

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS

ESTUDO DO RESFRIAMENTO DE CARÇAÇAS DE FRANGO EM CHILLER DE IMERSÃO EM ÁGUA

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos

Orientador: Prof.º. Dr. João Borges Laurindo

BRUNO AUGUSTO MATTAR CARCIOFI

Engenheiro de Alimentos

Florianópolis, março de 2005.

*Aos meus pais, Marly e Antonio Carlos,
pelo amor incondicional.*

Agradecimentos

Ao professor João Borges Laurindo pela orientação e confiança ao longo destes anos de amizade e colaboração. Imprescindível em meu crescimento e aprendizado.

Aos professores Haiko Hense, Vivaldo Silveira Jr. e Sandra Ferreira, membros da banca examinadora.

Ao Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade.

A todos os professores e funcionários deste departamento, que sempre contribuíram.

Ao professores Nestor Roqueiro e Ricardo Machado, pelo apoio e incentivo.

Aos integrantes do Laboratório de Propriedades Físicas (PROFI) e do Laboratório de Controle de Processos (LCP). Pela amizade, pelas risadas e pela prestatividade.

Ao Alexandre Beló, ao Cristiano e ao Leozão, que ajudaram a “carregar o piano”.

A toda equipe do projeto UFSC/Perdigão, pela ajuda sempre que necessária.

Às dezenas de funcionários da Perdigão com quem tive contato durante a execução deste trabalho. À equipe da Engenharia, em especial: Eldo e Cícero; aos funcionários de Capinzal, em especial: Spiassi, Joel, Gilson e Bonato; ao pessoal da “laborantia” de Capinzal, em especial à amiga Poliana (valeu pela força).

A todos os amigos e colegas da pós-graduação.

Aos amigos, mesmo os de longe, pelos conselhos e incentivos.

Aos amigos e irmãos “da casa”: Aninha, Melissa, Liziane, Naiara, Nando, Fiu, Santi, Alemão, Tavares e Dani. Fundamentais neste trabalho e no dia-a-dia.

A minha família, pela doação, pelo incentivo, pela compreensão e pelo amor em todos os dias de minha vida.

A Deus, por sempre estar ao meu lado e por ter colocado todos estes em meu caminho.

*”Creio em mim mesmo.
Creio nos que trabalham comigo,
creio nos meus amigos e creio na minha família.
Creio que Deus me emprestará
tudo que necessito para triunfar,
contanto que eu me esforce para alcançar
com meios lícitos e honestos.
Creio nas orações e nunca fecharei
meus olhos para dormir,
sem pedir antes a devida orientação
a fim de ser paciente com os outros
e tolerante com os que
não acreditam no que eu acredito.
Creio que o triunfo é resultado de esforço inteligente,
que não depende da sorte, da magia,
de amigos, companheiros duvidosos ou de meu chefe.
Creio que tirarei da vida exatamente o que nela colocar.
Serei cauteloso quando tratar os outros,
como quero que eles sejam comigo.
Não caluniarei aqueles que não gosto.
Não diminuirei meu trabalho por ver
que os outros o fazem.
Prestarei o melhor serviço de que sou capaz,
porque jurei a mim mesmo triunfar na vida,
e sei que o triunfo é sempre resultado
do esforço consciente e eficaz.
Finalmente, perdoarei os que me ofendem,
porque compreendo que às vezes
ofendo os outros e necessito de perdão.”*

Mahatma Gandhi

Sumário

Resumo	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas	viii
Nomenclatura	ix
Introdução.....	1
1. Revisão Bibliográfica.....	6
1.1. Abate e Resfriamento de Frangos	6
1.2. O Sistema de Resfriamento das Carcaças (Chiller).....	11
1.3. Trabalhos Científicos	15
1.4. Legislação.....	16
1.5. A Transferência de Calor	19
1.6. A Transferência de Massa (Absorção de Água)	24
2. Metodologia	26
2.1. Estudo em Chiller Industrial	26
2.2. Estudo em Chiller Piloto.....	27

2.2.1. Determinação da Quantidade de Água Absorvida Pela Carcaça	31
2.2.1.1. Modelos Matemáticos para Absorção de Água pelas Carcaças Durante o Resfriamento.....	34
2.2.2. Influência do Nível de Agitação na Absorção de Água pela Carcaça.....	42
2.2.3. Influência da Pressão Hidrostática na Absorção de Água pela Carcaça.....	42
2.2.4. Determinação da Evolução da Temperatura Durante o Resfriamento das Carcaças	43
3. Resultados e Discussão	46
3.1. Estudo em Chiller Industrial	46
3.2. Estudo em Chiller Piloto.....	50
3.2.1. Quantidade de Água Absorvida pela Carcaça.....	50
3.2.1.1. Modelos Matemáticos para Absorção de Água pelas Carcaças Durante o Resfriamento.....	54
3.2.2. Influência do Nível de Agitação na Absorção de Água pela Carcaça.....	64
3.2.3. Influência da Pressão Hidrostática na Absorção de Água pela Carcaça.....	65
3.2.4. Evolução da Temperatura das Carcaças Durante o Resfriamento	67
Conclusões	77
Referências Bibliográficas	80

Resumo

O resfriamento industrial de carcaças de frango é normalmente efetuado em tanques de imersão em água (*chillers*). Nesta etapa, além da redução da temperatura, ocorre absorção de água pelas carcaças. Neste trabalho foram estudados diversos aspectos relacionados com a redução da temperatura e com a absorção de água por carcaças resfriadas por imersão, além de uma avaliação das condições operacionais dos *chillers* industriais. Estudos realizados em dois *chillers* piloto possibilitaram a avaliação da influência das variáveis de processo sobre a evolução da temperatura do centro do músculo peitoral e sobre o percentual de água absorvido durante o resfriamento por imersão. Os parâmetros de processo avaliados foram a temperatura da água de resfriamento (1°C e 15°C), a influência da agitação do meio de resfriamento (por bomba para a recirculação da água ou por injeção de ar comprimido) e a profundidade de imersão das carcaças em relação à superfície da água (180, 845 e 1470mm). Dois modelos matemáticos foram propostos para a representação da absorção de água pelas carcaças. Em um dos modelos propõe-se que resistência global à absorção de água é constante, enquanto no outro se propõe que essa resistência global aumenta com a quantidade de água absorvida. O segundo modelo foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Este incremento da resistência à absorção é atribuído ao mecanismo de penetração da água no tecido muscular. Inicialmente, os poros do tecido muscular estão livres, provocando altas taxas de absorção (mecanismo hidrodinâmico). Posteriormente, o mecanismo de transporte que controla a absorção de água é a migração interna da água absorvida (mecanismo pseudo-difusivo). Para maiores temperaturas, o aumento da pressão hidrostática e a agitação do meio de resfriamento proporcionaram uma maior taxa de absorção de água pelas carcaças. A agitação também proporcionou maior redução da temperatura das carcaças, pela redução da resistência convectiva à transferência de calor. No entanto, os resultados evidenciaram a dificuldade de se reduzir o tempo de resfriamento total para períodos inferiores a 60 minutos de imersão. Na análise dos *chillers* industriais, diversas possibilidades de melhorias foram identificadas, como na circulação da água de resfriamento, na distribuição de gelo, na distribuição e transporte das carcaças dentro do equipamento e na padronização das carcaças resfriadas.

Palavras-chave: frango, carcaças, resfriamento, água, absorção.

Abstract

The industrial cooling of chicken carcasses is usually performed by its immersion in tanks with cold water (chillers). In this stage, besides temperature reduction, carcasses absorb water. In this work several aspects related with carcasses cooling and water absorption in the immersion tanks were studied. An evaluation of the operational conditions of chillers industrial was made. Experimental essays were accomplished in two pilot chillers to evaluate the influence of the process variables on the temperature evolution of chicken breast and on water absorption during the cooling by immersion. The evaluated parameters were the temperature of cooling water (1°C and 15°C), water stirring procedure (by water circulation or air injection) and the carcasses immersion depth (180, 845 and 1470mm). Two mathematical models were proposed to represent the carcasses water absorption. In the first model it was proposed that global resistance to water absorption is constant, while in the second model it was proposed that this global resistance increases with the water absorption. The second model was the best to represent the experimental data. This increment on the resistance to water absorption was attributed to the water penetration mechanism in the muscular tissue. Initially, the muscular tissue pores are free, which promotes high absorption rates, controlled by a hydrodynamic mechanism. Afterwards, the transport mechanism that controls the water absorption is the internal migration of the absorbed water (pseudo-diffusive mechanism). Higher temperatures and stirring increased the rate of water absorption by the carcasses. This rate also was favored by the hydrostatics pressure, i.e., carcasses close to the surface had smaller water absorptions. Water stirring also provided larger cooling rates, by the reduction of the convective resistance to heat transfer. However, the results evidenced the difficulty to reduce the global time for cooling carcasses in periods lower than 60 minutes. In the analysing of industrial chillers several possibilities of improvement were identified, such as in the circulation of cooling water and ice distribution, in the distribution and transportation of carcasses inside the tank and in the weight standardization or carcasses.

