,14483 \cdot e^{-\frac{t}{9,08559}} + 0,03058 \cdot e^{-\frac{t}{64,4175}}$	0,9942
-16°C	$v_{frost(-16^\circ C)} = 0,01688 + 0,27194 \cdot e^{-\frac{t}{3,9317}} + 0,06379 \cdot e^{-\frac{t}{33,03075}}$	0,99976
-17°C	$v_{frost(-17^\circ C)} = 0,01724 + 0,33335 \cdot e^{-\frac{t}{3,85336}} + 0,07231 \cdot e^{-\frac{t}{25,97661}}$	0,99993
-18°C	$v_{frost(-18^\circ C)} = 0,01771 + 0,36193 \cdot e^{-\frac{t}{3,88812}} + 0,07772 \cdot e^{-\frac{t}{26,18315}}$	0,99993
-19°C	$v_{frost(-19^\circ C)} = 6,29597 \cdot 10^{-4} + 0,40979 \cdot e^{-\frac{t}{3,96626}} + 0,08601 \cdot e^{-\frac{t}{26,90718}} + 0,0177 \cdot e^{-\frac{t}{7,96174 \cdot 10^5}}$	0,99985
-20°C	$v_{frost(-20^\circ C)} = 0,04218 + 0,24181 \cdot e^{-\frac{t}{8,30855}} + 18,36019 \cdot e^{-\frac{t}{18,36015}}$	0,99995

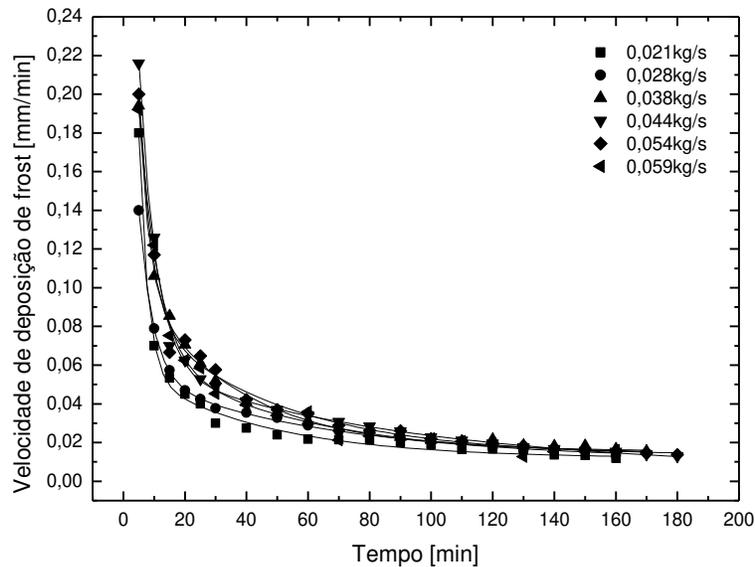


Figura 6.18 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para:

$$\dot{V}_{ar} = 0,03 \frac{m^3}{s} \text{ e } T_{fsc} = -13^\circ C \text{ para um cilindro.}$$

A tabela 6.16 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.18:

Tabela 6.16 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.18.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,021kg/s	$v_{frost(0,021kg/s)} = 0,01188 + 0,72651 \cdot e^{-\frac{t}{2,84025}} + 0,04851 \cdot e^{-\frac{t}{41,8040}}$	0,99607
0,028kg/s	$v_{frost(0,028kg/s)} = 0,01331 + 0,2581 \cdot e^{-\frac{t}{4,5616}} + 0,04423 \cdot e^{-\frac{t}{55,7535}}$	0,99866
0,038kg/s	$v_{frost(0,038kg/s)} = 0,01547 + 0,4271 \cdot e^{-\frac{t}{3,35039}} + 0,09551 \cdot e^{-\frac{t}{33,5267}}$	0,99803
0,044kg/s	$v_{frost(0,044kg/s)} = -0,00684 + 0,38985 \cdot e^{-\frac{t}{5,57189}} + 0,05574 \cdot e^{-\frac{t}{88,82838}} + 0,01232 \cdot e^{-\frac{t}{2,6000 \cdot 10^4}}$	0,99716
0,054kg/s	$v_{frost(0,054kg/s)} = 0,01322 + 0,39858 \cdot e^{-\frac{t}{4,04853}} + 0,08004 \cdot e^{-\frac{t}{44,995}}$	0,99183
0,059kg/s	$v_{frost(0,059kg/s)} = 0,01158 + 0,0578 \cdot e^{-\frac{t}{53,88509}} + 0,28536 \cdot e^{-\frac{t}{6,27372}}$	0,99496

As figuras 6.18, 6.19 e 6.20 mostram o efeito da vazão mássica do fluido secundário na velocidade de deposição de frost em função do tempo. Pode-se observar que o aumento da vazão mássica de fluido secundário provoca o aumento da taxa de deposição de frost sobre a superfície do cilindro. Com o passar do tempo, essa camada de frost cresce e isso dificulta a ação do fluxo de calor que é desviado para solidificar as gotículas de água presente no ar úmido resultando em baixíssimas velocidades de deposição de frost nos instantes finais dos testes.

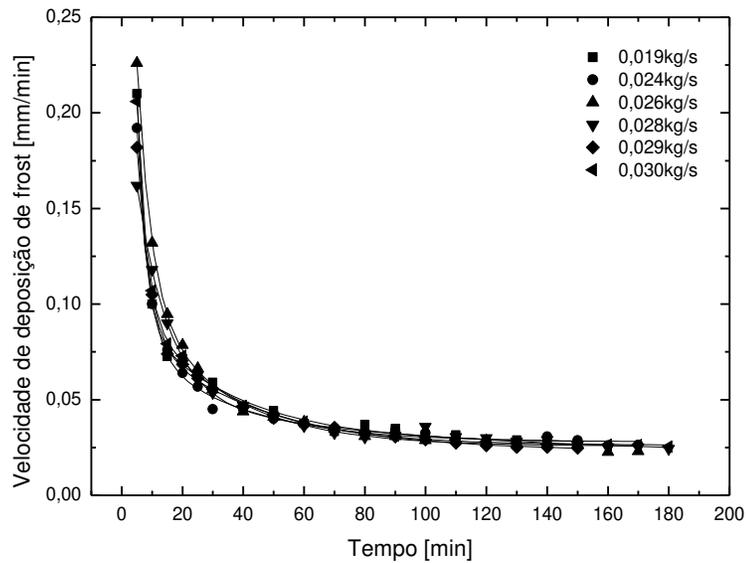


Figura 6.19 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para:

$$\dot{V}_{ar} = 0,03 \frac{m^3}{s} \text{ e } T_{fsc} = -20^\circ C \text{ para dois cilindros (cilindro trazeiro).}$$

A tabela 6.17 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.19:

Tabela 6.17 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.19.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,019kg/s	$v_{frost(0,019kg/s)} = 0,02745 + 0,84169 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot 2,55444} + 0,07417 \cdot e^{-\frac{1}{32} \cdot 99433}$	0,99763
0,024kg/s	$v_{frost(0,024kg/s)} = 0,0279 + 0,42112 \cdot e^{-\frac{1}{3} \cdot 79267} + 0,05986 \cdot e^{-\frac{1}{31} \cdot 8374}$	0,99704
0,026kg/s	$v_{frost(0,026kg/s)} = 0,02569 + 0,35106 \cdot e^{-\frac{1}{4} \cdot 83381} + 0,08968 \cdot e^{-\frac{1}{28} \cdot 5172}$	0,99854
0,028kg/s	$v_{frost(0,028kg/s)} = -0,02094 + 0,18066 \cdot e^{-\frac{1}{10} \cdot 37361} + 0,03114 \cdot e^{-\frac{1}{89} \cdot 43617}$	0,99724
0,029kg/s	$v_{frost(0,029kg/s)} = 0,02307 + 0,3544 \cdot e^{-\frac{1}{3} \cdot 92314} + 0,06802 \cdot e^{-\frac{1}{39} \cdot 76813}$	0,99893
0,030kg/s	$v_{frost(0,030kg/s)} = 0,02619 + 0,57881 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot 99899} + 0,08315 \cdot e^{-\frac{1}{30} \cdot 48511}$	0,99941

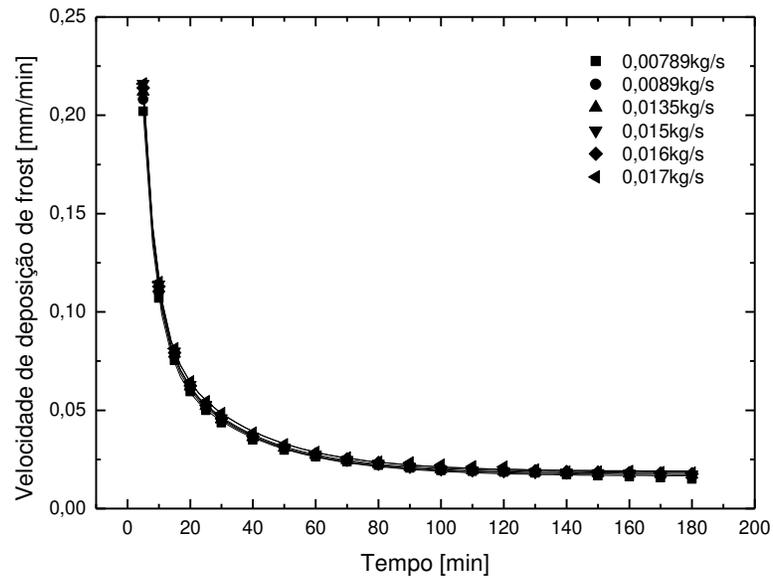


Figura 6.20 Variação da velocidade de deposição de frost com o tempo para: $T_{fsc} = -20^{\circ}\text{C}$

e $\dot{V}_{ar} = 0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ para três cilindros (cilindro lateral).

A tabela 6.18 mostra os resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.20:

Tabela 6.18 – Resultados do ajuste realizado para os dados experimentais da figura 6.20.

Curva ajustada	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
0,00789kg/s	$v_{frost(0,00789\text{kg/s})} = 0,01652 + 0,39583 \cdot e^{-\frac{t}{4,17184}} + 0,07848 \cdot e^{-\frac{t}{28,7110}}$	0,99968
0,0089kg/s	$v_{frost(0,0089\text{kg/s})} = 0,01716 + 0,41032 \cdot e^{-\frac{t}{4,11185}} + 0,08278 \cdot e^{-\frac{t}{27,6554}}$	0,99975
0,0135kg/s	$v_{frost(0,0135\text{kg/s})} = 0,0178 + 0,42183 \cdot e^{-\frac{t}{4,02937}} + 0,08716 \cdot e^{-\frac{t}{26,4183}}$	0,99987
0,015kg/s	$v_{frost(0,015\text{kg/s})} = 0,01836 + 0,42315 \cdot e^{-\frac{t}{4,09595}} + 0,08513 \cdot e^{-\frac{t}{26,8733}}$	0,99983
0,016kg/s	$v_{frost(0,016\text{kg/s})} = 0,01893 + 0,42769 \cdot e^{-\frac{t}{4,02718}} + 0,08818 \cdot e^{-\frac{t}{27,2396}}$	0,99978
0,017kg/s	$v_{frost(0,017\text{kg/s})} = 0,01893 + 0,42769 \cdot e^{-\frac{t}{4,02718}} + 0,08818 \cdot e^{-\frac{t}{27,2396}}$	0,99978

6.5 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido

A influência da vazão volumétrica de ar úmido sobre a espessura da camada de frost pode ser vista nas figuras 6.21 a 6.23. Como pode ser observado o aumento da vazão volumétrica de ar úmido causa uma redução na espessura de frost para um cilindro e também para o caso de dois cilindros em série e três cilindros em arranjo triangular. Isto pode ser atribuído ao fato de que o aumento na vazão volumétrica de ar úmido aumenta a ação de cisalhamento sobre a camada e isto leva ao aumento do coeficiente de atrito local ocasionando em remoção das partículas que foram inicialmente solidificadas na superfície do cilindro. Estas são levadas pelo fluxo de ar causando redução na deposição de frost. Com o passar do tempo, a diminuição da camada de frost continua e isto pode ser verificado a seguir:

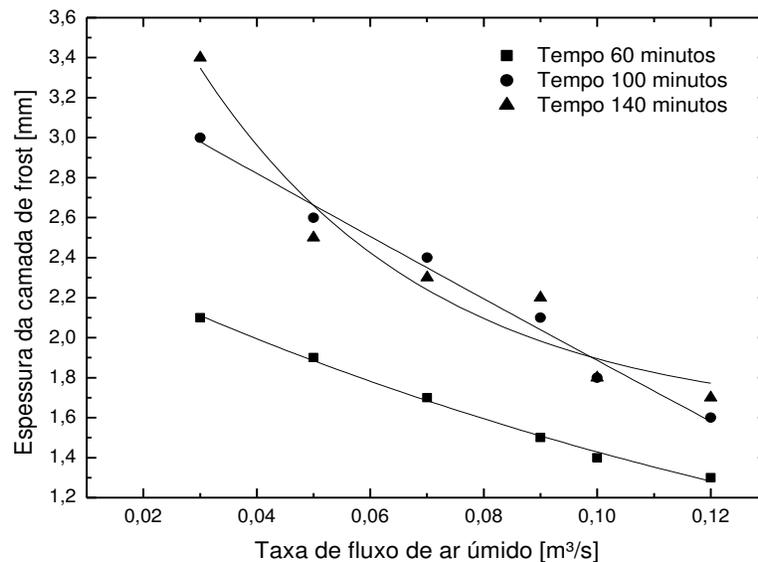


Figura 6.21 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a espessura da camada de frost

para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg / s$ para um cilindro

A figura 6.22 mostra o efeito da variação da vazão volumétrica de ar sobre a espessura da camada de frost tem tornado da superfície dos cilindros dianteiro e trazeiro no caso de dois cilindros em série. Pode-se observar que o aumento da vazão volumétrica de ar causa a redução da espessura da camada de frost tanto para o cilindro dianteiro como também para o trazeiro.

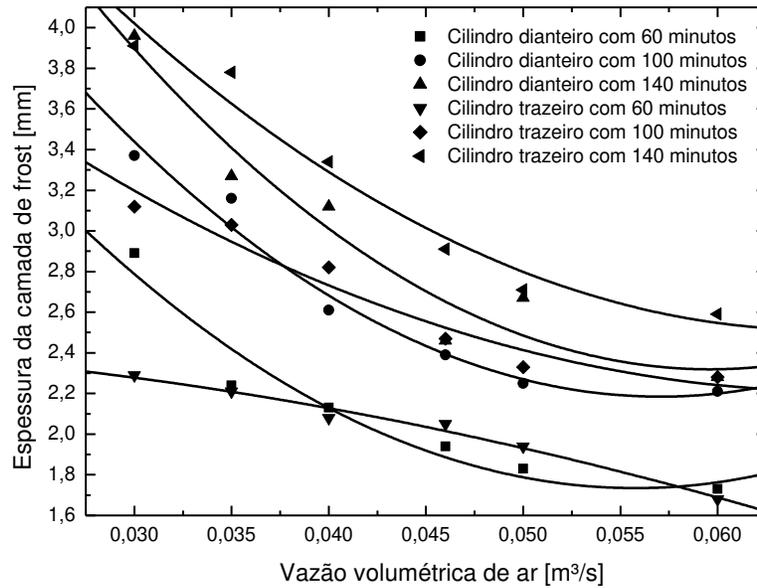


Figura 6.22 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg / s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro).

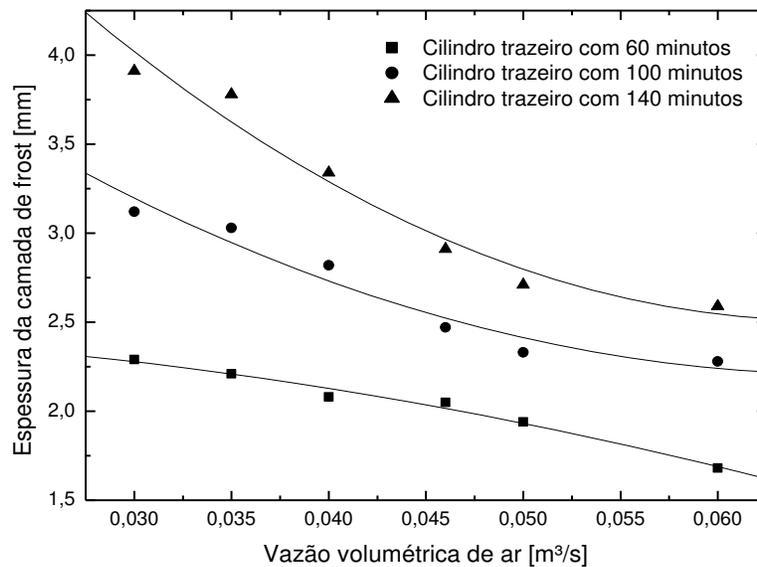


Figura 6.23 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg / s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

A figura 6.23 mostra o efeito do aumento da vazão volumétrica de ar úmido sobre a espessura da camada de frost para o cilindro trazeiro no caso de dois cilindros em série no escoamento de ar úmido.