Keywords: chicken, carcasses, cooling, water, absorption.

Lista de Figuras

Figura 1A: Fluxo produtivo representativo da empresa frigorífica de aves – Parte I	7
Figura 1B: Fluxo produtivo representativo da empresa frigorífica de aves – Parte II	8
Figura 1C: Fluxo produtivo representativo da empresa frigorífica de aves – Parte III	9
Figura 2: Fotos ilustrativas de <i>chillers</i> comercializados pela empresa Frigomaq: a) Detalhe da rosca sem fim; b) Detalhe mostrando o sistema de descarregamento das carcaças; c) Visão global do chiller. (Frigomaq[7]).....	14
Figura 3: Evaporadores do <i>Air Chiller</i> da empresa Stork Bronswerk, em ângulo especialmente projetado.	15
Figura 4: Passagem da água através do volume de controle, agregando massa ao frango.....	25
Figura 5: Representação esquemática do Tanque A. Tanque piloto usado nos ensaios de resfriamento das carcaças de frango.	29
Figura 6: Esquematização da vista superior do <i>chiller</i> industrial. Região de estagnação e caminho preferencial da água no equipamento.....	49
Figura 7: Percentual de absorção de água pelas carcaças de frango em função do tempo para água a 1°C, em 3 diferentes condições de agitação.	51
Figura 8: Percentual de absorção de água pelas carcaças de frango em função do tempo para água a 15°C, em 3 diferentes condições de agitação.	51
Figura 9: Curvas de absorção de água pelas carcaças de frango, quando não foi usada agitação da água no tanque. Experimentos realizados a 1°C e 15°C.	52

Figura 10: Curvas de absorção de água pelas carcaças de frango, em condições de agitação promovidas pela recirculação de água. Experimentos realizados a 1°C e 15°C.....	53
Figura 11: Curvas de absorção de água pelas carcaças de frango, em condições de agitação promovidas pela injeção de ar. Experimentos realizados a 1°C e 15°C.	53
Figura 12: Ajuste dos dados experimentais à Equação 19 (Modelo I), para agitação por bomba d'água e temperatura da água de resfriamento a 1°C.....	55
Figura 13: Interface gráfica do programa para determinação do perfil temporal de W e dos valores ótimos dos parâmetros K_m'' e β	56
Figura 14: Valores do segundo coeficiente de proporcionalidade para transferência de massa em função da quantidade de água absorvida pela carcaça de frango, nas 6 diferentes condições de operação.....	60
Figura 15: Gráfico da evolução da fração de água absorvida (W) em função do tempo. Valor de $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$, temperatura da água de 15°C sob agitação da bomba d'água...	61
Figura 16: Representação esquemática dos mecanismos que governam a absorção de água pelas carcaças.	63
Figura 17: Absorção de água pela carcaça sob diferentes condições do meio de resfriamento agitado pela injeção de ar comprimido.	64
Figura 18: Absorção de água pela carcaça em função do tempo para três diferentes condições de pressão hidrostática.	66
Figura 19: Evolução temporal da absorção de água pela carcaça em função da altura de coluna d'água.	67
Figura 20: Perfil de temporal das temperaturas T_c e T_s para água a 1°C em meio sem agitação.....	68

Figura 21: Perfil de temporal das temperaturas T_c e T_s para água a 1°C em meio agitado pela injeção de ar (vazão intermediária).....	68
Figura 22: Perfil de temporal das temperaturas T_c e T_s para água a 15°C em meio sem agitação.....	69
Figura 23: Ajuste dos dados experimentais por equações parabólicas, nos primeiros 10 minutos de imersão, para testes a 1°C	70
Figura 24: Ajuste dos dados experimentais por equações exponenciais, do décimo ao sexagésimo minuto, para testes a 1°C	70
Figura 26: Ajuste dos dados experimentais por equações parabólicas para ensaios a 15°C	71

Lista de Tabelas

Tabela 1: Produção mundial de carne de frango.....	2
Tabela 2: Produção e exportação de carne de frango entre os estados brasileiros.....	2
Tabela 3: Valores de K_m'' , β e do erro acumulado obtidos pelo programa computacional em diferentes passos no tempo. Dados experimentais a 1°C, agitado com bomba d'água	57
Tabela 4: Valores de K_m'' , β e do erro acumulado obtidos pelo programa computacional para as diferentes condições experimentais. Passo no tempo de 1s.....	58
Tabela 5: Valores de β e do erro acumulado obtidos pelo programa computacional para as diferentes condições experimentais, fixando-se $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$. Passo no tempo de 1s.	58
Tabela 6: Valores médios dos parâmetros q , a e b e dos coeficientes de correlação R^2 referentes às duas equações ajustadas, nas condições de operação a 1°C.....	72
Tabela 7: Valores médios dos parâmetros a e b e do coeficiente de correlação R^2 referentes à equação ajustada, nas condições de operação a 15°C	73
Tabela 8: Valores médios de Tc, em $t = 0$ e $t = 60 \text{ min}$, e da variação de Tc ocorrida neste intervalo, nas condições de operação a 1°C.	73
Tabela 9: Valores médios de Tc, em $t = 0$, $t = 10 \text{ min}$ e $t = 60 \text{ min}$, e da variação de Tc ocorrida neste intervalo, nas condições de operação a 15°C.....	74
Tabela 10: Valores médios de Tc, em $t = 0$ e $t = 60 \text{ min}$, e da variação de Tc ocorrida neste intervalo, nas condições de operação a 1°C, variando o tempo de injeção de ar.	75

Nomenclatura

a	- Coeficiente angular da equação da reta	-
A	- Área	(m ²)
b	- Coeficiente linear da equação da reta	-
Bi	- Número adimensional de Biot	-
h	- Coeficiente convectivo de transferência de calor	(W m ⁻² °C ⁻¹)
j	- Fluxo mássico de água	(g _{água} m ⁻² min ⁻¹)
k	- Condutividade térmica	(W m ⁻¹ °C ⁻¹)
K_m	- Coeficiente de transferência de massa	(m ⁻² min ⁻¹)
K_m'	- Segundo coeficiente de transferência de massa	(min ⁻¹)
K_m''	- Terceiro coeficiente de transferência de massa	(min ⁻¹)
L_c	- Comprimento característico do meio condutivo	(m)
m	- Massa do frango	(g _{frango})
m_0	- Massa inicial do frango (em $t = t_0$)	(g _{frango})
m_A	- Massa de água absorvida	(g _{água})
m_{Am}	- Massa máxima de água que pode ser absorvida	(g _{água})
n	- Direção paralela ao gradiente de temperatura	(m)
P	- Percentual de água absorvido em relação à massa inicial do frango	-
P_m	- Percentual máximo de água absorvido em relação à massa inicial do frango	-
q	- Taxa de transferência de calor	(W)
q''	- Fluxo de calor	(W m ⁻²)
R_{cond}	- Resistência à transferência de calor condutiva	(W °C ⁻¹)
R_{conv}	- Resistência à transferência de calor convectiva	(W °C ⁻¹)
t	- Tempo	(min)
t_0	- Tempo inicial	(min)
T_f	- Temperatura do fluido	(°C)
T_s	- Temperatura da superfície	(°C)
T_c	- Temperatura do centro do músculo peitoral da carcaça	(°C)
T_s	- Temperatura da superfície do músculo peitoral da carcaça	(°C)

W	- Fração mássica de água em relação à massa inicial do frango	$(g_{\text{água}} g_{\text{frango}}^{-1})$
W_m	- Fração mássica máxima de água em relação à massa inicial do frango	$(g_{\text{água}} g_{\text{frango}}^{-1})$
β	- Parâmetro do Segundo coeficiente de transferência de massa	$(g_{\text{frango}} g_{\text{água}}^{-1})$

Introdução

O consumo de carne de aves tem crescido quando comparado ao consumo das carnes bovinas e suínas, sendo estas três as mais comercializadas em termos mundiais. No cenário econômico atual, o Brasil tem grande destaque mundial na exportação e produção de carne de frango (cerca de 15% do total de frangos produzidos no planeta, como mostrado na Tabela 1). O Brasil atualmente é o maior exportador mundial de carne de frango.