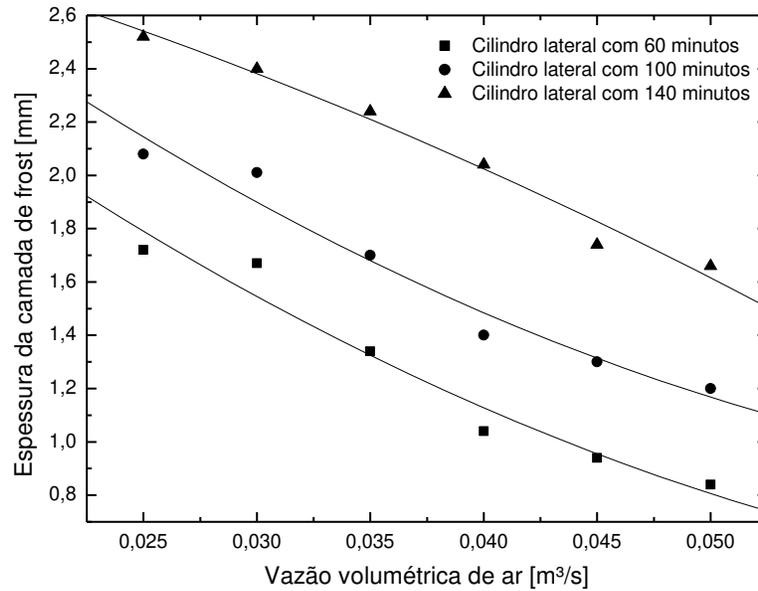


Figura 6.24 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg / s$ para três cilindros (cilindro lateral).

Analisando as figuras 6.25 a 6.28, pode-se observar que a velocidade da frente de solidificação de frost é reduzida com o aumento da vazão volumétrica de ar úmido, e isto, como mencionado anteriormente, pode ser atribuído principalmente ao efeito de cisalhamento local e conseqüentemente ao aumento do coeficiente de atrito local que atua diretamente na remoção das partículas solidificadas sobre a superfície do cilindro.

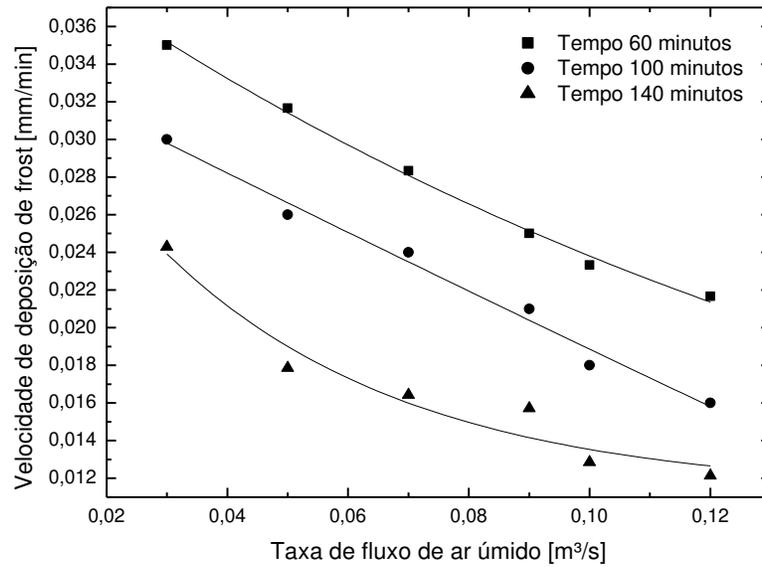


Figura 6.25 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a velocidade deposição de frost para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $m_{fsc} = 0,028kg / s$ para um cilindro.

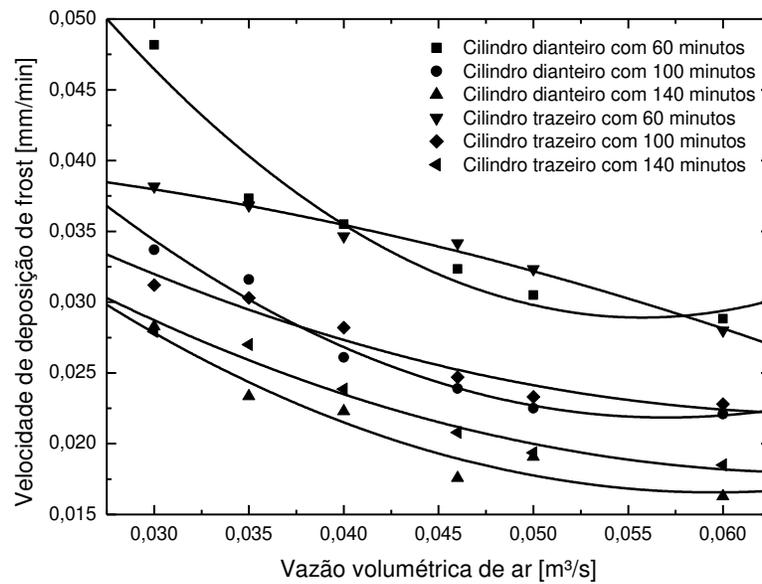


Figura 6.26 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a velocidade deposição de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $m_{fsc} = 0,028kg / s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro).

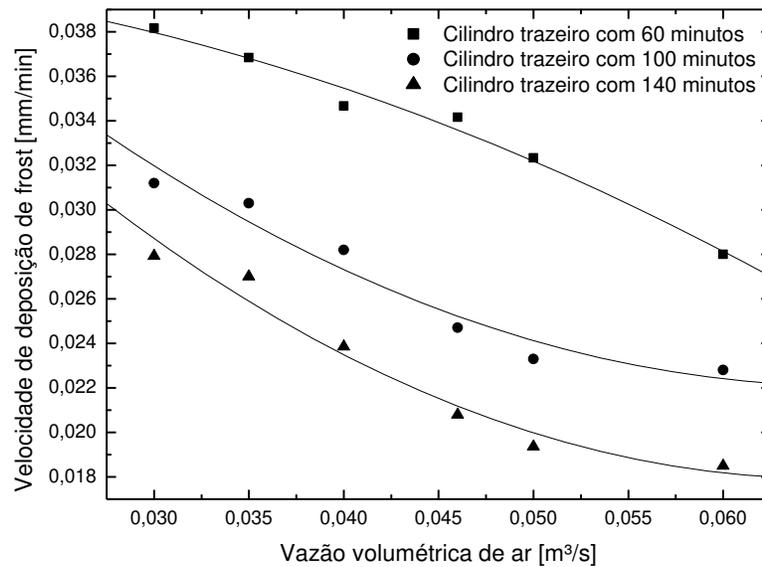


Figura 6.27 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a velocidade deposição de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028kg / s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

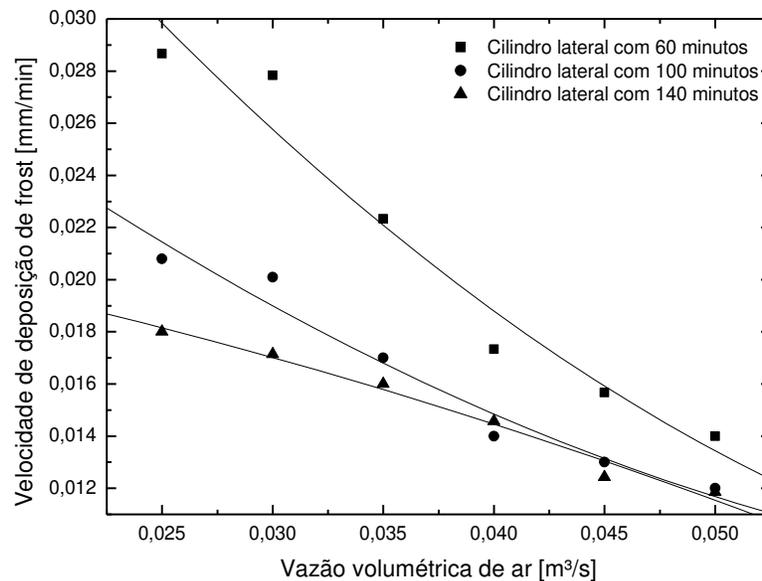


Figura 6.28 Efeito da vazão volumétrica de ar úmido sobre a velocidade deposição de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017kg / s$ para três cilindros (cilindro lateral).

6.6 Efeito da temperatura da superfície fria do cilindro

As figuras 6.29 a 6.32 mostram o efeito da variação da temperatura do fluido secundário sobre a espessura de frost depositada para os casos de um cilindro, dois cilindros em série e três cilindros em arranjo triangular sob escoamento de ar úmido. A baixa temperatura do fluido secundário causa um aumento no gradiente térmico e conseqüentemente a taxa de transferência de calor e a espessura da camada de gelo são aumentadas. Como pode ser observada, a espessura da camada de gelo cresce com o aumento do tempo.

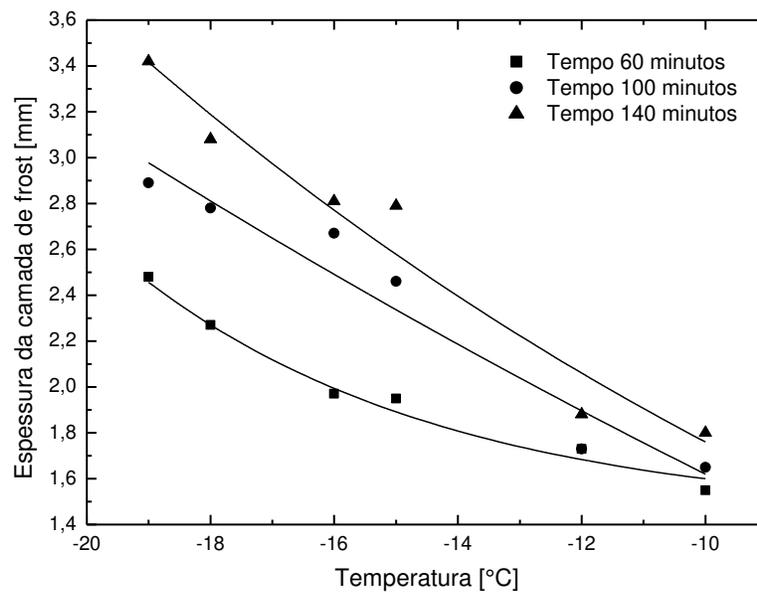


Figura 6.29 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para

$$\dot{V}_{ar} = 0,03 \text{ m}^3 / \text{s} \text{ e } \dot{m}_{fsc} = 0,028 \text{ kg} / \text{s} \text{ para um cilindro.}$$

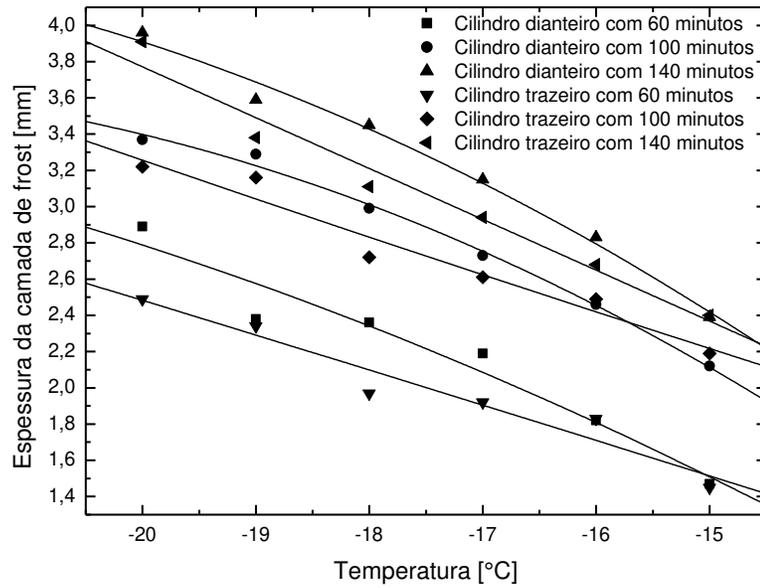


Figura 6.30 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para

$$\dot{V}_{ar} = 0,03 \frac{m^3}{s} \text{ e } \dot{m}_{fsc} = 0,028 \frac{kg}{s} \text{ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro).}$$

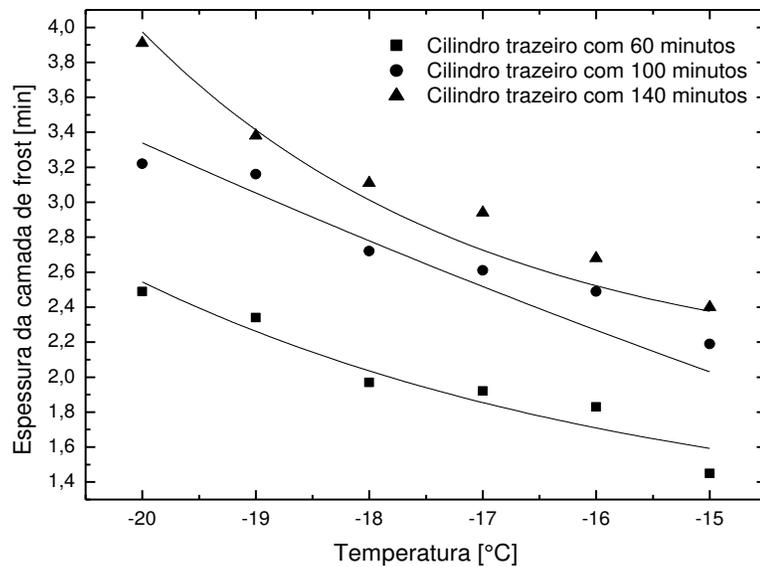


Figura 6.31 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para

$$\dot{V}_{ar} = 0,03 \frac{m^3}{s} \text{ e } \dot{m}_{fsc} = 0,028 \frac{kg}{s} \text{ para dois cilindros (cilindro trazeiro).}$$

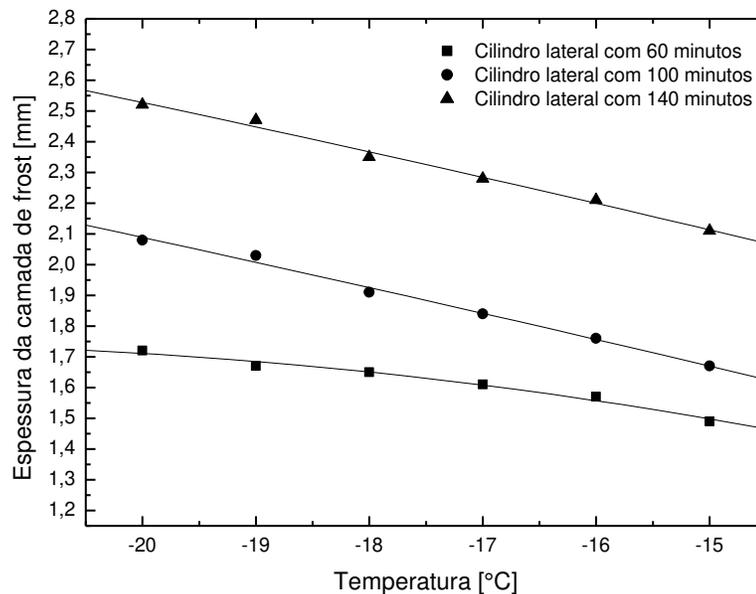


Figura 6.32 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para

$$\dot{V}_{ar} = 0,025 \frac{m^3}{s} \text{ e } \dot{m}_{fsc} = 0,017 \frac{kg}{s} \text{ para três cilindros (cilindro lateral).}$$

As figuras 6.33 a 6.36 mostram o efeito da variação da temperatura do fluido secundário na velocidade de deposição de frost para o caso de um cilindro vertical, dois cilindros verticais em série e três cilindros verticais em arranjo triangular. Como pode ser observado, com a redução da temperatura do fluido secundário, reduz-se a temperatura da superfície do cilindro e, conseqüentemente, aumenta a taxa de transferência de calor e da velocidade de deposição de frost. Também pode ser observado que a velocidade de deposição de gelo diminui com o aumento do tempo como mencionado anteriormente.