O estado de Santa Catarina, segundo a ABEF – Associação Brasileira dos Exportadores de Frango (2005), como evidenciado na Tabela 2, é o maior exportador e o segundo maior produtor dentre os estados brasileiros. Neste estado estão sediadas as principais empresas frigoríficas brasileiras, dentre elas a Perdigão Agroindustrial S/A, segunda maior empresa do território nacional no ramo frigorífico avícola.

Desde os tempos mais remotos a preocupação com a escassez de alimentos acompanha a humanidade e, por conta disto, os homens vêm buscando formas de produzir alimentos em maior quantidade, com melhor qualidade e utilizando-se de menor espaço físico e menor tempo. Para isto, grandes investimentos têm sido aplicados nas áreas agrícola e pecuária no que tange a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias voltadas para o aumento da produtividade destes dois segmentos.

Através da parceria estabelecida junto à Universidade Federal de Santa Catarina, a Perdigão serviu como base para os estudos de otimização e inovação dentro de suas linhas industriais, parceria esta estabelecida com incentivo e fomento à pesquisa do governo brasileiro, através da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) – CT AGRO.

Tabela 1: Produção mundial de carne de frango.

PRODUÇÃO MUNDIAL DE CARNES DE FRANGOS PRINCIPAIS PAÍSES (1999 - 2004**)						
Mil toneladas						
ANO	EUA	CHINA	BRASIL	UE	MÉXICO	MUNDO
1999	13.367	8.550	5.526	6.614	1.784	47.554
2000	13.703	9.269	5.977	6.654	1.936	50.097
2001	14.033	9.278	6.736	6.822	2.067	51.765
2002	14.467	9.558	7.517	6.750	2.157	53.597
2003*	14.696	10.000	7.843	4.466	2.297	53.913
2004**	15.226	10.000	8.235	6.695	2.460	55.622
Fonte: USDA/ABEF		* Preliminar ** Previsão				

Tabela 2: Produção e exportação de carne de frango entre os estados brasileiros.

ESTADOS PRODUTORES E EXPORTADORES 2003				
ESTADOS	Cabeças	Partic.	Exportação	Partic.
	Abatidas c/SIF	%	Tons.	%
PARANÁ	813.373.908	21,90	496.746	25,8
SANTA CATARINA	648.752.226	17,47	612.524	31,9
RIO GRANDE DO SUL	602.214.275	16,22	547.963	28,5
SÃO PAULO	467.215.143	12,58	63.923	3,3
MINAS GERAIS	233.044.561	6,27	52.687	2,7
GOIÁS	138.022.314	3,72	59.038	3,1
MATO GROSSO DO SUL	112.086.545	3,02	42.949	2,2
MATO GROSSO	66.331.766	1,79	39.004	2,1
TOTAL GERAL	3.713.685.074	100,00	1.922.042*	100
* Não estão computadas as exportações de industrializados.			Fonte: ABEF SECEX	

Dentro da indústria frigorífica, na linha de abate e processamento de aves, destaca-se a operação unitária de resfriamento das carcaças (ou pré-resfriamento, como é classificado pelo Ministério da Agricultura e do Abastecimento – Secretaria de Defesa Agropecuária (2004)) a qual é considerada como uma das mais importantes etapas, senão a mais importante delas.

É nesta etapa que a ave, após o abate, escaldagem, depenagem e evisceração, é submetida a uma redução na sua temperatura em cerca de 35°C, medida no centro do músculo peitoral.

Um adequado processo de resfriamento é fundamental para a preservação da qualidade das carcaças. Segundo Dinçer (1997), a preservação é a mais importante das etapas tecnológicas no processamento de alimentos, influenciando a vida de prateleira do produto, através da manutenção de suas propriedades microbiológicas, físico-químicas e sensoriais.

Neste caso a preservação é obtida através da utilização do “frio”, que em outras palavras é a remoção de energia térmica do produto, com a finalidade de manter sua temperatura em valores próximos a 0°C. Nesta temperatura as velocidades das reações químicas, das reações enzimáticas e do crescimento de microorganismos patogênicos são bastante reduzidas.

Em um mercado altamente acirrado, qualquer fator que leve à redução do custo produtivo é visto como um diferencial competitivo. Sabendo que o consumo energético é o responsável por grande parcela destes custos, e que por sua vez a refrigeração representa grande parte desse consumo, todo esforço para otimizar os processos que empregam o “frio” pode ser relevante.

O resfriamento das carcaças logo após o abate e evisceração é uma exigência da legislação nacional vigente (regulamentada através do Ministério da Agricultura e do Abastecimento – Secretaria de Defesa Agropecuária (2004)) e também dos clientes internacionais, sendo estes últimos, em geral, mais rigorosos ainda nos seus índices de controle (temperatura das carcaças e quantidade de água por elas absorvida).

O resfriamento das carcaças pela indústria é um “problema” de engenharia de grande complexidade. A matéria-prima (carcaças de frango) não possui geometria bem definida, possui grande variabilidade de peso e dimensões, tem características específicas para machos e fêmeas, apresenta diferenças entre raças, tem composição química variável, entre outras. Devido ao mecanismo de transporte das carcaças dentro dos equipamentos de processo atualmente existentes, fica muito difícil se determinar o tempo de residência de uma carcaça nos tanques de resfriamento com água (*chiller*).

Desde modo, o resfriamento das carcaças em *chillers* de água é um complexo processo de transferência simultânea de calor e massa, que deve ser controlado para garantir a qualidade dos produtos resfriados.

Objetivo Geral

O objetivo central do presente trabalho foi compreender os fenômenos simultâneos de transferência de calor e de absorção de água pelas carcaças nos *chillers*. Com estas informações e com o conhecimento das condições de processo, procurou-se encontrar soluções para essa importante etapa do processamento industrial de frangos.

Objetivos Específicos

- a) Análise do processo de resfriamento atualmente utilizado pelas indústrias brasileiras, tendo como base as unidades industriais da Perdigão Agroindustrial S/A;
- b) Observar, medir e avaliar a eficiência dos *chillers*, equipamento responsável pela realização da operação unitária de resfriamento das carcaças;
- c) Avaliar a influência das variáveis de processo: massa e dimensões das carcaças, condições de operação do equipamento, velocidade da linha de

abate, tempo de residência, temperatura do meio de resfriamento e agitação do meio de resfriamento;

- d) Medir e quantificar a influência da temperatura da água utilizada como meio de resfriamento na velocidade de redução da temperatura das carcaças;
- e) Medir e quantificar a influência da temperatura da água utilizada como meio de resfriamento na velocidade e na quantidade relativa de água absorvida pelas carcaças;
- f) Medir e quantificar a influência da agitação da água utilizada como meio de resfriamento, bem como do agente utilizado para provocar essa agitação na velocidade de redução da temperatura das carcaças;
- g) Medir e quantificar a influência da agitação da água utilizada como meio de resfriamento, bem como do agente utilizado para provocar essa agitação na quantidade relativa de água absorvida pelas carcaças;
- h) Compreender os fenômenos de transferência de calor e de massa que ocorrem nesta operação unitária;
- i) Propor modelos matemáticos que descrevam a evolução temporal da temperatura do centro do peito da ave e a quantidade percentual de água absorvida pela mesma.

1. Revisão Bibliográfica

1.1. Abate e Resfriamento de Frangos

Apresenta-se uma breve descrição do processo da linha de abate e resfriamento de frango.

Segundo a definição para a indústria frigorífica, dada por Sakamoto (1999), a produção pode ser horizontalizada, quando a indústria somente processa a matéria-prima, isto é, o frango de corte, ou apresentar-se na forma verticalizada, quando a empresa participa desde a criação das matrizes para produção de ovos até a industrialização do produto. Este último é o caso específico da empresa parceira deste trabalho, a Perdigão Agroindustrial S/A.

As diversas etapas que envolvem a industrialização dos frangos são apresentadas nas Figuras 1A, 1B e 1C, que representam um fluxograma esquemático desta indústria.

Sucintamente, as etapas que compõem este fluxo são descritas a seguir.

A 1ª etapa dentro das instalações do abatedouro acontece no **galpão de espera**, onde os caminhões que transportam os frangos ficam aguardando pela disponibilidade para prosseguirem à próxima etapa, servindo como meio de redução de estresse das aves. Neste lugar, as aves são tratadas através de um sistema de ventiladores, que têm por finalidade diminuir a mortalidade no transporte/espera, bem como minimizar a desidratação. Em algumas unidades industriais são utilizados aspersores de água, para maior “conforto” das aves.

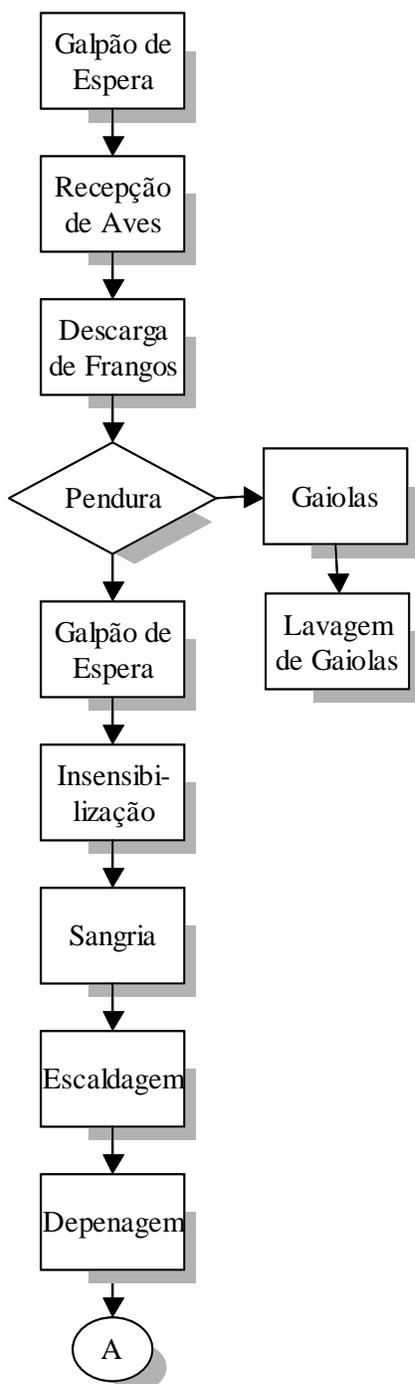


Figura 1A: Fluxo produtivo representativo da empresa frigorífica de aves – Parte I

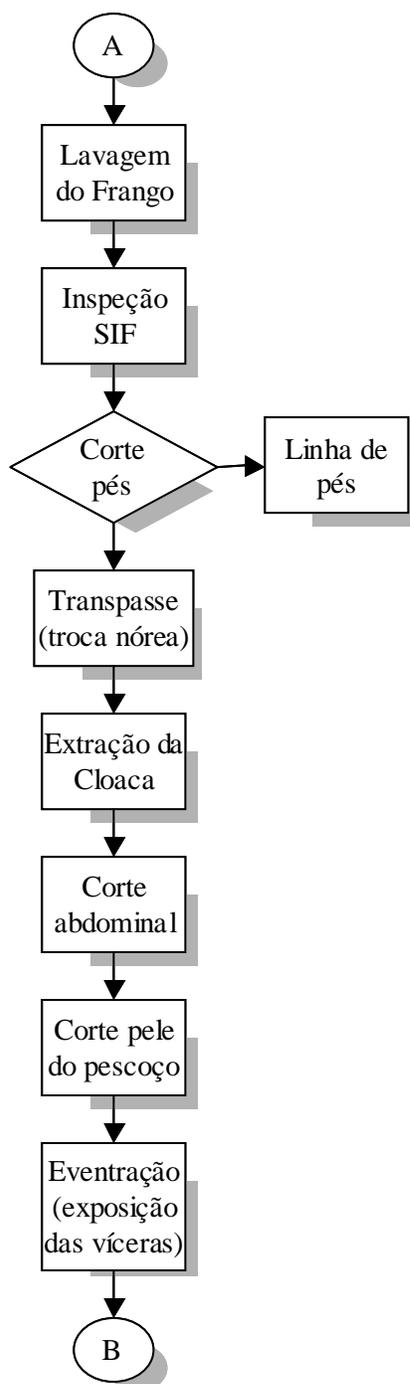


Figura 1B: Fluxo produtivo representativo da empresa frigorífica de aves – Parte II

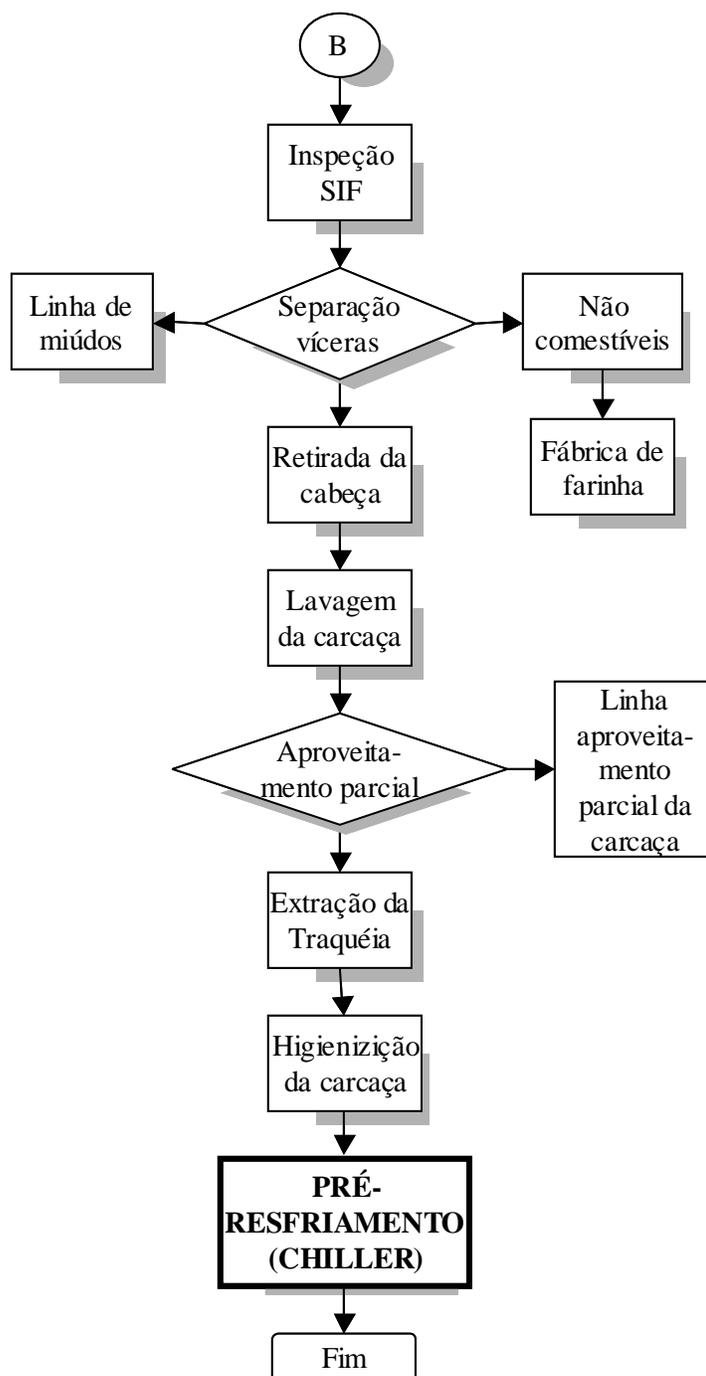


Figura 1C: Fluxo produtivo representativo da empresa frigorífica de aves – Parte III

Seguindo para a **recepção das aves**, tem-se a **descarga de frangos**, que é a retirada das gaiolas dos caminhões. As mesmas são colocadas próximas à “**pendura**”. Esta etapa é a colocação dos frangos em nóreas, pendurados pelos pés, quando são transportados ao interior do abatedouro para o processamento. As **gaiolas** seguem para a **lavagem**.