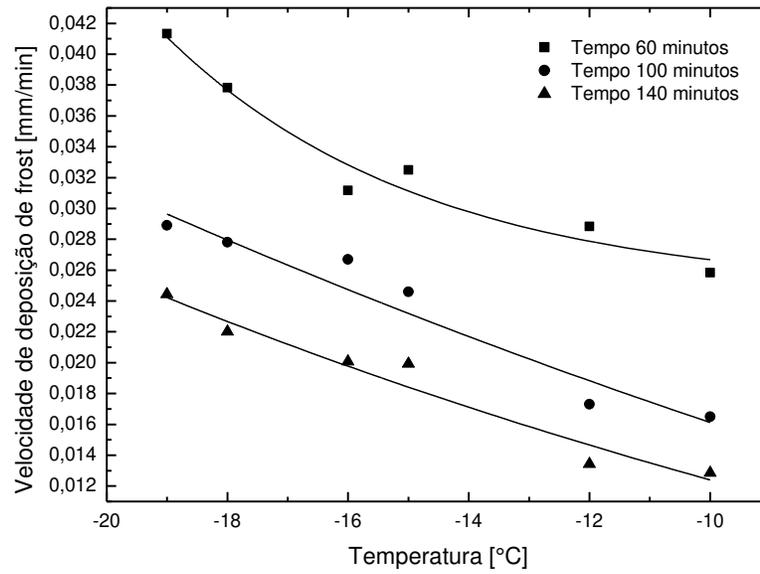


Figura 6.33 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a velocidade deposição de

frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03 \text{ m}^3 / \text{s}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028 \text{ kg} / \text{s}$ para um cilindro.

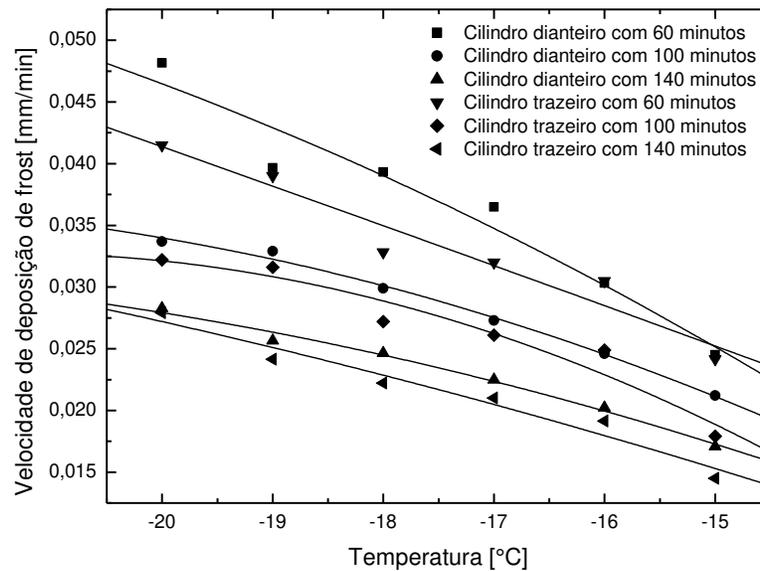


Figura 6.34 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a velocidade deposição de

frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03 \text{ m}^3 / \text{s}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028 \text{ kg} / \text{s}$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro).

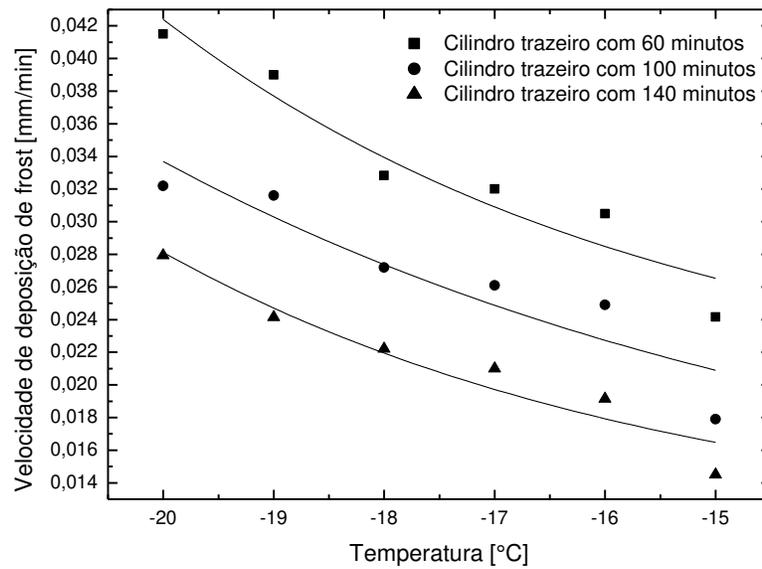


Figura 6.35 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a velocidade deposição de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,028 \text{ kg/s}$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

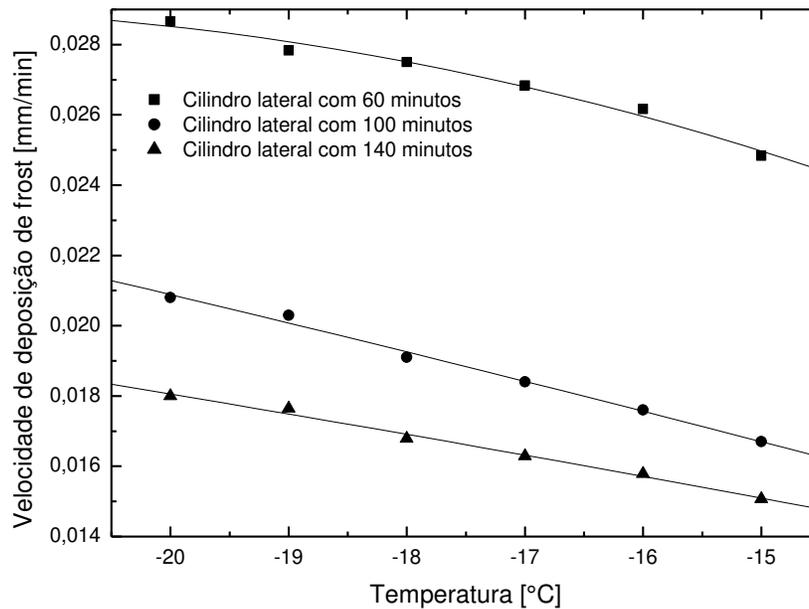


Figura 6.36 Efeito da temperatura do fluido secundário sobre a velocidade deposição de frost para $\dot{V}_{ar} = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}$ e $\dot{m}_{fsc} = 0,017 \text{ kg/s}$ para três cilindros (cilindro lateral).

6.7 Efeito da vazão mássica de fluido secundário

As Figuras 6.37 a 6.40 mostram o efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para o caso de um cilindro, dois cilindros arranjados em séries e três cilindros em arranjo triangular sob escoamento de ar úmido localizados na seção de teste do túnel de vento. Como pode ser observado o aumento da vazão mássica de fluido secundário leva inicialmente a um grande crescimento da deposição de frost sobre a superfície do cilindro, mas depois de certo valor da vazão mássica a velocidade da taxa de deposição de frost começa então a ser reduzida. Por exemplo, analisando a figura 6.36, tem-se que para uma vazão mássica do fluido secundário de 0,06 kg/s o aumento da espessura da camada de frost é quase marginal. A taxa de transferência de calor entre o fluido secundário e o ar úmido depende mais fortemente da diferença de temperatura entre eles, e em menor medida, da vazão mássica do fluido secundário. Uma vez que estas variações são pequenas, o efeito sobre a taxa de deposição de frost sobre a superfície do cilindro também é pequena.

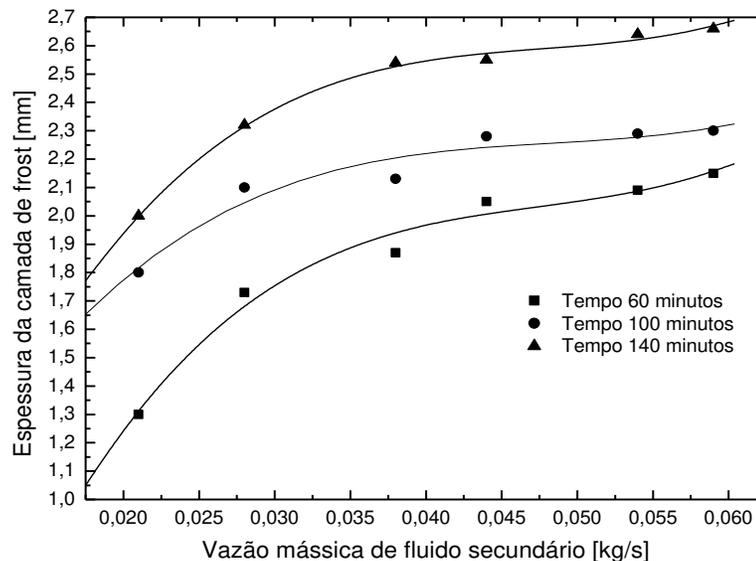


Figura 6.37 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost

para $T_{fsc} = -10^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ para um cilindro.

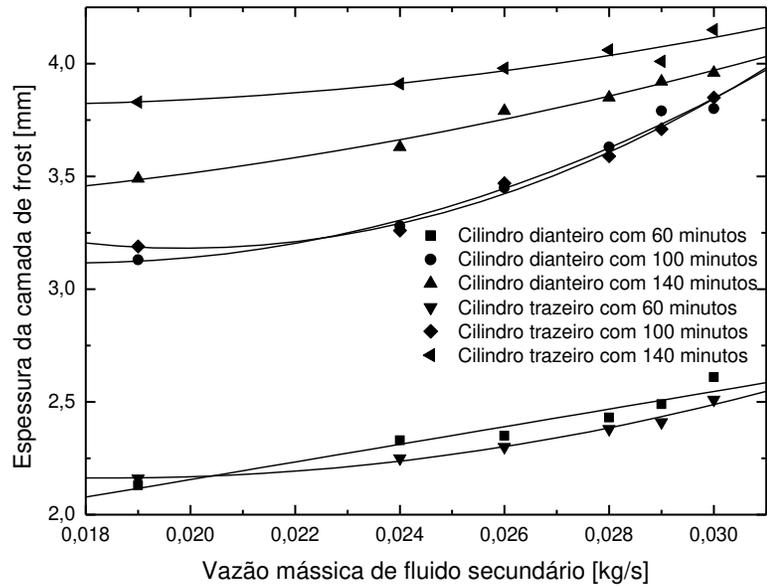


Figura 6.38 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03 m^3/s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e trazeiro).

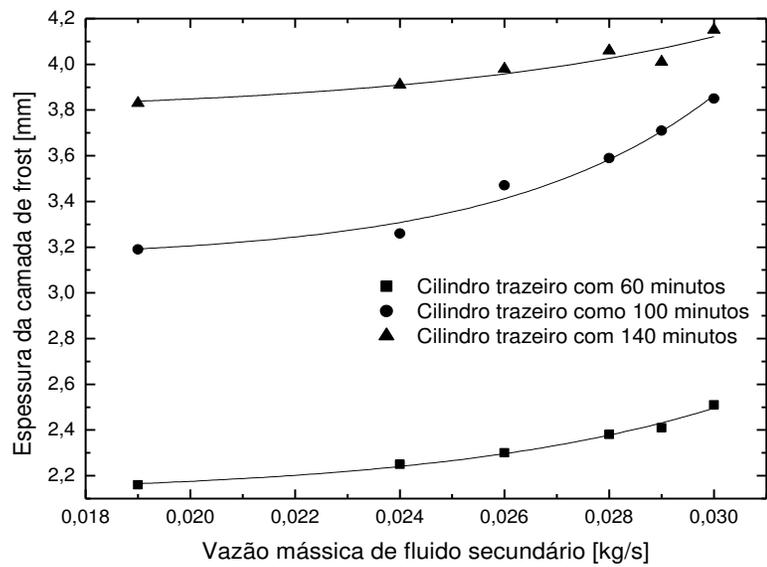


Figura 6.39 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03 m^3/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

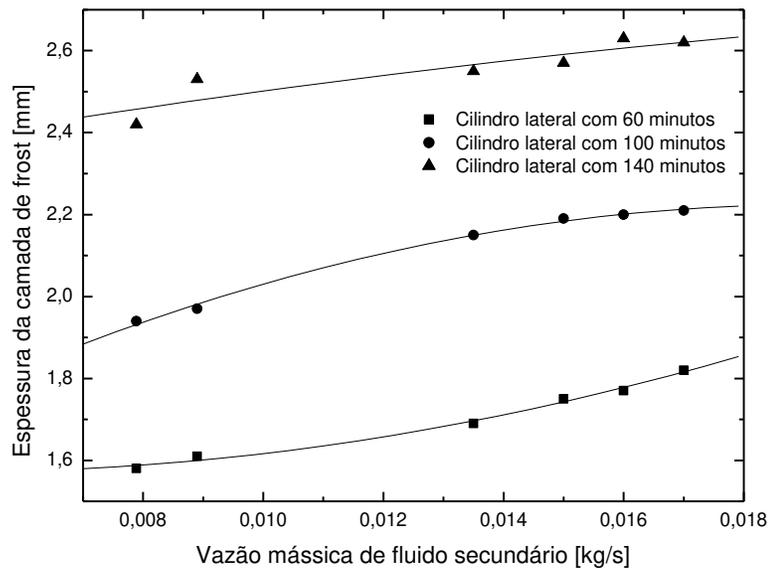


Figura 6.40 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a espessura da camada de frost

para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,025 m^3/s$ para três cilindros (cilindro lateral).

O efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade de deposição de frost é mostrado nas figuras 6.41, 6.42, 6.43 e 6.44. Ela tem um comportamento similar com o das figuras 6.37, 6.38, 6.39 e 6.40, e pode ser explicado da mesma maneira.

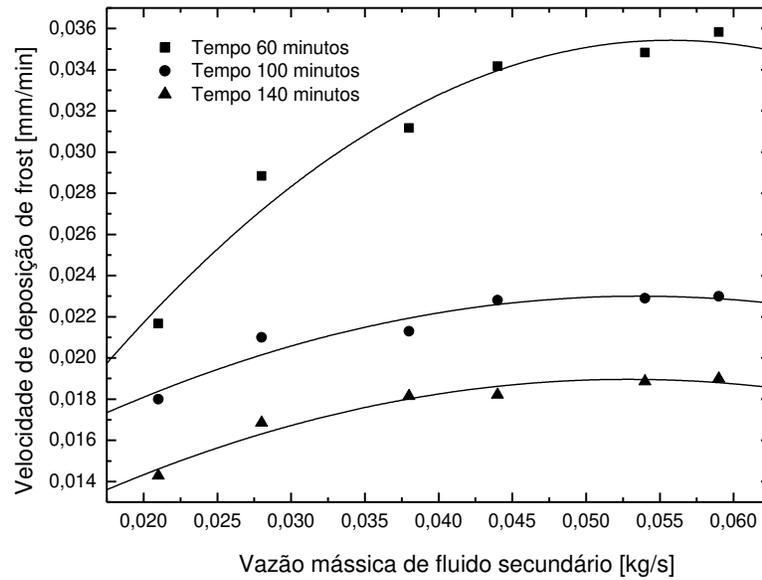


Figura 6.41 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade de deposição de

frost para $T_{fsc} = -10^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03 m^3/s$ para um cilindro.

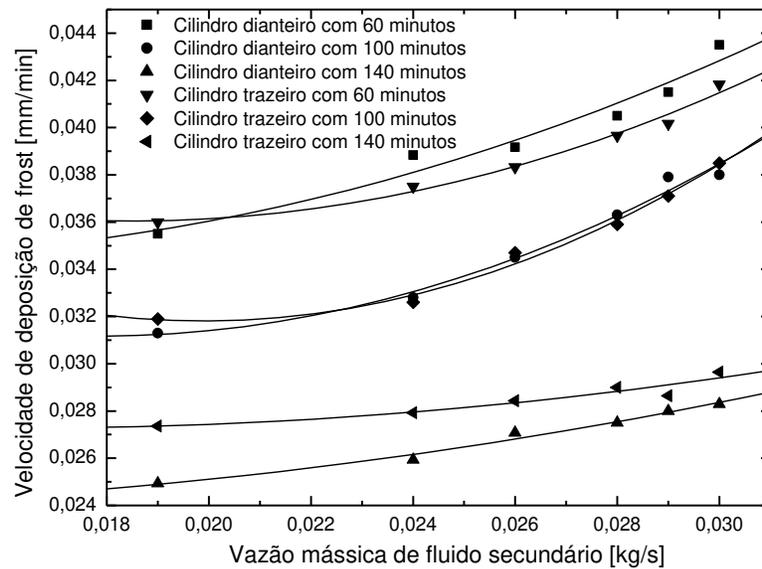


Figura 6.42 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade de deposição de

frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03 m^3/s$ para dois cilindros (cilindro dianteiro e traseiro).

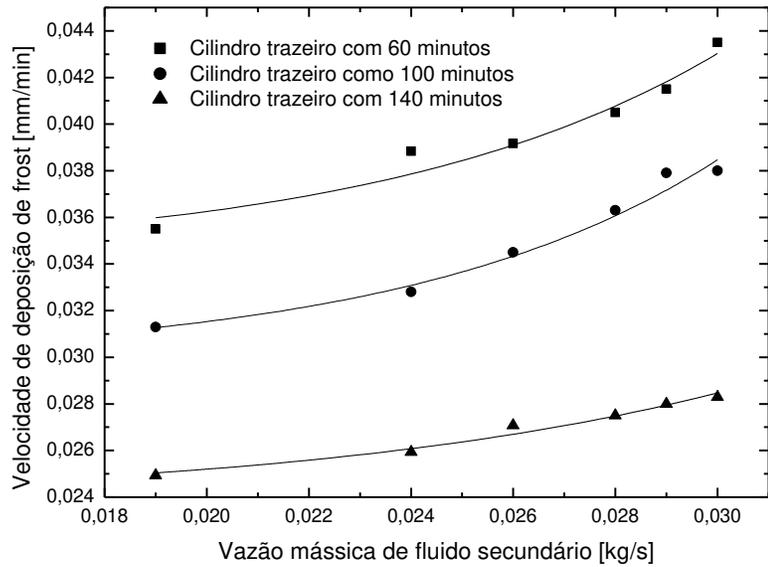


Figura 6.43 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade de deposição de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,03 m^3/s$ para dois cilindros (cilindro trazeiro).

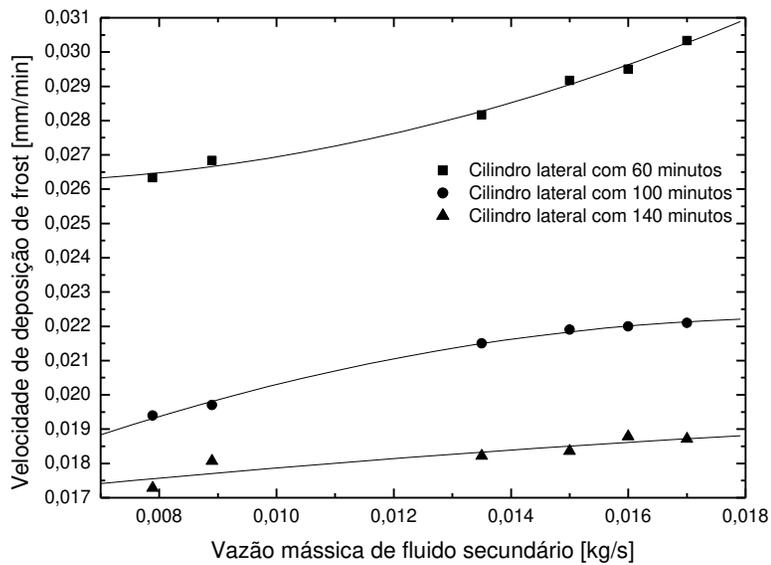


Figura 6.44 Efeito da vazão mássica do fluido secundário sobre a velocidade de deposição de frost para $T_{fsc} = -20^{\circ}C$ e $\dot{V}_{ar} = 0,025 m^3/s$ para três cilindros (cilindro lateral).

6.8 Convalidação do Modelo Numérico Proposto

Antes da apresentação dos resultados numéricos foi realizada uma análise para a otimização do código computacional a fim de encontrar um valor ótimo inicial do diâmetro da coluna de gelo dr e do incremento de tempo dt . Dessa forma, variou-se o dr para faixa de valores entre 10^{-1} a 10^{-5} e o dt na faixa entre 10s a 10^{-4} s. As figuras 6.45 a 6.48 mostram alguns resultados relacionados ao comentário anterior.

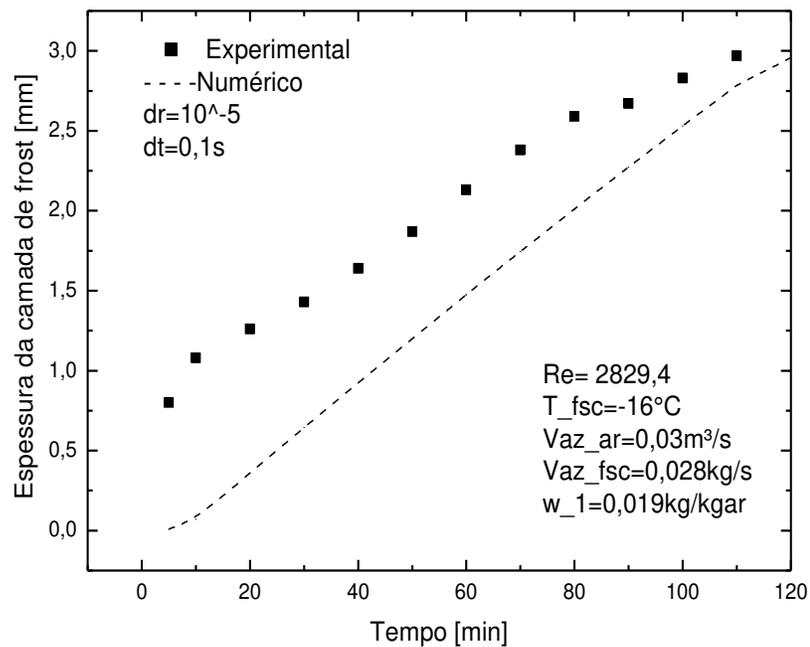


Figura 6.45 Teste realizado para escolha do dr e dt .

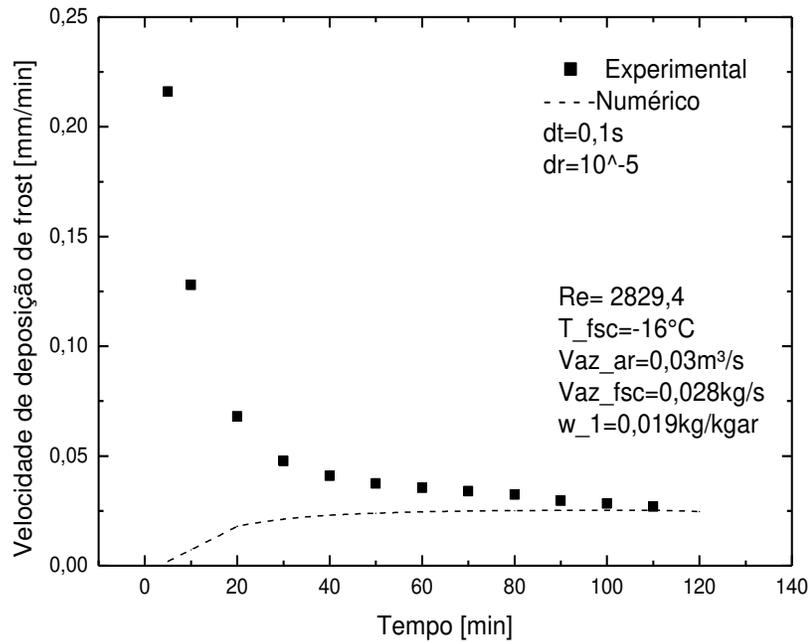


Figura 6.41 Teste realizado para escolha do dr e dt .

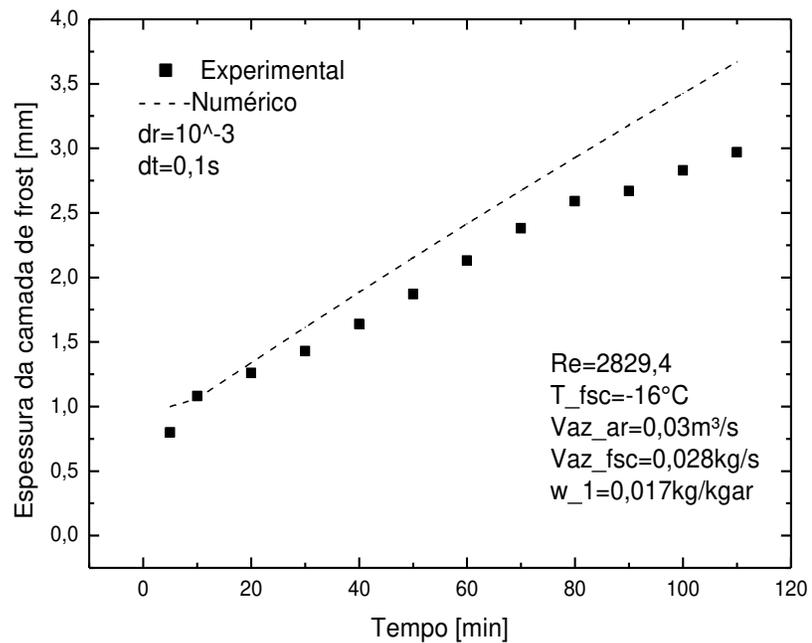


Figura 6.42 Teste realizado para escolha do dr e dt .

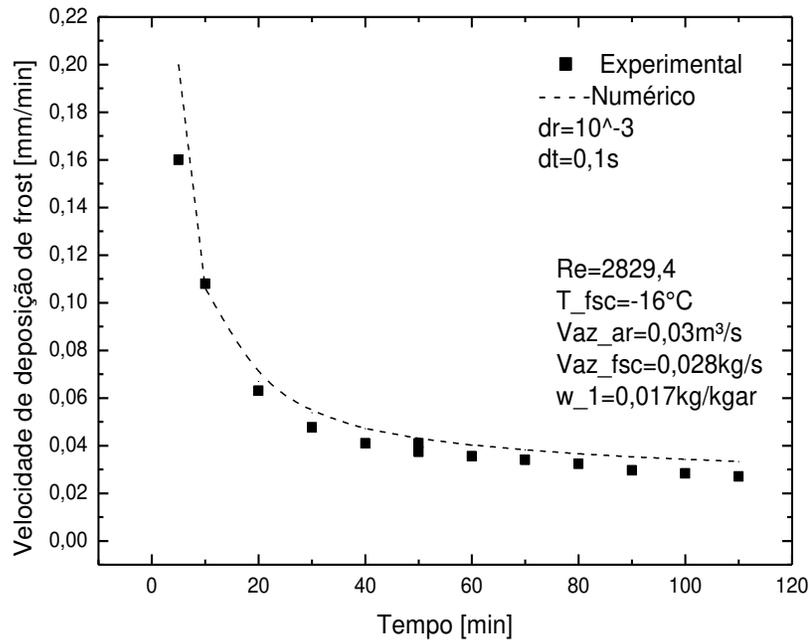


Figura 6.48 Teste realizado para escolha do dr e dt .

Após as análises realizadas, observou-se que para valores de $dr=10^{-3}$ e $dt=10^{-2}s$ os resultados numéricos apresentaram boa concordância quando comparados com os resultados experimentais. Tao et. al. (1993) conseguiu bons resultados com $\alpha = 0,4$ para Re entre 10^3 e 10^5 e para este trabalho se utilizou este valor de $\alpha = 0,4$, pois o valor de Re esteve entre esse intervalo em todos os casos de testes experimentais realizados em laboratório. Assim, adotaram-se esses valores para todas as simulações numéricas realizadas neste trabalho.

A figura 6.49 mostra a variação da espessura da camada de frost em função do tempo e da temperatura do cilindro. Os resultados obtidos apresentam um comportamento dentro do esperado onde para temperaturas mais baixas, tem-se camadas de frost mais espessas. Existe uma pequena região no início do gráfico que apresenta uma inclinação menor e isso equivale a uma menor taxa de crescimento de fronteira. Esta região engloba um período até o tempo de transição

e esta menor inclinação se deve a densidade de gelo muito maior nesta primeira etapa, equivalente à do gelo sólido.

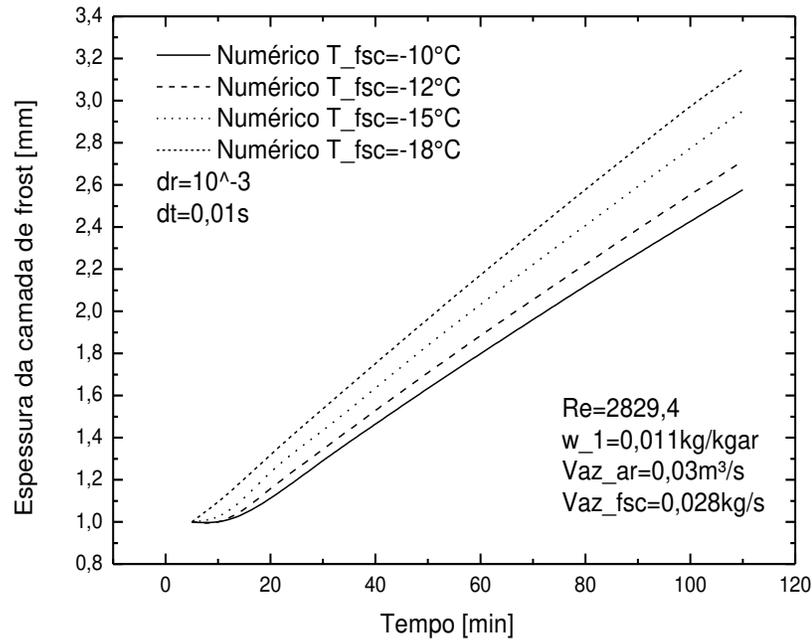


Figura 6.49 Variação da espessura da camada de frost ao longo do tempo e da baixa temperatura da parede do cilindro.

A figura 6.50 mostra as velocidades de deposição de frost em função do tempo e da temperatura fria do cilindro. Os resultados numéricos obtidos mostram um comportamento dentro do esperado em que para temperaturas mais baixas há uma maior taxa de deposição de gelo em torno da superfície do cilindro. Observa-se na figura 6.50 uma região de descontinuidade no gráfico que compreende ao efeito do acoplamento realizado entre a primeira etapa e a segunda etapa do processo de formação de frost.

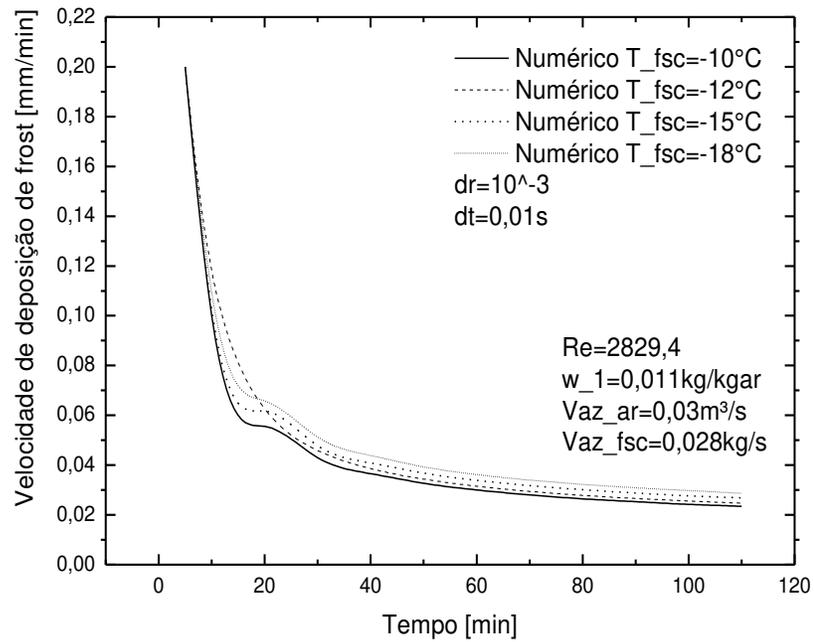


Figura 6.50 Variação da velocidade de deposição de frost em função do tempo da baixa temperatura da parede do cilindro.