Dentro do abatedouro as aves inicialmente passam pela **insensibilização** por meio de descarga elétrica. Ao passarem por uma cuba preenchida com água, a primeira parte do frango, geralmente a cabeça, que entra em contato com a água compõe o circuito elétrico, provocando a passagem de corrente elétrica pelo animal. O objetivo é diminuir o índice de descarte em virtude de hemorragias internas causadas por quebra de alguma parte do corpo da ave, devido ao fato destas se debaterem ao serem encaminhadas à **sangria** e após esta etapa.

Na sangria, é efetuado um corte no pescoço do frango, podendo ser de forma mecânica ou manual. A sangria manual muitas vezes é exigência para produtos destinados à exportação aos países árabes, seguindo assim seus conceitos religiosos.

As duas etapas subseqüentes têm por intuito remover as penas do frango. A **escaldagem** é o processo no qual a ave passa imersa em um tanque com água quente (geralmente entre 50°C e 70°C), facilitando a **depenagem**, etapa onde as penas são retiradas mecanicamente, normalmente através de paletas (“dedos”) giratórias de borracha.

A **lavagem** se destina a higienização das carcaças no intuito de diminuir a carga microbiana superficial. Os agentes do Serviço de Inspeção Federal (SIF) fazem a **inspeção da carcaça**. Após a sua liberação, há o **corte dos pés**, que são classificados e destinados para exportação ou fábrica de farinhas.

Através do **transpasse** é feita a troca de nóreas, com as carcaças seguindo para uma seqüência de operações, chamada de evisceração, que é composta pela **extração da cloaca**, o **corte abdominal**, o **corte da pele do pescoço**, a **eventração** (exposição das vísceras), outra **inspeção sanitária** realizada pelo SIF, a **separação das vísceras**

em comestíveis e não comestíveis (o coração, a moela e o fígado seguem para industrialização enquanto as demais vísceras vão para a fábrica de farinhas), a **retirada da cabeça**, a **lavagem das carcaças** e a **extração da traquéia**.

Submetida a uma **higienização**, as carcaças seguem, enfim, ao **pré-resfriamento** no sistema de *Chiller*.

Ao sair do *chiller*, as carcaças podem ser direcionadas para a linha de frango inteiro ou de cortes. Na linha de inteiros, as carcaças podem ser ou não acrescidas dos miúdos e embaladas, seguindo para as câmaras de congelamento e estocagem, onde ficam até serem expedidas aos clientes.

Carcaças destinadas para a linha de cortes passam por outras operações, até serem embaladas como coxa, sobrecoxa, peito, asa, entre outros. Estes cortes são congelados para posterior comercialização.

Como já citado anteriormente, este processamento não é universal, porém serve para exemplificar o fluxo produtivo da indústria frigorífica de processamento de frangos.

1.2. O Sistema de Resfriamento das Carcaças (*Chiller*)

As indústrias brasileiras, quase na sua totalidade, resfriam as aves removendo o calor em tanques de inox preenchidos com água e gelo, onde as carcaças são colocadas e transportadas por um sistema de rosca sem fim. Este equipamento é conhecido como “*chiller*”.

Geralmente são utilizados acoplados dois destes tanques de resfriamento (“*pré-chiller* de lavagem” e “*chiller* resfriador”), porém algumas plantas industriais possuem até três destes tanques em série. Na Figura 2 encontram-se fotos ilustrativas do equipamento de *chiller* comumente utilizado.

Os *Chillers* operam com renovação constante da água de resfriamento que circula em contra corrente ao sentido das aves, as quais são conduzidas pela rosca sem fim de uma extremidade a outra do equipamento. Na entrada, os frangos são derrubados das nóreas no início do pré-*chiller*. Tanto a passagem de um tanque para outro, como a saída do frango no último estágio, ocorre através de “pás” presas à última volta da rosca.

Ao longo do equipamento existem pontos de distribuição de gelo, gerado em salas especialmente projetadas e equipadas para isto, podendo ocorrer em um ou mais pontos ou até estar ausente em alguns tanques. É observado em alguns equipamentos, o encamisamento do *chiller*, sendo a camisa preenchida por fluidos refrigerantes como o etileno-glicol ou a amônia.

O tamanho dos equipamentos varia de acordo com a disponibilidade de espaço físico na planta industrial, bem como com a necessidade de resfriamento de frangos dada pela velocidade da linha de abate.

Também pode fazer parte destes equipamentos um sistema de injeção de ar (conhecido industrialmente como borbulhamento), composto de entradas (bico injetores) na parte inferior do *chiller*, acoplados a uma linha de ar comprimido. Estes bicos permitem a entrada do ar (que deve ser previamente tratado e seguir padrões pré-estabelecidos pela legislação vigente), promovendo uma maior agitação da água. Isso pode promover um aumento nas taxas de resfriamento e de absorção de água pelas carcaças. Assim, sua utilização deve estar cercada de cuidados.

Nos Estados Unidos, também se utiliza *chillers* de imersão em água para resfriamento de carcaças de aves em grande parte das indústrias. Entretanto, existem processos alternativos, os quais utilizam o ar frio, ao invés da água, como meio de resfriamento (são os chamados “*air chillers*”).

Ao final do ano de 2003 a empresa Stork Bronswerk, uma das principais empresas mundiais do ramo de equipamentos para frigorífico de aves, instalou seu primeiro túnel de resfriamento por corrente de ar na Baiada Poultry Limited, empresa de processamento de aves situada no subúrbio de Pendle Hill, em Sydney, na Austrália

(AVICULTURA INDUSTRIAL, 2004). A Figura 3 apresenta foto dos evaporadores colocados em posição inclinada (especialmente calculada), visando aumentar a eficiência do resfriamento.

Este processo desenvolvido pela Stork é misto, começando com o ciclo de resfriamento por banho de imersão, seguido por outro de corrente de ar em linha, que leva a temperatura interna do produto até o nível desejado.

Em alguns frigoríficos brasileiros, as aves também são resfriadas em câmaras frigoríficas, utilizando-se então do ar como meio de resfriamento. É o caso, por exemplo, do resfriamento de perus na unidade industrial da Perdigão em Carambeí-PR. Porém, vale ressaltar que são exemplos pontuais.

O sistema de resfriamento com ar é mais adequado do ponto de vista sanitário, pois a água que envolve as carcaças normalmente possui uma elevada carga microbiana proveniente da própria ave, podendo levar a uma contaminação da carne. Em contra partida, o processo de resfriamento com água é mais rápido, mais eficiente e mais viável economicamente. Segundo o manual da ASHRAE (2002), *chillers* de imersão (utilização da água como meio de resfriamento) são mais rápidos que *chillers* a ar, além de impedirem a desidratação das carcaças. Durante a imersão, ocorre absorção de água pelas carcaças.