A comparação com resultados experimentais para o crescimento da camada de frost e para a velocidade de deposição de frost com o tempo para um cilindro vertical em escoamento de ar úmido é demonstrada nas figuras 6.51 a 6.53.

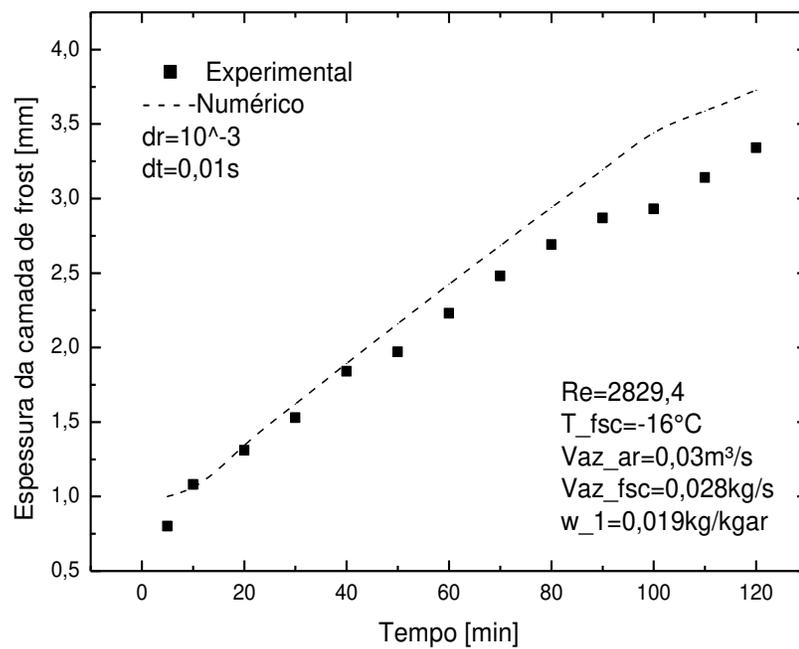


Figura 6.51 Comparação numérica e experimental : crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo.

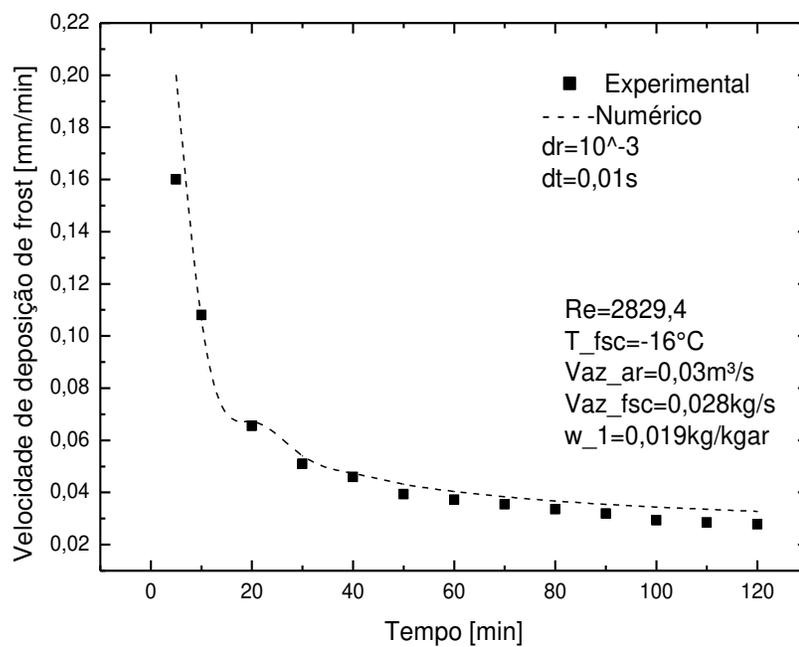


Figura 6.52 Comparação numérica e experimental : velocidade de deposição de frost em função do tempo.

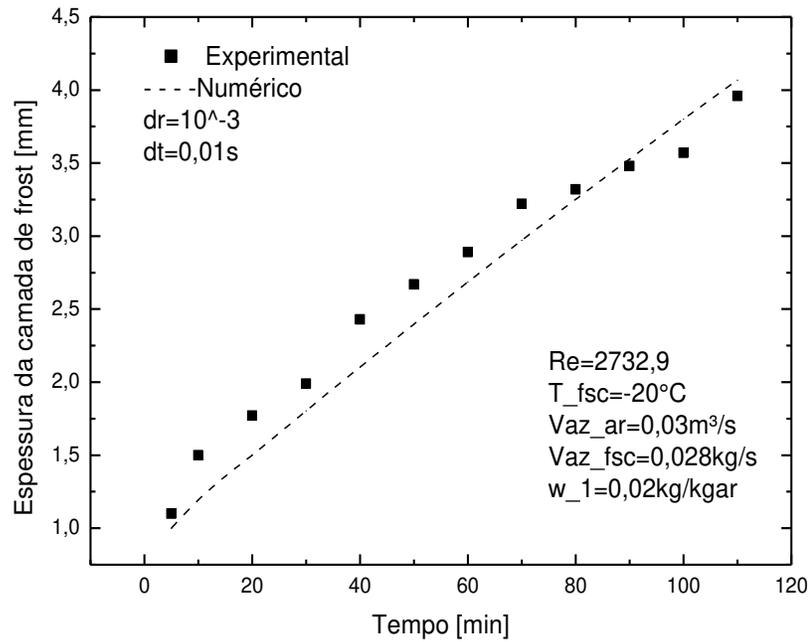


Figura 6.53 Comparação numérica e experimental : crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo.

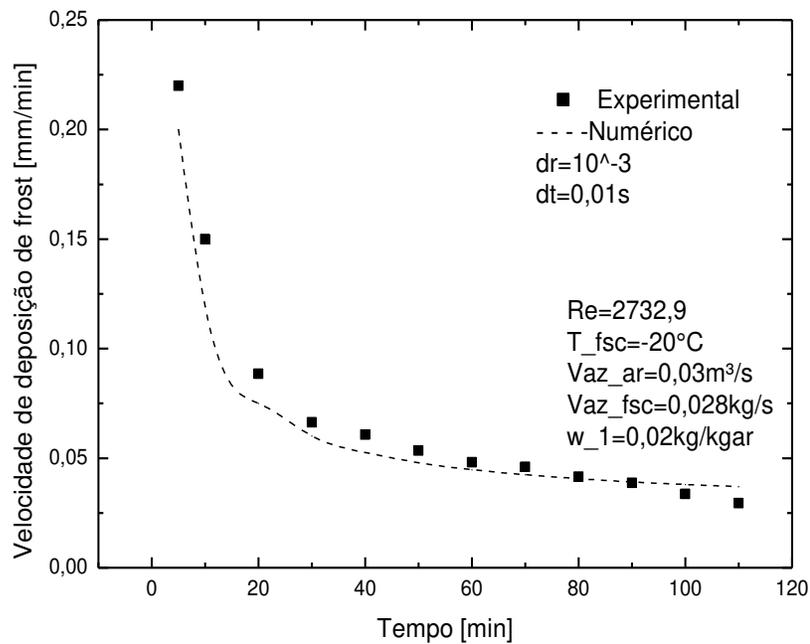


Figura 6.54 Comparação numérica e experimental : velocidade de deposição de frost em função do tempo.

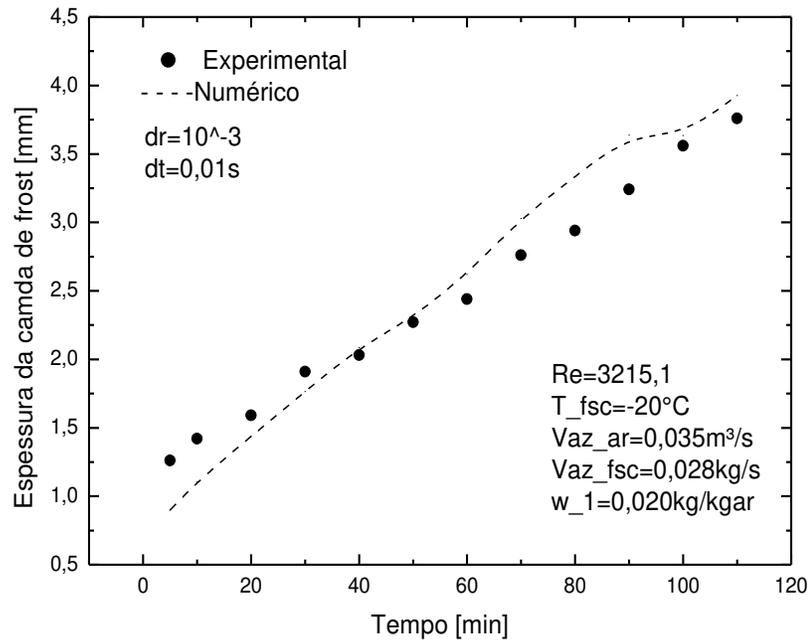


Figura 6.55 Comparação numérica e experimental : crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo.

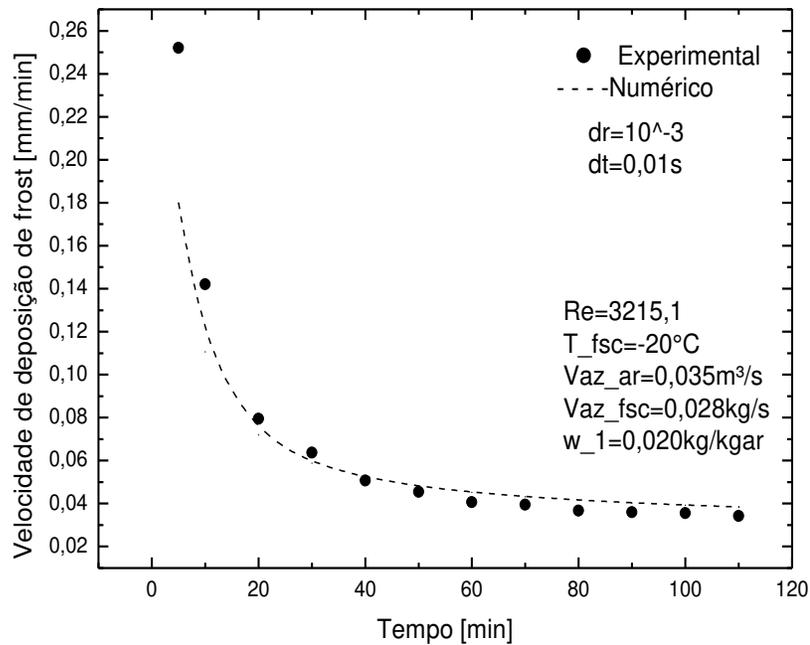


Figura 6.56 Comparação numérica e experimental : velocidade de deposição de frost em função do tempo.

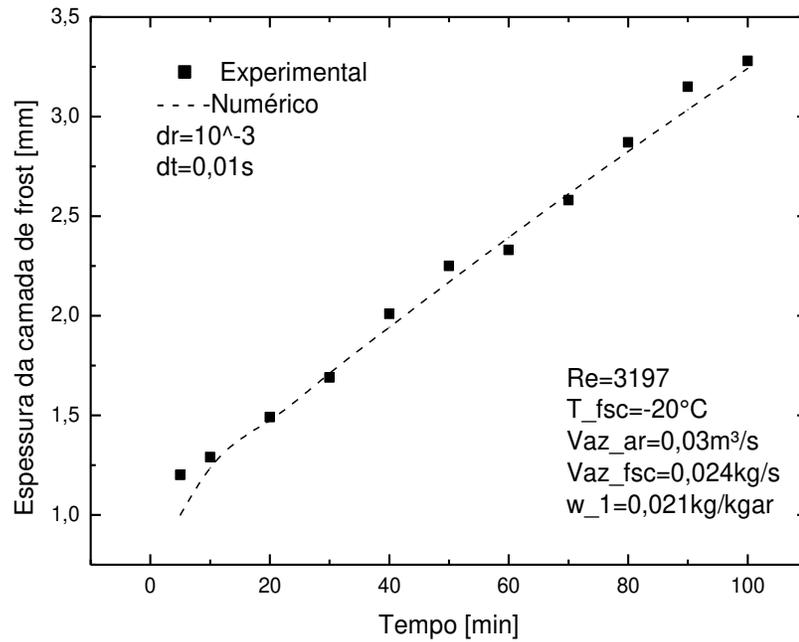


Figura 6.57 Comparação numérica e experimental : crescimento da espessura da camada de frost em função do tempo.

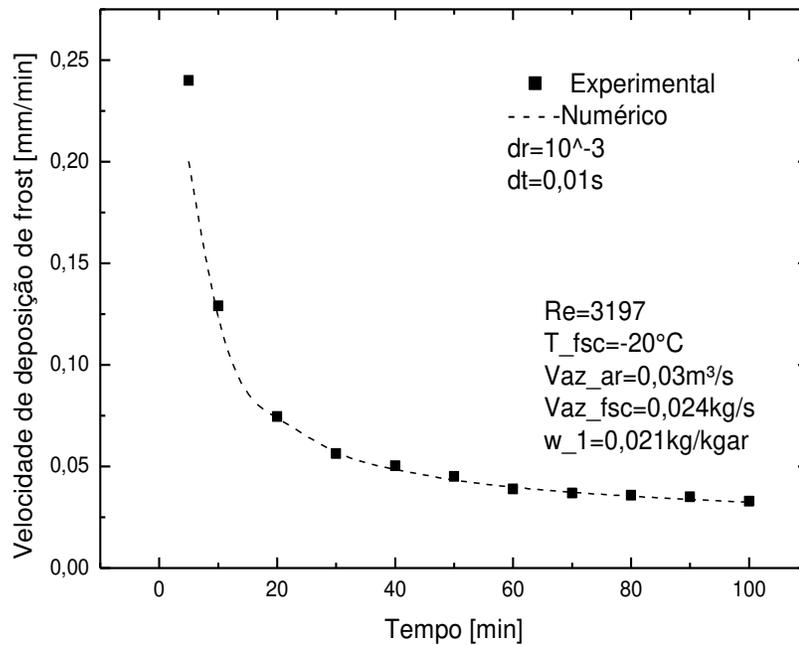


Figura 6.58 Comparação numérica e experimental : velocidade de deposição de frost em função do tempo.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusão

Neste trabalho, foi estudada experimentalmente, a formação de frost em torno de um cilindro vertical, dois cilindros verticais em série e três cilindros verticais em arranjo triangular sob condições de escoamento de ar úmido e investigada a influência das variações de parâmetros operacionais, tais como: a vazão volumétrica de ar, a temperatura e vazão mássica de fluido secundário sobre a taxa de deposição de frost em torno da superfície do cilindro. Para o caso da formação de frost sobre um cilindro vertical, foi implementado e adaptado um programa computacional já existente (Scalon, 1993) que permitiu a avaliação do fenômeno de formação de frost, segundo a variação dos parâmetros geométricos e operacionais para um cilindro. Baseado nos comentários e resultados experimentais e numéricos apresentados no capítulo 6 pode-se concluir que:

- 1) A espessura da camada de frost é afetada negativamente, ou seja, diminui com o aumento da vazão volumétrica de ar conforme é mostrado na seção 6.5.
- 2) A velocidade de deposição de frost também decresce com o aumento da vazão volumétrica de ar úmido conforme é mostrado na seção 6.5.
- 3) Quando há uma diminuição na temperatura de fluido secundário, a temperatura da superfície do cilindro diminui e isso provoca aumento da espessura da camada de frost e altas taxas de deposição de frost sobre a superfície fria do cilindro conforme é mostrado na seção 6.6.
- 4) A espessura da camada de frost é afetada favoravelmente pelo aumento da vazão mássica do fluido secundário, ou seja, há um crescimento da camada de frost de forma considerável no início dos testes e também, esse aumento da vazão mássica provoca aumento na taxa de deposição sobre a superfície do cilindro conforme é mostrado na seção 6.7.

5) As comparações entre as previsões numéricas e as medidas experimentais mostram boa concordância, assim convalida-se o modelo e a técnica numérica usada, assegurando a viabilidade de utilizar o modelo para análise e avaliação preliminar do crescimento da fronteira de frost em torno de um cilindro vertical em escoamento de ar úmido conforme é mostrado na seção 6.8.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Investigação da influência da variação de posições entre os cilindros no escoamento de ar úmido sobre a taxa de deposição de frost.
- Elaboração de um modelo teórico que obtenha uma distribuição de densidades em torno dos cilindros.
- Desenvolvimento de um modelo teórico e conseqüentemente de um código computacional que avalie a formação de frost em torno de dois cilindros verticais em série e também para o caso de três cilindros verticais em arranjo triangular sob escoamento de ar úmido.

Referências

ABDEL-WHAHED, R.M., HIFNI, M.A., SHERIF, S.A. Heat and Mass Transfer From a Laminar Humid Air Stream to a Plate at Subfreezing Temperature, **International Journal of Refrigeration**, vol.7, n1, 1984.

AOKI, K., KATAYMA, K., HAYASHI, Y. A Study on Frost Formation (The Process of Frost Formation Involving The Phenomena of Water Permeation and Freezing, **Bulletin of JSME**, 26, pp 87-93, 1983.

ASHRAE, Handbook – 1989 **Fundamentals**, The American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, G.A., 1989.

BRIAN, R.C. REID AND Y.T. SHAH. **Frost** deposition on cold surfaces, (1963).

CHUNG, P. M., ALGREN, A. B. Frost Formation and Heat Transfer on a Cylinder Surface in Humid Air Cross Flow, **Heating Piping and Air Conditioning**, Part 1, pp.171-178, 1958.

DIETENBERG, M.A. Generalized Correlation of the Water Frost Thermal Conductivity, **Int. Journal Heat and Mass Transfer**, 26(4), pp 607-619, 1983.

ECKERT, E.R.G., DRAKE, J.M., **Heat and Mass Transfer**, McGraw-Hill N.Y. 1954.

FOX, R.W., MCDONALD, A.T., PRITCHARD, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC, 2006.

HAYASHI, Y., AOKI, A., ADAEHI, A., HORI, K., Study of Frost Properties Correlating With Frost Formation Types, **J. Heat Transfer**, vol. 99, pp. 239-245, 1977.

HOSODA, T. AND UZUHASHI, H., 1967, Effects of frost on the heat transfer coefficient, **Hitachi Review**, 16(6), 1967

INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P. **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**, LTC, 2009.

ISMAIL, K.A.R. **Banco de Gelo- Fundamentos e Modelagem**, Campinas, 1998.

ISMAIL, K.A.R. **Modelagem de Processos Térmicos – Fusão e Solidificação**, Campinas, 1998.

ISMAIL, KAMAL A. R, SALINAS, C. T. S., GONÇALVES, M. M., Frost Growth Around a Cylinder in a Wet Air Stream, **Int J. Refrig.** Vol. 20, No. 2, pp. 106-119, 1997.

ISMAIL, K.A.R., MARTINS, K.R.S.B., BENEDETI, T.M., SCALON, V.L.,PADILHA, A. Frost Formation Around Two Cylinders in Series in a Wet Air Stream, **ASME-ATI-UIT Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems**, Sorrento, Italy, 2010.

JONES, B.W., PARKER, J.D. Frost Formation With Varying Environmental Parameters, **Journal of Heat Transfer**, 97, pp 255-259, 1975.

DONG-KEUN YANG AND KWAN-SOO LEE, Modeling of Frosting Behavior on a Cold Plate, **International Journal of Refrigeration**, Vol. 28, pp. 396-402, 2004.

LEE, Y.B. AND RO, S.T., An Experimental Study of Frost Formation on a Horizontal Cylinder Under Cross Flow, **Int. Journal of Refrigeration**, 468-474, 2001.

MAO, Y., BESANT, R.W., FALK, J. Measurements and Correlations of Frost Properties With Laminar Air Flow at Room Temperature Over a Flat Plate, **ASHRAE Transactions: Symposia**, pp 739-745, 1993.

MARTINS, K.R.S.B., ISMAIL, K.A.R. Experiments on Frost Formation Around a Circular Cylinder, **HEFAT 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics**, Antalya, Turkey, 2010.

MARTINS, K.R.S.B., ISMAIL, K.A.R. Frost Formation Around a Vertical Cylinder in Humid Air, **COBEM 20th International Congress of Mechanical Engineering**, Gramado, Brasil, 2009.

NIEDERER, D. H, Defrosting of Air Units in Central Systems, **ASHRAE Transactions** (1976).

PACE, D.P. The Removal or Retarding Frost Formation on Supermarket-Type Freezers, **ASHRAE Transactions**, pp 592-595.

PADILHA, A. Estudo Teórico Experimental do Movimento da Frente de Solidificação por Super Resfriamento no Interior do Duto, **Tese de Doutorado**, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1990.

PADKI, M.M., SHERIF, S.A., NELSON, R.M., A Simple Method for Modelling Frost Formation in Different Geometries, **ASHRAE Transactions**, 95(2), pp 1127-1137, 1989.

PARISH, H.C., SEPSY, C.F.. A Numerical Analysis of the Frost Formation Under Forced Convection, **ASHRAE Transactions**, pp 236-251, 1972.

SALINAS, C.T. Formação de Gelo em Placa Plana, **Dissertação de Mestrado**, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1996.

SAMI, S.M., DUONG, T., Mass and Heat Transfer During Frost Growth, **ASHRAE Transactions**, 95(1), pp 158-165, 1989.

SANCHES, C.G., PEREIRA, J.T., Controle Térmico de Ambientes, **CABS**, apostila, 1986.

SANDER AND DAMKOHLER, **Naturwiss**, 31, 460, 1943.

SCALON, V.L. Formação de Gelo em Torno de Cilindros Verticais, **Dissertação de Mestrado**, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1993.

SEGAL, S.C. Defrosting of Packaged Refrigeration Systems, **ASHRAE Transactions**, pp 596-605.

SEKI, N., FUKUSANO, S., MATSUO, K., Incipient Phenomenal of Frost Formation, **Bulletin of JSME**, 27, pp. 2476 – 2482, 1984.

SHAH, Y.T., Theory of Frost Formation, **Doctor's Thesis of M.I.T.**, 1969.

SHERIF, S.A., RAJU, S.P., PADKI, M.M., AND CHAN, A.B., A Semi-empirical Transient Method of Modelling Frost Formation on a Flat Plate, **Rev. Int. Froid**, 16, n°5, pp. 321 – 329, 1993.

SHNEIDER, H.W., Equation of the Growth Rate Frost Forming in Cooled Surfaces, **Int. J. Heat Mass Transfer**, 21, pp 1019-1024, 1978.

STOECKER, W.F. How the Frost Formation on Coils Affects Refrigeration Systems, **Refrigerating Engineering**, vol. 65, n2, pp42-46, 1957.

STOECKER, W.F; JONES, J.W., *Refrigeração e Ar Condicionado*, McGraww-Hill do Brasil, São Paulo, 1985.

TAO, Y. X., BESANT, R. W., REZKALLAH, K. S., Mathematical Model for Predicting the Densification of Frost on a Fiat Plate, **Int. J. Heat Mass Transfer**, vol. 2, pp. 353-363, 1993.

TOKURA, L, SAITO, H., KISHIUAMI, K., Study on Properties and Growth Rate of a Frost Layer on Cold Surfaces, **J. Heat Transfer**, vol. 105, pp. 895-901, 1983.

YAMAKAWA, N., TAKAHASHI, N., OHTANI, S. Forced Convection Heat and Mass Transfer Under Frost Conditions, **Heat Transfer – Japanese Research**, 1, n2, 1972.

JUNG-SOO KIM, DONG-KEUN YANG AND KWAN-SOO LEE., Dimensionless correlations of frost properties on a cold cylinder surface, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 51, pp. 3946 - 3952, 2008.

YONKO, J. D., SEPSY, C. F., An Investigation of the Thermal Conductivity of Frost While Forming on a Fiat Horizontal Plate, **ASHRAE Transs.**, vol. 73 I . 1 . 1 –1.1.10, 1967.

APÊNDICE A - Análise de Incerteza Experimental

Em análises de engenharia são utilizados freqüentemente dados de testes experimentais para servirem de base em projetos. Segundo Ismail (2003) os dados de medidas experimentais de grandezas como pressão, temperatura, comprimento, força, entre outras, sempre exibirão certa variação se as medidas forem repetidas várias vezes com instrumentos precisos. Nem todos os dados são igualmente bons, pois a variabilidade é fundamental a todos os sistemas de medidas. Segundo Fox e McDonald (2001), a validade dos dados deve ser documentada antes que os resultados do teste sejam usados no projeto. Assim, os erros estão sempre presentes quando medições experimentais são realizadas e podem ser basicamente de dois tipos: o fixo (ou sistemático) que causa repetida medições erradas da mesma quantidade em cada tentativa, podendo ser eliminado pela calibração do instrumento e o aleatório (não repetitivo) é diferente para cada leitura e não pode ser eliminado. Dessa forma, a análise de incerteza é o procedimento utilizado para quantificar a validade dos dados e sua acurácia e nos possibilita estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais.

Esse método consiste em especificar a incerteza de cada medida experimental primária como a temperatura, vazão, comprimento, etc. Utilizando a mesma nomenclatura dos autores, chamando-se de w uma função e x, y, \dots, n as variáveis independentes, obtém-se a relação:

$$w = w(x, y, \dots, n) \quad (\text{A.1})$$

Denominando as incertezas de cada variável independente por $\delta_x, \delta_y, \dots, \delta_n$ temos:

$$\partial w = \pm \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \delta y \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial w}{\partial n} \delta n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

Baseado na explanação acima foi determinado às incertezas relativas a todas as variáveis medidas ao longo do experimento.

1. Incerteza do Tempo

A medida realizada de tempo foi feita por meio de um cronômetro e se trata de medição direta cuja incerteza relativa é de $\pm 0,01s$, ou seja:

$$\delta_t = \pm 0,01s \quad (\text{A.3})$$

2. Incerteza da espessura de frost

Para a medição da espessura de frost em torno do cilindro foi colocado no ponto de estagnação tubo uma escala em milímetros com incerteza de $\pm 0,5mm$. Como a medida de espessura pela escala se trata de uma medição direta, a incerteza relativa dessa medida pode ser determinada pela relação com a própria incerteza da escala, isto é:

$$e = \pm 0,5mm \quad (\text{A.4})$$

3. Incerteza da temperatura

Como em qualquer experimento que envolva medida de temperatura com termopares, é necessário que estes sejam, previamente, calibrados. A incerteza relativa à temperatura é de $\pm 0,5^\circ C$, sendo:

$$\delta_T = \pm 0,5^\circ C \quad (\text{A.5})$$

4. Incerteza da velocidade do ar úmido

A medição da velocidade do fluxo de ar foi realizada por meio de um anemômetro de fio quente. Por se tratar de uma medida direta, a incerteza relativa da velocidade do ar é dada pela relação com a incerteza do instrumento, logo:

$$\delta_{(v_{méd})_i} = \pm \frac{0,01}{v_{(méd)_i}} m/s \quad (\text{A.6})$$

5. Incerteza do diâmetro do tubo

O diâmetro interno e externo do tubo, depois de várias medidas com paquímetro, apresentou valores médios de mm e mm respectivamente. Em decorrência disso puderam-se calcular as incertezas relativas às medidas dos diâmetros:

$$\delta_{D_{ext}} = \pm \frac{0,05}{25,4} = 0,0020mm \ (0,0020 \times 10^{-3}m) \ (20 \ a \ 1) \quad (A.7)$$

$$\delta_{D_{int}} = \pm \frac{0,05}{23,4} = 0,0021mm \ (0,0021 \times 10^{-3}m) \ (20 \ a \ 1) \quad (A.8)$$

6. Incerteza do comprimento e da altura da seção de saída do túnel de vento

As medidas de incerteza relativa ao comprimento e à altura da seção de saída do túnel de vento são dadas pela relação com a medida de incerteza da escala. Dessa forma, temos para ambas as medidas de incertezas:

$$\delta_b = \pm \frac{0,5}{502} = 0,0010mm \quad (A.9)$$

$$\delta_h = \pm \frac{0,5}{302} = 0,0017mm \quad (A.10)$$

7. Incerteza da área da seção de saída do túnel de vento

Para a determinação da incerteza experimental da área da seção de saída do túnel de vento foi utilizada a equação (A.11). Essa área é definida por:

$$A = b \cdot h \quad (A.11)$$

$$A = A(b, h)$$

Logo, aplicando a equação (A.11) em (A.2), temos:

$$\delta_A = \pm \left[\left(\frac{\partial A}{\partial b} \cdot \delta_b \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial h} \cdot \delta_h \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A.12)$$

Com as seguintes derivadas:

$$\frac{\partial A}{\partial b} = h \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\partial A}{\partial h} = b \quad (\text{A.14})$$

Substituindo as derivadas (A.13) e (A.14) na equação (A.12), temos:

$$\delta_A = \pm [(h \cdot \delta_b)^2 + (b \cdot \delta_h)^2]^{1/2} \quad (\text{A.15})$$

$$\delta_A = \pm 0,91 \text{mm}^2$$

8. Incerteza da vazão volumétrica de ar

A vazão volumétrica de ar é dada pela seguinte equação:

$$\dot{V}_{ar} = \sum_{i=0}^n v_i \cdot \dot{A}_i = v_{(méd)_i} \cdot A \quad (\text{A.16})$$

$$\dot{V}_{ar} = \dot{V}_{ar}(v_{(méd)_i}, A)$$

Assim, aplicando a equação (A.2), temos:

$$\delta_{\dot{V}_{ar}} = \pm \left[\left(\frac{\partial \dot{V}_{ar}}{\partial v_{(méd)_i}} \cdot \delta_{v_{(méd)_i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{V}_{ar}}{\partial A} \cdot \delta_A \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.17})$$

Sendo as derivadas:

$$\frac{\partial \dot{V}_{ar}}{\partial v_{(méd)_i}} = A \quad (\text{A.18})$$

$$\frac{\partial \dot{V}_{ar}}{\partial A} = v_{(méd)_i} \quad (\text{A.19})$$

Substituindo as derivadas (A.18) e (A.19) na equação (A.17), temos:

$$\delta_{\dot{V}_{ar}} = \pm \left[\left(A \cdot \delta_{v_{(méd)_i}} \right)^2 + \left(v_{(méd)_i} \cdot \delta_A \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.20})$$

9. Incerteza da vazão mássica de fluido secundário

A vazão em massa de fluido secundário (etanol) escoando através de um tubo deve ser determinada coletando-a num recipiente ou béquer. A vazão em massa é calculada a partir da massa líquida de fluido secundária coletada dividida pelo intervalo de tempo, definida na equação (A.21):

$$\dot{m}_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i} \quad (\text{A.21})$$

$$\dot{m}_i \doteq m_i(\Delta m_i, \Delta t_i)$$

Em que $\Delta m_i = m_{c_i} - m_v$. As estimativas de erro para as quantidades medidas são:

Massa do béquer cheio de i medidas $m_{c_i} = m_{c_i} \pm 1 \text{ g}$ (3 por 1).

Massa do béquer vazio $m_v = m_v \pm 1 \text{ g}$ (3 por 1).

Intervalo de tempo de coleta, $\Delta t_i = \Delta t_i \pm 0,01 \text{ s}$ (3 por 1).

As incertezas relativas nas quantidades medidas são dadas por:

$$\delta m_{c_i} = \pm \frac{1 \text{ g}}{m_{c_i}} \quad (\text{A.22})$$

$$\delta m_v = \pm \frac{1 \text{ g}}{m_v} \quad (\text{A.23})$$

$$\delta \Delta t_i = \pm \frac{1 \text{ s}}{\Delta t_i} \quad (\text{A.24})$$

A incerteza relativa no valor medido da massa líquida é calculada a partir da equação proposta por Fox e McDonald (2001) como:

$$\delta \Delta m_i = \pm \left[\left(\frac{m_{c_i}}{\Delta m_i} \cdot \frac{\partial \Delta m_i}{\partial m_{c_i}} \cdot \delta m_{c_i} \right)^2 + \left(\frac{m_v}{\Delta m_i} \cdot \frac{\partial \Delta m_i}{\partial m_v} \cdot \delta m_v \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.25})$$

Com as derivadas calculadas abaixo:

$$\frac{\partial \Delta m_i}{\partial m_{c_i}} = 1 \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{\partial \Delta m_i}{\partial m_v} = -1 \quad (\text{A.27})$$

Substituindo os valores das derivadas (A.26) e (A.27) na equação (A.25), temos:

$$\delta\Delta m_i = \pm \left[\left(\frac{m_{c_i}}{\Delta m_i} \cdot \delta m_{c_i} \right)^2 + \left(-\frac{m_v}{\Delta m_i} \cdot \delta m_v \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.28})$$

Uma vez que $\dot{m}_i = \dot{m}_i(\Delta \dot{m}_i, \Delta t_i)$, segundo Fox e McDonald (2001), podemos escrever uma equação como:

$$\delta \dot{m}_i = \pm \left[\left(\frac{\Delta m_i}{\dot{m}_i} \cdot \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial \Delta m_i} \cdot \delta \Delta m_i \right)^2 + \left(\frac{\Delta t_i}{\dot{m}_i} \cdot \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial \Delta t_i} \cdot \delta \Delta t_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.29})$$

Os termos requeridos das derivadas parciais são:

$$\frac{\partial \dot{m}_i}{\partial \Delta m_i} = \frac{1}{\Delta t_i} \quad (\text{A.30})$$

$$\frac{\partial \dot{m}_i}{\partial \Delta t_i} = -\frac{\Delta m_i}{\Delta t_i^2} \quad (\text{A.31})$$

Efetuada as substituições referentes às derivadas (A.30) e (A.31), temos:

$$\delta \dot{m}_i = \pm \left[\left(\frac{\Delta m_i}{\dot{m}_i} \cdot \frac{1}{\Delta t_i} \cdot \delta \Delta m_i \right)^2 + \left(\frac{\Delta t_i}{\dot{m}_i} \cdot -\frac{\Delta m_i}{\Delta t_i^2} \cdot \delta \Delta t_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A.32})$$

Simplificando a equação (A.32) ficamos com:

$$\delta \dot{m}_i = \pm [(\delta \Delta m_i)^2 + (-\delta \Delta t_i)^2]^{1/2} \quad (\text{A.33})$$

Os resultados para os cálculos referentes às incertezas das medidas são mostrados nas tabelas A.1, A.2 e A.3.