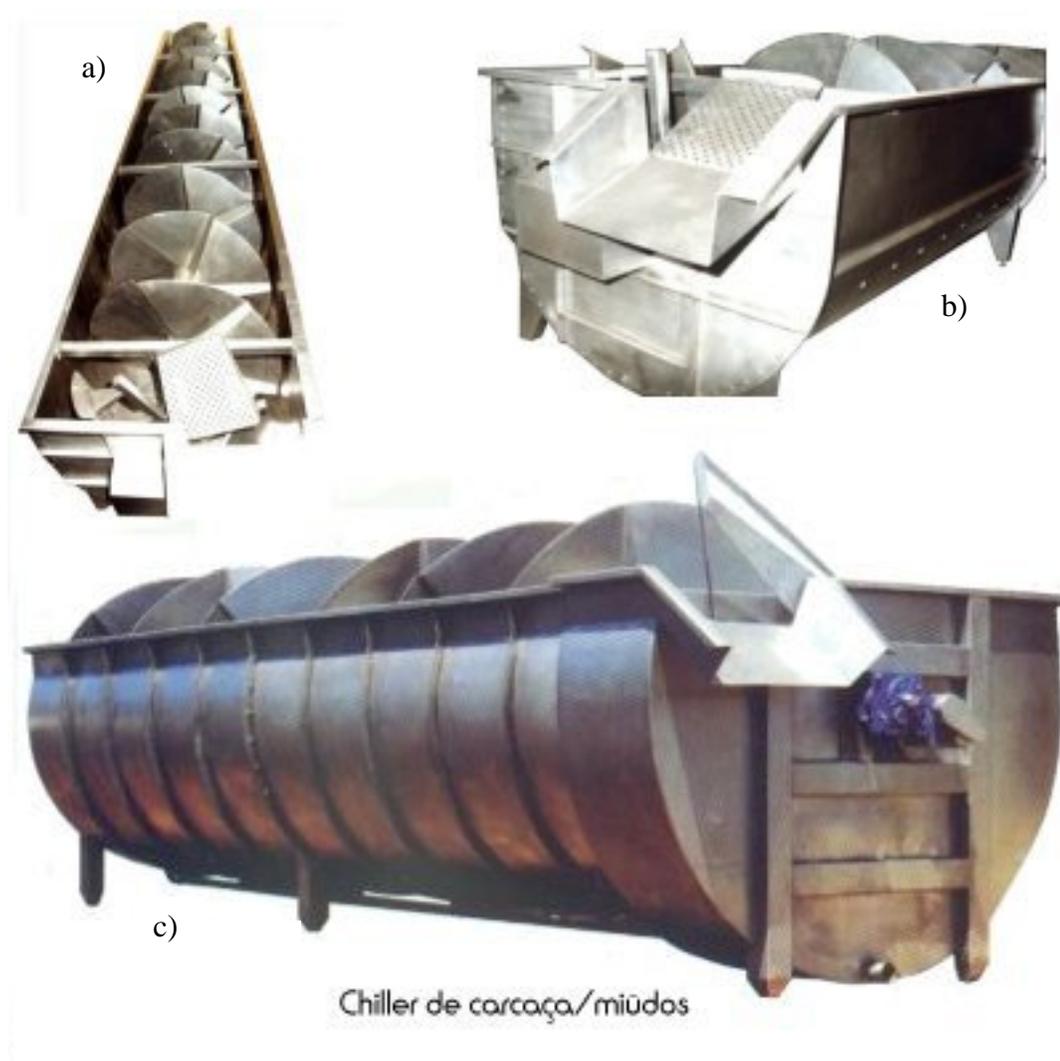


Figura 2: Fotos ilustrativas de *chillers* comercializados pela empresa Frigomaq: a) Detalhe da rosca sem fim; b) Detalhe mostrando o sistema de descarregamento das carcaças; c) Visão global do *chiller*. (FRIGOM AQ, 2004).



Figura 3: Evaporadores do *Air Chiller* da empresa Stork Bronswerk, em ângulo especialmente projetado.

1.3. Trabalhos Científicos Sobre Resfriamento de Carcaças de Frango

Não foram encontrados trabalhos que tratem especificamente sobre o resfriamento das carcaças de frango em *chillers*, exceção feita a uma dissertação de Mestrado defendida, na Faculdade de Engenharia de Alimentos da Unicamp, por Neves Filho (1978).

Este trabalho foi dividido em três frentes: resfriamento, contagem microbiológica e alteração de peso (absorção de água). Aqui irá nos importar apenas o que se refere ao resfriamento e à absorção de água pelas carcaças.

Neves Filho (1978) estudou a relação entre a vazão de água empregada no resfriamento, relacionando litros de água utilizados por quilograma de carcaça de frango, com a temperatura final do centro geométrico do peito da ave. O autor indicou valores (que melhor ajustaram-se aos seus dados) para as propriedades termofísicas da carne de frango, dentre as apresentadas pela literatura: densidade (massa específica) de 1070 kg.m^{-3} , calor específico de $3,34 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ e condutividade térmica de $0,42 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

Entretanto, vale ressaltar que estes são valores que podem sofrer variações. Por exemplo, eles são influenciados pela composição da amostra. Logo, aves de diferentes origens genéticas ou criadas em condições distintas devem possuir composições centesimais e características físicas diferentes, assim ocorrendo com as suas propriedades termofísicas.

No mesmo trabalho é mostrado que para frangos de 1,2 kg, razões de 1,6 litros/kg e 2,1 litros/kg conduziram praticamente à mesma temperatura (decréscimo de 40°C até 10°C), mas razões de 4 litros/kg tiveram uma redução maior (decréscimo de 40°C até 7°C) para um mesmo intervalo de tempo. Ainda tratando-se do resfriamento, foi concluído no referido trabalho, sobre a importância da manutenção de menores temperaturas da água no último estágio para obtenção de melhores resultados.

Quando se trata da absorção de água pelo frango, Neves Filho (1978) analisa a influência do tempo de respingo (gotejamento), após o *chiller*, no percentual de água absorvida pelas carcaças entre o fim da evisceração e o fim do resfriamento. Fica demonstrado que para maiores tempos de respingo a quantidade de água que é absorvida diminui.

1.4. Legislação para Indústria Frigorífica

Algumas normas e definições estabelecidas pelo Ministério da Agricultura e do Abastecimento – Secretaria de Defesa Agropecuária (2004) regulamentam as condições de operação para o processo de “pré-resfriamento” das carcaças. Estas são sucintamente apresentadas a seguir.

É definido como **pré-resfriamento** o processo de abaixamento da temperatura das carcaças de aves, imediatamente após as etapas de evisceração e lavagem, realizado por sistema de imersão em água gelada e/ou água e gelo ou passagem por túnel de resfriamento, obedecidos aos respectivos critérios técnicos específicos.

Durante o texto desta dissertação é utilizado o termo resfriamento em lugar ao termo pré-resfriamento, porém mantendo o mesmo sentido definido para o segundo.

Ao termo **carcaça** entende-se pelo corpo inteiro de uma ave após insensibilização ou não, sangria, depenagem e evisceração, onde papo, traquéia, esôfago, intestinos, cloaca, baço, órgãos reprodutores e pulmões tenham sido removidos. É facultativa a retirada dos rins, pés, pescoço e cabeça.

Entende-se por índice de **absorção** o percentual de água adquirida pelas carcaças de aves durante o processo de abate e demais operações tecnológicas, principalmente no sistema de pré-resfriamento por imersão, uma vez que uma pequena absorção percentual de água ocorre durante a escaldagem, depenagem e diversas lavagens na linha de evisceração.

O sistema de **controle** da absorção de água em carcaças de aves submetidas ao pré-resfriamento por imersão deve ser eficiente e efetivo, sem margem a qualquer prejuízo na qualidade do produto final. Os métodos oficiais para o referido controle são o **Método de Controle Interno**, realizado durante o processamento industrial pela Inspeção Federal local, e o **Método do Gotejamento** para controle de absorção de água em carcaças congeladas de aves submetidas ao pré-resfriamento por imersão.

As normas citam que a quantidade de água absorvida durante o pré-resfriamento por imersão está relacionada principalmente com a temperatura da água dos resfriadores, tempo de permanência no sistema, tipo de corte abdominal, injeção de ar no sistema (borbulhamento) e outros fatores menos significativos.

Dentro da indústria, na prática, a absorção (percentual de água absorvido) é medida tomando-se a massa da ave na entrada e logo após a saída do sistema de *chillers*.

A diferença positiva averiguada na massa das carcaças entre a saída e a entrada é calculada e indicada de maneira percentual, sobre o valor da massa na entrada. Segundo o Ministério, a quantidade de água determinada por este método exprime-se

em percentagem da massa total da carcaça de ave no limite máximo de 8% da sua massa.

O Método do Gotejamento (ou “drip test”) é utilizado para determinar a quantidade de água resultante do descongelamento de carcaças congeladas. Se a quantidade de água resultante expressa em percentagem da massa da carcaça, com todas os miúdos/partes comestíveis na embalagem, ultrapassar o valor limite de 6%, considera-se que a carcaça absorveu um excesso de água durante o pré-resfriamento por imersão em água.

Para obtenção deste percentual, a carcaça congelada (com ou sem os miúdos/partes comestíveis) é descongelada em condições controladas, que permitam determinar a massa de água perdida. Esta massa de água é indicada percentualmente em relação à massa da carcaça da ave anterior ao descongelamento.

O processo de pré-resfriamento, de acordo com esta legislação, poderá ser efetuado através de: aspersão de água gelada, imersão em água por resfriadores contínuos tipo rosca sem fim (*chiller*) ou resfriamento por ar (câmaras frigoríficas).

Outros processos devem ser previamente aprovados pelo DIPOA – Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal, da Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, do Ministério da Agricultura e do Abastecimento.

Especificamente para o sistema de pré-resfriamento por imersão, é definido que a renovação de água ou água gelada dos resfriadores contínuos tipo rosca sem fim, durante sua operação, deverá ser constante e em sentido contrário à movimentação das carcaças (contracorrente), na proporção mínima de 1,5 litros por carcaça no primeiro estágio (“pré-*chiller* de lavagem”) e 1,0 litro no último estágio (“*chiller* resfriador”).