Tabela A.1 Incertezas experimentais referentes às medidas para um cilindro.

Experimentos	T [$\pm^{\circ}\text{C}$]	e [$\pm\text{mm}$]	v [$\pm\text{m/s}$]	\dot{V}_{ar} [$\pm\text{m}^3/\text{s}$]	\dot{m}_{fsc} [$\pm\text{kg/s}$]
1	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072163
2	0,5	0,5	0,00353	0,00053	0,072163
3	0,5	0,5	0,00262	0,00039	0,072163
4	0,5	0,5	0,00212	0,00032	0,072163
5	0,5	0,5	0,0018	0,00027	0,072163
6	0,5	0,5	0,00156	0,00023	0,072163
7	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072398
8	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072163
9	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,07212
10	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072013
11	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,071727
12	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,07223
13	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072163
14	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072163
15	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072163
16	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072163
17	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072163
18	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,072163

Tabela A.2 Incertezas experimentais referentes à medidas para dois cilindros verticais em série.

Experimentos	T [$\pm^{\circ}\text{C}$]	e [$\pm\text{mm}$]	\dot{V}_{ar} [$\pm\text{m}^3/\text{s}$]	\dot{m}_{isc} [$\pm\text{kg}/\text{s}$]
1	0,5	0,5	0,00097	0,06951
2	0,5	0,5	0,00088	0,06951
3	0,5	0,5	0,00076	0,06951
4	0,5	0,5	0,00063	0,06951
5	0,5	0,5	0,00053	0,06951
6	0,5	0,5	0,00047	0,06951
7	0,5	0,5	0,00097	0,069252
8	0,5	0,5	0,00097	0,069255
9	0,5	0,5	0,00097	0,069443
10	0,5	0,5	0,00097	0,06951
11	0,5	0,5	0,00097	0,069446
12	0,5	0,5	0,00097	0,069352
13	0,5	0,5	0,00097	0,06951
14	0,5	0,5	0,00097	0,06951
15	0,5	0,5	0,00097	0,06951
16	0,5	0,5	0,00097	0,06951
17	0,5	0,5	0,00097	0,06951
18	0,5	0,5	0,00097	0,06951

Tabela A.3 Incertezas experimentais referentes à medidas para três cilindros verticais em arranjo triangular.

Experimentos	T [±°C]	e [±mm]	v[±m/ s]	\dot{V}_{ar}[±m³/s]	\dot{m}_{fsc}[±kg/s]
1	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074575
2	0,5	0,5	0,00588	0,00088	0,074575
3	0,5	0,5	0,00508	0,00076	0,074575
4	0,5	0,5	0,0042	0,00063	0,074575
5	0,5	0,5	0,00353	0,00053	0,074575
6	0,5	0,5	0,00314	0,00047	0,074575
7	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,07384
8	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074014
9	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074572
10	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074017
11	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,073759
12	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074575
13	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074575
14	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074575
15	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074575
16	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074575
17	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074575
18	0,5	0,5	0,00645	0,00097	0,074575

APÊNDICE B - Curvas de Calibração

B1. Vazão volumétrica de ar

A curva de calibração para o inversor de frequência que representa a relação entre a frequência e a vazão volumétrica de ar é mostrada na figura B.1.

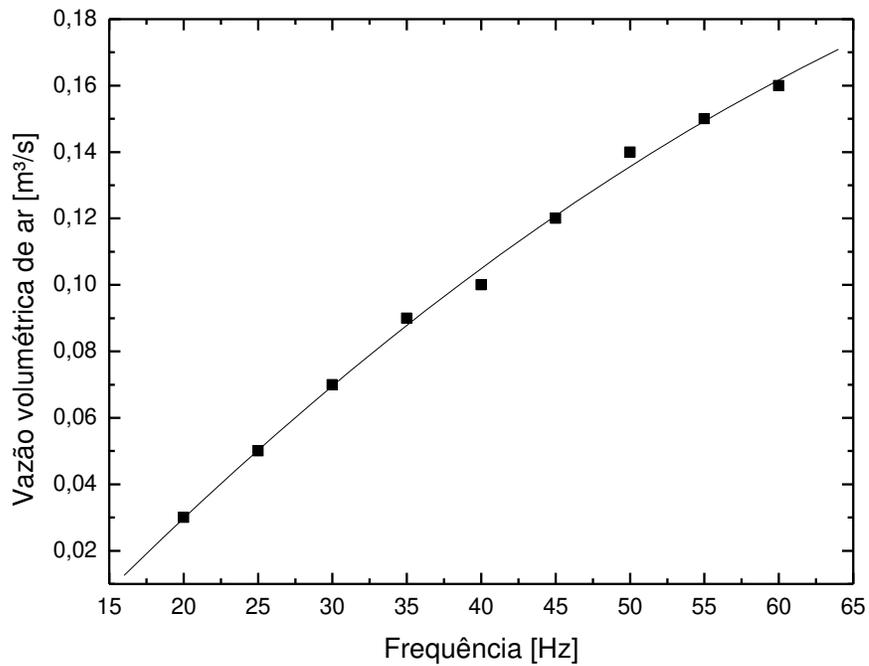


Figura B.1 – Curva de calibração para o inversor de frequência.

A equação de ajuste para a vazão volumétrica tem a seguinte forma:

$$\dot{V}_{ar} = -0,06377 + 0,00514 \cdot Fr - 2,29437 \cdot 10^{-5} \cdot Fr^2 \quad (\text{B.1})$$

Em que Fr representa a frequência do inversor.

B.2 Placa de Orifício

A seguir apresentamos as curvas de calibração para a placa de orifício nas figuras B.2, B.3 e B.4 referentes a um cilindro vertical e aos arranjos dos cilindros em série e em triangular.

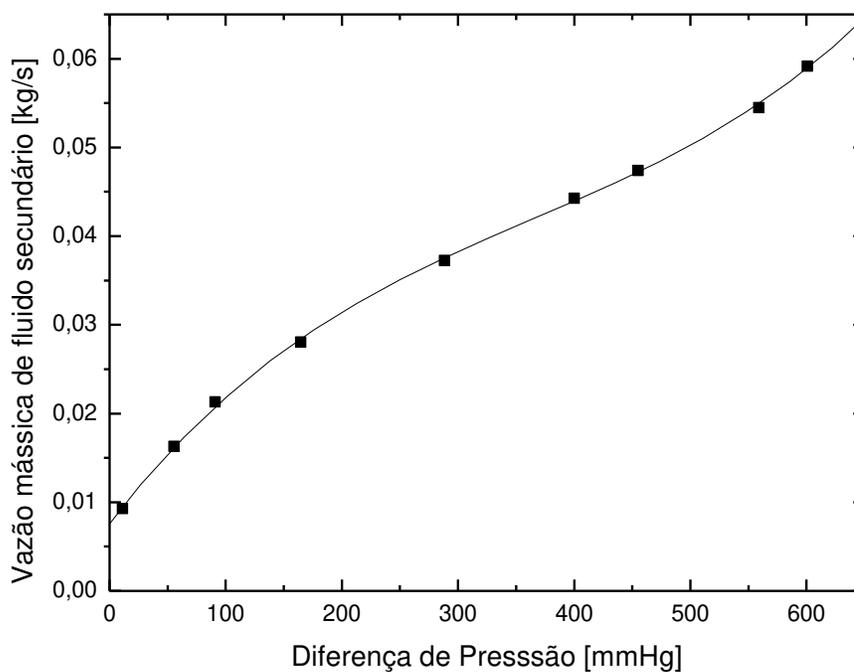


Figura B.2 – Curva de calibração da placa de orifício para um cilindro vertical.

Por regressão polinomial foi obtida a seguinte equação:

$$m = 7,65669 + 0,16988 \cdot \Delta P - 3,11829 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P^2 + 2,84847 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta P^3 \quad (\text{B.2})$$

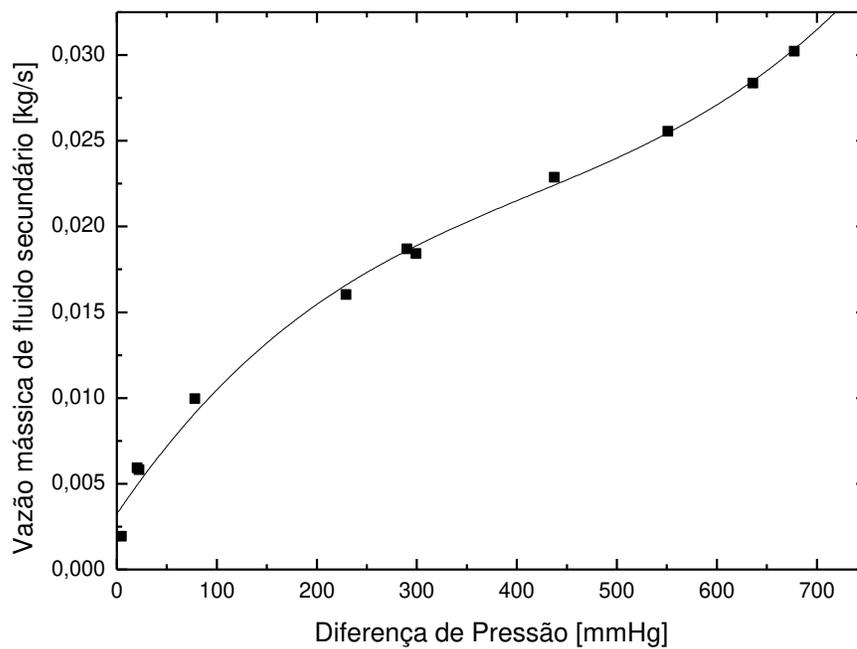


Figura B.3 – Curva de calibração da placa de orifício para dois cilindros.

Por regressão polinomial foi obtida a seguinte equação:

$$\dot{m} = 3,3237 + 0,0858 \cdot \Delta P - 1,48333 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P^2 + 1,18706 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta P^3 \quad (\text{B.3})$$

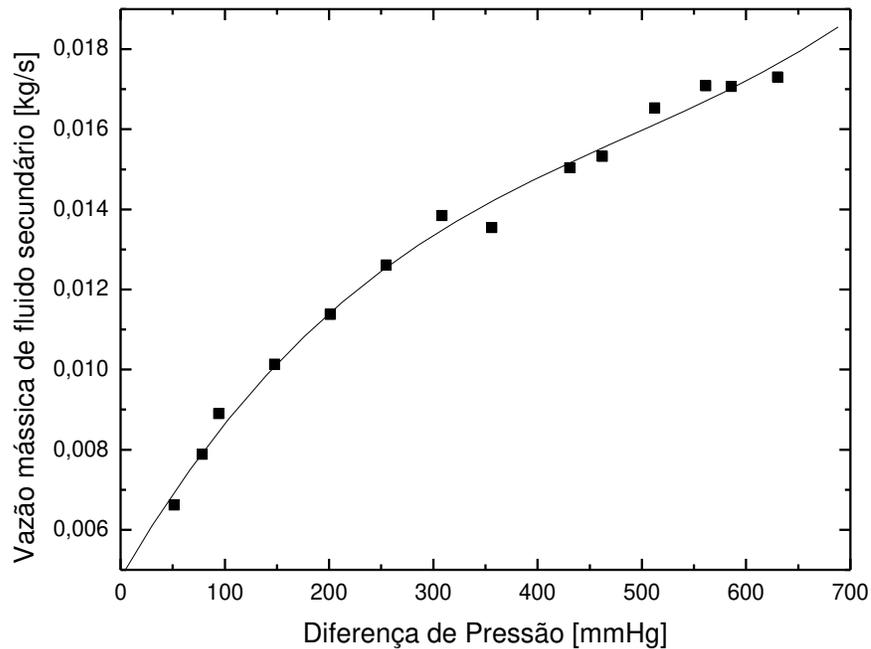


Figura B.4 – Curva de calibração da placa de orifício para três cilindros.

Por regressão polinomial foi obtida a seguinte equação:

$$\dot{m} = 4,81987 + 0,04465 \cdot \Delta P - 6,80738 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta P^2 + 4,67845 \cdot 10^{-8} \cdot \Delta P^3 \quad (\text{B.4})$$

B.3 Termopares

As curvas de calibração de alguns termopares utilizados nos experimentos estão mostradas nas figuras B.5 à B.10 e elas representam a relação entre a medida padrão, medida pelo termômetro padrão e a temperatura do termopar. O desvio médio para as medidas foi de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

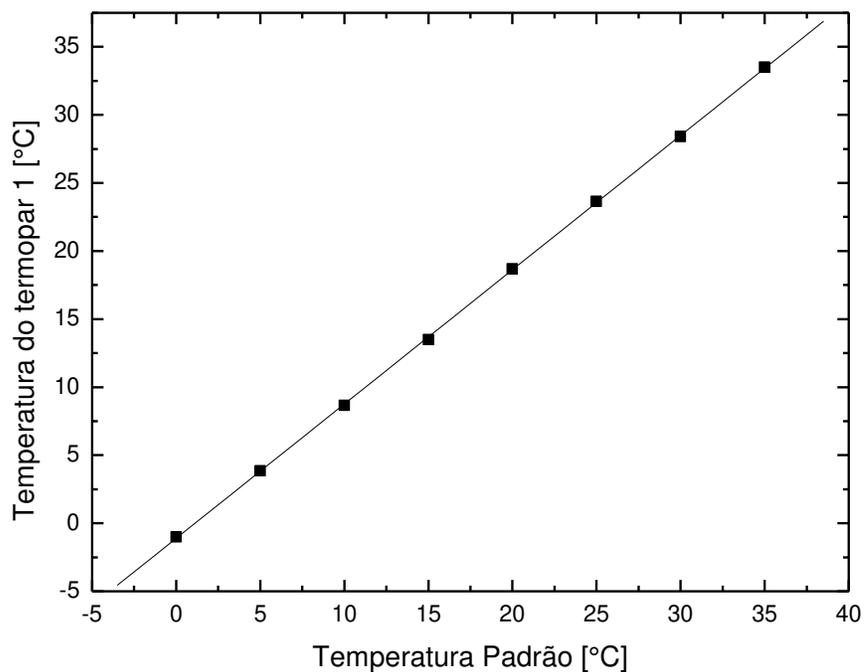


Figura B.5 – Curva de calibração do termopar 1.