A temperatura da água residente, medida nos pontos de entrada e saída das carcaças do sistema de *chillers*, não deve ser superior a 16°C e 4°C, respectivamente, no pré-*chiller* de lavagem (primeiro estágio) e último estágio do *chiller* resfriador,

observando-se o tempo máximo de permanência das carcaças no primeiro, de trinta minutos.

Com relação às aves, a temperatura das carcaças no final do processo de pré-resfriamento deverá ser igual ou inferior a 7°C (temperatura esta medida, como citado anteriormente, no centro do peito). Toleram-se a temperatura de 10°C, para as carcaças destinadas ao congelamento imediato. Porém, estes padrões da legislação nacional não atendem as exigências de clientes internacionais, os quais determinam que a temperatura do peito deve ser igual ou inferior a 4°C ao final do *chiller*.

Estes importadores também podem ter, em alguns casos, parâmetros diferenciados para a absorção de água. Por exemplo, existem clientes europeus para os quais o “drip test” não deve apresentar valores superiores a 4% ou 5%.

1.5. Transferência de Calor no Resfriamento das Carcaças

Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos processos térmicos sofridos pelas carcaças de frango durante o processamento industrial.

Ao chegar ao frigorífico, os frangos, que são animais de sangue quente, possuem sua temperatura corporal pouco abaixo de 40°C. Poucos minutos após o abate, as suas carcaças já estão submetidas ao processo de escaldagem, permanecendo imersas em água quente (entre 55°C e 70°C) pelo intervalo de cerca de um minuto.

Entre a saída da escaldagem, último momento onde o frango ganha calor de maneira significativa, e a entrada do sistema de *chiller*, decorre um intervalo de tempo inferior a 15 minutos, onde a ave irá percorrer, nas nóreas, o sistema de evisceração.

As condições de operação do tanque de escaldagem e o intervalo de tempo citado são determinantes na temperatura no centro geométrico do músculo peitoral do frango (temperatura de controle) na entrada do *chiller*. O tamanho das carcaças também influenciam neste valor.

Como já vimos anteriormente, a legislação determina como parâmetro de controle da eficiência do processo de resfriamento das carcaças, o valor da temperatura do centro do peito.

Dentro das condições normais de trabalho de uma planta industrial de abate de frangos, considerando as carcaças com massa entre 1500 g e 2500 g, pode-se ter como uma boa estimativa considerar a temperatura no centro do peito, na entrada do sistema de *chiller*, com valor médio de 40°C, com a grande maioria das aves dentro do intervalo de 38°C a 42°C (LAURINDO, HENSE e CARCIOFI, 2003).

Quando chega ao primeiro estágio do sistema de *chiller* (*pré-chiller*), a maioria das carcaças possuem a temperatura da superfície abaixo de 25°C. Mesmo sendo bem inferior à temperatura do centro do peito, o valor é suficiente para estabelecer uma diferença de temperatura significativa com o meio que a cerca, pois o primeiro tanque possui a temperatura da água inferior a 16°C, conforme exigência da legislação. Esta configuração estabelece a diferença de potencial necessária à transferência de calor.

O sistema caracterizado por dois diferentes meios, um sólido (carcaça de frango) envolto por um fluido (água do tanque de imersão), com diferentes temperaturas, induz à transferência de calor convectiva, onde o fluido em movimento irá trocar calor com a superfície do sólido. Tal afirmação está baseada na definição de transferência de calor por convecção (INCROPERA e DEWITT, 1998).

Quanto maior a movimentação do fluido ou maior a área de contato entre os dois meios, mais fácil será o processo de troca de calor. A força motriz (diferença de temperatura entre os meios) também causa aumento da transferência de calor quando incrementado o seu valor, conforme mostrado pela Lei de Newton do Resfriamento, Equação 1.

$$q = A h (T_s - T_f) \quad (1)$$

Nela pode-se observar que a taxa de transferência de calor (q) é diretamente proporcional à área de troca térmica (A), à diferença entre a temperatura do fluido (T_f) e a temperatura da superfície (T_s) e ao coeficiente de transferência de calor convectivo (h).

Este último é uma constante de proporcionalidade dependente das condições da camada limite hidrodinâmica, as quais, por sua vez, são influenciadas pela geometria do sistema, pelo escoamento do fluido e pelas propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

Enquanto imersas no pré-chiller, as carcaças de frango irão perder calor por convecção para o meio, porém a taxa de transferência de calor torna-se cada vez menor, tendendo a zero, devido à redução da temperatura da superfície da ave e, por conseguinte, diminuição da diferença de temperatura, também tendendo a zero. Assim, as carcaças devem ser passadas ao tanque seguinte, onde, pela legislação e para garantir a continuidade do processo de resfriamento, a temperatura da água deve ser, obrigatoriamente, inferior àquela do tanque anterior.

Para que a energia possa ser removida do interior das carcaças, o calor deve “atravessar” a carne do peito e a pele que recobre a superfície das mesmas, para então ser retirado pelo mecanismo convectivo.

Assim, deve-se analisar também a transferência de calor por condução que ocorre no interior do peito das carcaças.

Existindo um gradiente de temperatura em um meio qualquer, dar-se-á a condução de calor no sentido da maior para a menor temperatura. Este fluxo de calor é dado pela Lei de Fourier (INCROPERA e DEWITT, 1998), Equação 2.

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

Nesta equação, o fluxo de calor é dado por q'' , T representa a temperatura, enquanto n é a direção normal à superfície isotérmica e, por fim, k representa a constante de proporcionalidade conhecida como condutividade térmica, a qual é propriedade do material, sofrendo influência da temperatura na qual o mesmo se encontra.

Um estudo completo do resfriamento de carcaças de frango só é possível quando analisados estes dois fenômenos (condução e convecção de calor) conjuntamente.

Particularmente, pode ser coerente a consideração de apenas um destes fenômenos, desprezando-se o outro. Tal consideração pode ser embasada em uma análise de ordem de grandeza das resistências à transferência de calor por condução e por convecção.

Em casos onde a espessura do sólido é muito pequena ou a sua condutividade térmica é muito elevada, o gradiente de temperatura no interior do sólido torna-se muito pequeno. Se, acoplado a isto, existe um baixo coeficiente de transferência de calor convectivo, passa-se a ter como “gargalo” a transferência de calor por convecção. Neste caso, pode ser dito que a resistência à transferência de calor encontra-se quase que totalmente na etapa convectiva do processo.

O inverso também pode ocorrer, em casos onde o meio está bem agitado e valores elevados do coeficiente de transferência de calor convectivo são notados. E se, na parte interna do sólido, a condutividade térmica é muito baixa ou a espessura deste muito grande, os gradientes de temperatura estabelecidos são acentuados. Estas duas condições somadas caracterizam uma maior resistência à transferência de calor por condução, permitindo desprezar a contribuição da resistência convectiva.

Uma maneira de sistematizar esta comparação entre as resistências e tornar esta análise não subjetiva, é recorrer à utilização do número de Biot (Bi).

Este número adimensional faz a comparação entre a resistência interna (condutiva) e a externa (convectiva). O número de Biot fornece uma medida da relação

entre a queda de temperatura ao longo do sólido e a diferença das temperaturas entre sua superfície e do fluido. Este também pode ser interpretado como uma razão entre resistências térmicas. Sendo dado pela Equação 3.

$$Bi \equiv \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{L_c/kA}{1/hA} = \frac{hL_c}{k} \quad (3)$$

Quando a resistência condutiva é muito maior que a resistência convectiva, Bi é muito maior que 1 ($Bi \gg 1$). Casos onde o gradiente interno ao sólido é mínimo e a resistência convectiva é predominante, Bi é fracionário, muito menor que 1 ($Bi \ll 1$). Nos casos onde Bi é próximo à unidade, nenhuma das duas resistências deve ser desprezada.

Nas análises do resfriamento das carcaças, será importante determinar-se a relatividade entre as duas resistências térmicas.

A resistência condutiva no tecido animal normalmente é grande, pois as carnes possuem baixas condutividades térmicas (SINGH e HELDMAN, 1993). Obviamente, não se pode alterar a espessura do peito de frango e nem mesmo as suas propriedades termofísicas. Entretanto, a resistência convectiva pode ser modificada, alterando-se a agitação do meio de resfriamento, de modo a se aumentar o coeficiente de transferência de calor convectivo (h). Deste modo, eleva-se o número de Biot.