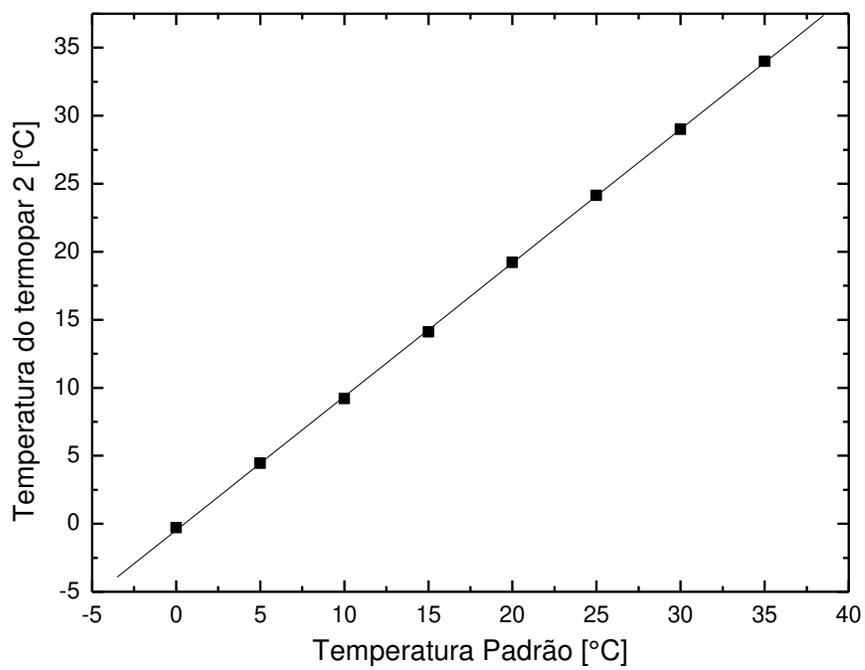


Figura B.6 – Curva de calibração do termopar 2.

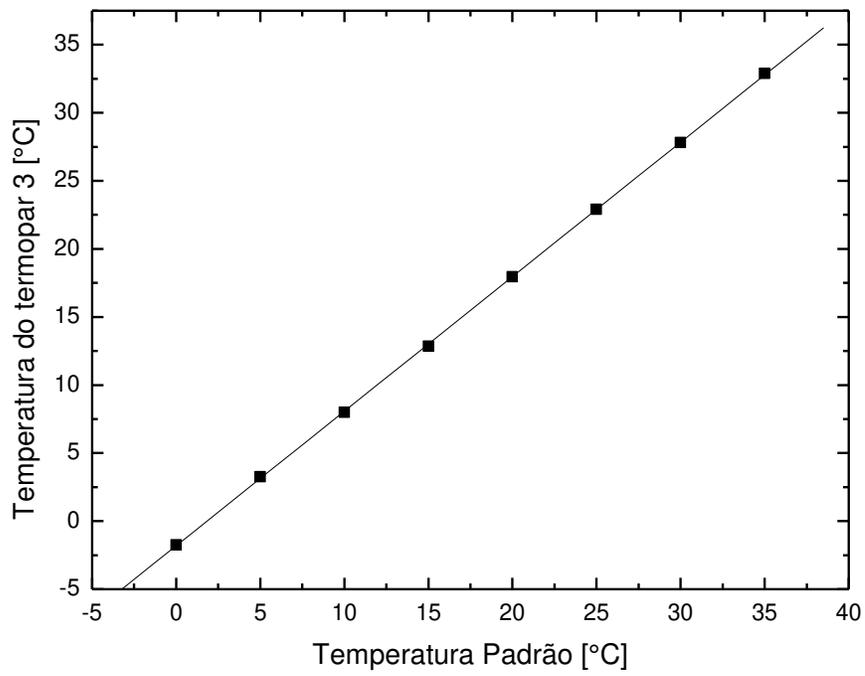


Figura B.7 – Curva de calibração do termopar 3.

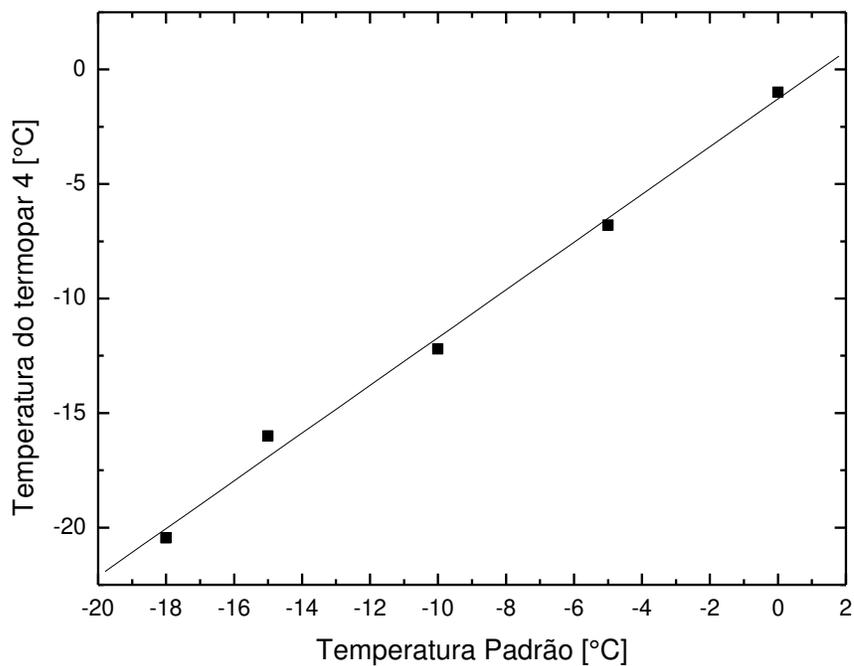


Figura B.8 – Curva de calibração do termopar 4.

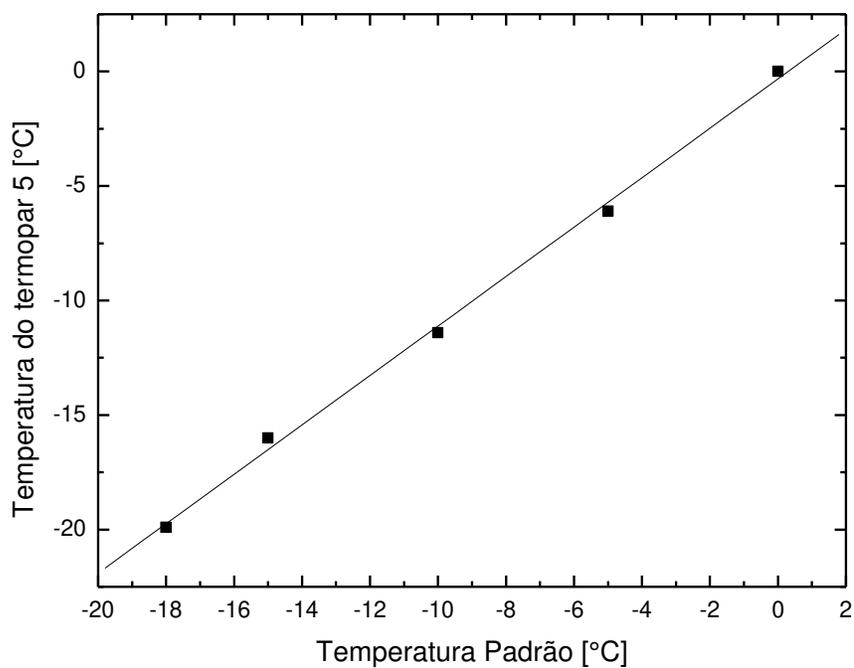


Figura B.9 – Curva de calibração do termopar 5.

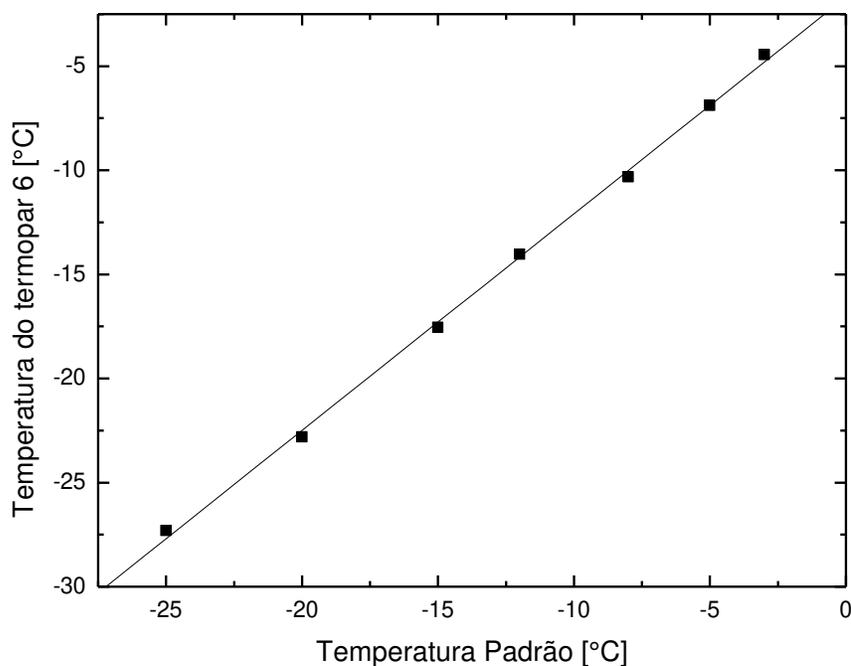


Figura B.10 – Curva de calibração do termopar 6.

A tabela B.1 mostra as equações de ajuste para as figuras B.5 à B.10 com seus respectivos coeficientes de determinação de ajuste.

Tabela B.1 – Equação de ajuste de alguns termopares.

Termopar	Equação de ajuste	Coefficiente de determinação r^2
1	$T_{\text{padrão}} = -1,11 + 0,98671 T_{\text{termopar}}$	0,99992
2	$T_{\text{padrão}} = -1,80833 + 0,98833 T_{\text{termopar}}$	0,99994
3	$T_{\text{padrão}} = -0,475 + 0,98286 T_{\text{termopar}}$	0,99991
4	$T_{\text{padrão}} = -1,28565 + 1,04212 T_{\text{termopar}}$	0,99389
5	$T_{\text{padrão}} = -0,32083 + 1,07908 T_{\text{termopar}}$	0,99753
6	$T_{\text{padrão}} = -1,02001 + 1,02489 T_{\text{termopar}}$	0,99925

APÊNDICE C - Cálculo da Umidade Relativa

Foi utilizado o software Engineering Equation Solver – EES para a determinação da umidade relativa para cada experimento. Através da biblioteca de propriedades termodinâmicas disponível pelo EES, foi determinada a umidade utilizando às equações abaixo:

- a) Determinação da razão de umidade na saída (depois da temperatura de bulbo úmido)

$$W_2 = 0,622 \cdot \frac{P_{sat(2)}}{P_{atm} - P_{sat(2)}} \quad (C.1)$$

- b) Determinação da razão de umidade na entrada (antes da temperatura de bulbo úmido)

$$W_1 = \frac{[c_p \cdot (T_2 - T_1) + W_2 \cdot h_{lv(2)}]}{(h_{v(1)} - h_{l(2)})} \quad (C.2)$$

- c) Determinação da umidade relativa

$$\phi_1 = \left[\frac{W_1 \cdot P_{atm}}{((0,622 + W_1) \cdot P_{sat(1)})} \right] \cdot 100\% \quad (C.3)$$

A pressão atmosférica local foi admitida igual a 94,930 kPa.

As tabelas C.1, C2 e C3 mostram os resultados obtidos para a umidade relativa.

Tabela C.1 Resultados da umidade relativa para um cilindro vertical.

Teste	1 tubo					
	Vazão de ar [m ³ /s]	Tbu[°C]	Seção de saída no túnel			
			Tas [°C]	W1 [kgar/kgvap]	W2 [kgar/kgvap]	Umidade relativa [%]
			Variando a vazão de ar			
1	0,03	21,50	24,30	0,01552	0,01616	87,78
2	0,05	23,70	26,90	0,01777	0,01853	86,19
3	0,07	21,90	24,50	0,01599	0,01667	87,17
4	0,09	22,10	24,90	0,01622	0,01677	89,47
5	0,1	22,30	24,40	0,01650	0,01688	92,60
6	0,12	21,30	23,10	0,01562	0,01595	93,26
	Vazão de álcool[g/s]	Variando a vazão de fluido secundário				
1	21,31	18,3	18,97	0,01315	0,01319	99,07
2	28	19,5	21,75	0,01392	0,01424	93,30
3	38	18,1	19,61	0,01299	0,01302	99,34
4	44	20,1	21,74	0,01469	0,01479	97,96
5	54	19,3	21,38	0,01378	0,01406	94,13
6	59	20,5	22,52	0,01492	0,01517	94,80
	Temperatura de álcool[°C]	Variando a temperatura de fluido secundário				
1	-10	16,10	18,76	0,01144	0,01097	89,30
2	-12	22,40	23,29	0,01725	0,01830	81,41
3	-15	16,50	18,95	0,01702	0,01797	83,01
4	-16	18,70	20,00	0,01969	0,02058	84,69
5	-18	17,80	19,74	0,01742	0,01858	79,83
6	-19	22,30	23,61	0,01824	0,01923	82,65

Tabela C.2 Resultados da umidade relativa para dois cilindros verticais em série.

Teste	2 tubos					
	Vazão de ar [m³/s]	Tbu[°C]	Seção de saída no túnel			
			Tas [°C]	W1 [kgar/kgvap]	W2 [kgar/kgvap]	Umidade Relativa [%]
1	0,03	25,30	26,00	0,02016	0,02046	94,57
2	0,035	25,60	25,80	0,02075	0,02084	98,43
3	0,040	24,80	25,28	0,01963	0,01984	96,21
4	0,046	24,00	25,60	0,01820	0,01888	87,71
5	0,05	24,00	24,40	0,01871	0,01888	96,77
6	0,06	25,60	26,26	0,02055	0,02084	94,91
	Vazão de álcool[g/s]					
1	19,19	26,50	26,70	0,02193	0,02201	98,46
2	24,80	26,50	26,80	0,02189	0,02201	97,69
3	26,01	27,30	27,40	0,02307	0,02311	99,24
4	28,75	25,60	25,68	0,02080	0,02084	99,37
5	29,31	26,70	28,35	0,02158	0,02228	88,02
6	30,87	25,30	25,50	0,02037	0,02046	98,42
	Temperatura de álcool[°C]					
1	-15	27,40	27,67	0,02314	0,02325	97,96
2	-16	26,50	26,62	0,02196	0,02201	99,07
3	-17	27,60	27,45	0,0236	0,02354	101,10
4	-18	28,70	28,94	0,02505	0,02516	98,23
5	-19	27,70	27,35	0,02383	0,02368	102,70
6	-20	25,60	26,02	0,02066	0,02084	96,73

Tabela C.3 Resultados da umidade relativa para três cilindros verticais em arranjo triangular.

Teste	3 tubos					
	Vazão de ar [m ³ /s]	Tbu[°C]	Seção de saída no túnel			
			Tas [°C]	W1 [kgar/kgvap]	W2 [kgar/kgvap]	Umidade Relativa [%]
1	0,025	23,70	24,6	0,01815	0,01853	92,84
2	0,03	24,80	25,6	0,01949	0,01984	93,76
3	0,035	25,50	26,79	0,02016	0,02071	90,27
4	0,04	26,80	25,88	0,02282	0,02242	97,4
5	0,046	25,20	26,38	0,02412	0,02141	94,7
6	0,05	26,10	25,41	0,02321	0,02311	93,46
	Vazão de álcool[g/s]					
1	7,89	25,50	26,16	0,02043	0,02071	94,90
2	8,9	26,40	27,60	0,02137	0,02188	91,08
3	13,5	24,50	25,21	0,01917	0,01947	94,41
4	15	26,80	27,67	0,02205	0,02242	93,50
5	16	23,40	24,75	0,01762	0,01819	89,39
6	17	23,70	25,60	0,01773	0,01853	85,48
	Temperatura de álcool[°C]					
1	-15	23,00	24,03	0,01731	0,01774	91,73
2	-16	23,50	24,08	0,01806	0,01830	95,31
3	-17	23,20	23,71	0,01775	0,01797	95,83
4	-18	25,40	25,88	0,02038	0,02058	96,25
5	-19	23,74	25,58	0,01780	0,01858	85,92
6	-20	24,30	24,6	0,01911	0,01923	97,59

APÊNDICE D - Correlações Empíricas para o Cálculo do Nusselt e Shewoord

As correlações empíricas utilizadas para a determinação dos coeficientes de película são provenientes de Incropera (2009) e são mostradas abaixo:

- Número de Nusselt (correlação proposta por Zuakauskas):

$$Nu_D = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad \left[\begin{array}{l} 0,7 \leq Pr \leq 500 \\ 1 \leq Re_D \leq 10^6 \end{array} \right] \quad (D.1)$$

Sendo o número de Reynolds calculado por:

$$Re_D = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Os valores das constantes m , C e n da equação (D.1) estão tabeladas na literatura (Incropera, 2009).

- Número de Shewoord

Para o cálculo de Sh foi utilizada a expressão (D.1) substituindo Nu por Sh e Pr por Sc .