1.6. Transferência de Massa (Absorção de Água pelas Carcaças)

É sabido que as carcaças de frango absorvem água quando imersas no *chiller*. Porém, no ambiente industrial, muitas são as dúvidas com relação a como este ganho de massa ocorre, e quais são os fatores que realmente o influenciam. Em geral, é

observada a influência da temperatura da água e da agitação do meio (por injeção de ar, por exemplo).

A legislação é clara quando regulamenta a absorção de água, impondo limites que visam defender os interesses dos consumidores. Ela se manifesta exigindo dois tipos de controle: o percentual de água absorvido no *chiller* e o “drip test”, apresentados anteriormente.

Diferentemente da transferência de calor, onde o interesse é voltado para o controle da temperatura do centro do músculo peitoral, na transferência de massa busca-se controlar a quantidade total de água absorvida, não importando a maneira como ela se distribui internamente nas carcaças. Em outras palavras, negligencia-se a existência de gradientes de concentração de água nas carcaças.

Pode-se considerar toda a superfície do frango como uma fronteira, a qual a água deverá transpor para passar a fazer parte da massa de água absorvida pelas carcaças. O esquema simplificado, apresentado na Figura 4, ilustra o problema.

Não foram encontrados trabalhos na literatura tratando da dinâmica de absorção de água pelas carcaças durante o resfriamento por imersão.

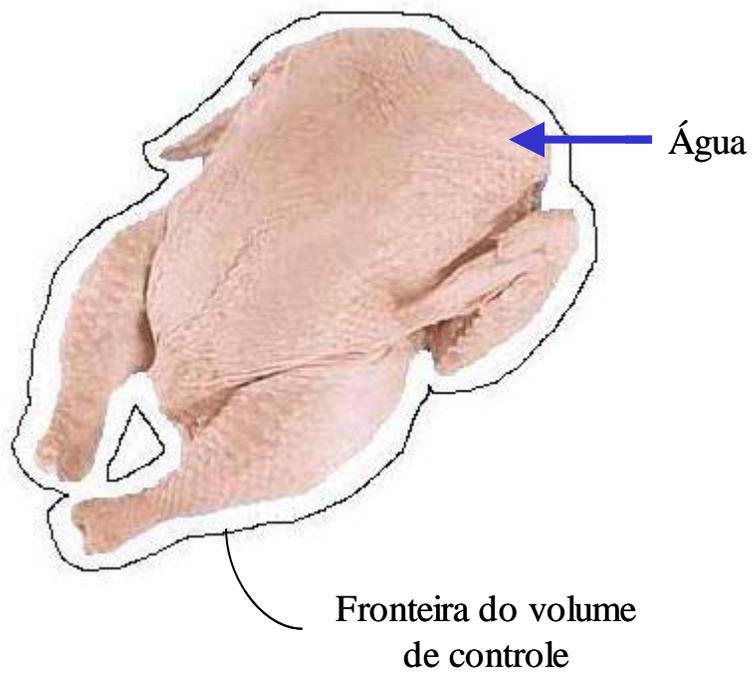


Figura 4: Passagem da água através do volume de controle, agregando massa ao frango.

2. Materiais e Métodos

A obtenção de dados de resfriamento de carcaças de frango foi realizada diretamente nas unidades industriais (*chillers* industriais) e em unidades piloto (*chiller* piloto) especialmente montadas para este objetivo. Estas unidades piloto permitiram a realização de ensaios que não poderiam ser efetuados nos *chillers* industriais. Os dois sistemas são descritos a seguir.

2.1. Estudo em *Chiller* Industrial

O primeiro passo dentro da execução deste trabalho foi a averiguação dos *Chillers* Industriais junto às unidades fabris. Durante o intervalo de seis meses realizaram-se viagens a todas as unidades do grupo Perdigão, responsáveis pelo abate de aves: Marau e Serafina Corrêa no Rio Grande do Sul, Videira e Capinzal em Santa Catarina, Carambeí no Paraná e Rio Verde em Goiás.

Em cada unidade, os sistemas de resfriamento de carcaças de frango (*chillers*) foram visitados e analisados, através de observações e entrevistas com os funcionários da empresa.

Em algumas unidades, realizaram-se medições da temperatura do centro do músculo peitoral e da massa percentual de água absorvida pelas carcaças. As medidas foram tomadas na saída e em vários pontos ao longo dos *chillers*.

Os termômetros usados foram do tipo espeto (marca TESTO, modelo 106 – T1), de resolução $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ e as balanças digitais tinham a precisão de $\pm 1\text{g}$, os quais são rotineiramente utilizados para os controles realizados pela indústria. As calibrações e aferições foram feitas pelo setor responsável dentro da unidade industrial.

Neste primeiro contato buscou-se diagnosticar o processo existente com relação à temperatura da água no pré-*chiller* e no *chiller* resfriador, a temperatura média de entrada das carcaças, assim como a evolução da temperatura ao longo do *chiller*. A absorção média de água pelas carcaças e o tempo médio de residência destas no *chiller* também foram avaliados.

O tempo de retenção dentro do chiller foi avaliado marcando-se algumas carcaças com lacres coloridos cronometrando-se o movimento das mesmas no interior dos *chillers*.

Além das medições realizadas e das informações recolhidas através dos funcionários, foi feita uma análise e uma discussão sobre a operação unitária e o equipamento utilizado.

Pôde-se avaliar, através destas observações, o caminho percorrido pelas carcaças de frango ao longo do equipamento, a distribuição destas dentro do equipamento, os caminhos percorridos pela água de resfriamento, a distribuição de gelo ao longo do *chiller*, a agitação do meio de resfriamento e o tempo de retenção das carcaças.

2.2. Estudo em *Chiller* Piloto

Durante a evolução dos trabalhos surgiu a necessidade da realização de experimentos específicos, necessários à compreensão dos aspectos associados com os fenômenos de resfriamento e de absorção de água pelas carcaças.

Foram construídos dois tanques piloto onde se realizaram os testes. Os tanques piloto (ou *chillers* piloto) foram montados na unidade industrial da Perdigão localizada na cidade de Capinzal-SC.

Em Capinzal-SC, a unidade está equipada com três linhas de *chillers* (Linha 1, Linha 2 e Linha 3). A Linha 3 é composta por dois estágios (*pré-chiller* e *chiller*) e normalmente é destinada às aves de maior massa. As Linhas 1 e 2 possuem três estágios (*pré-chiller* 1, *pré-chiller* 2 e *chiller*). As carcaças que serviram como amostras para os teste foram retiradas diretamente da Linha 1.

Para melhor diferenciação, os tanques piloto são denominados como Tanque A e Tanque B.

Tanque A

Construído pela equipe da manutenção da Perdigão, este tanque de aço inox, com dimensões 1000 x 915 x 540 mm (largura x comprimento x largura) aparece esquematizado na Figura 5. Utilizou-se um volume de aproximadamente 500 litros para minimizar as variações na temperatura da água, que poderiam ser causadas pela entrada das carcaças no sistema. Este volume conferia ao sistema a inércia térmica necessária.

Adaptações feitas no tanque permitiram que se fizesse a recirculação da água e a injeção de ar no mesmo. A recirculação da água foi obtida através de uma bomba centrífuga (marca WEG, potencia nominal 3CV). Uma válvula tipo globo, acoplada a tubulação da bomba, permitiu a regulagem da vazão e um hidrômetro serviu para a medição e controle da vazão. Este hidrômetro tinha especificações indicando como capacidade nominal até 5 m³/h e vazão mínima de 0,100 m³/h.

O sistema de injeção de ar consistia em entradas distribuídas na parte inferior do tanque, todas elas ligadas ao sistema de ar comprimido da fábrica. Para regulagem da vazão existia uma válvula tipo globo, mas não se dispunha de rotâmetro ou outro sistema para medida da vazão de ar empregada. Assim, os ensaios foram realizados com duas diferentes vazões de ar: uma em vazão intermediária e outra na vazão máxima (controladas através da abertura da válvula).

O fornecimento de água foi obtido através de duas tubulações disponíveis. A primeira trazia água gelada gerada dentro da unidade para o abastecimento do *chiller*. Em geral, sua temperatura estava em torno de 1°C, podendo apresentar pequenas variações durante a operação. Na outra tubulação, fluía água utilizada para limpeza e higienização da fábrica, sendo esta aquecida e apresentava valores em torno de 32°C.

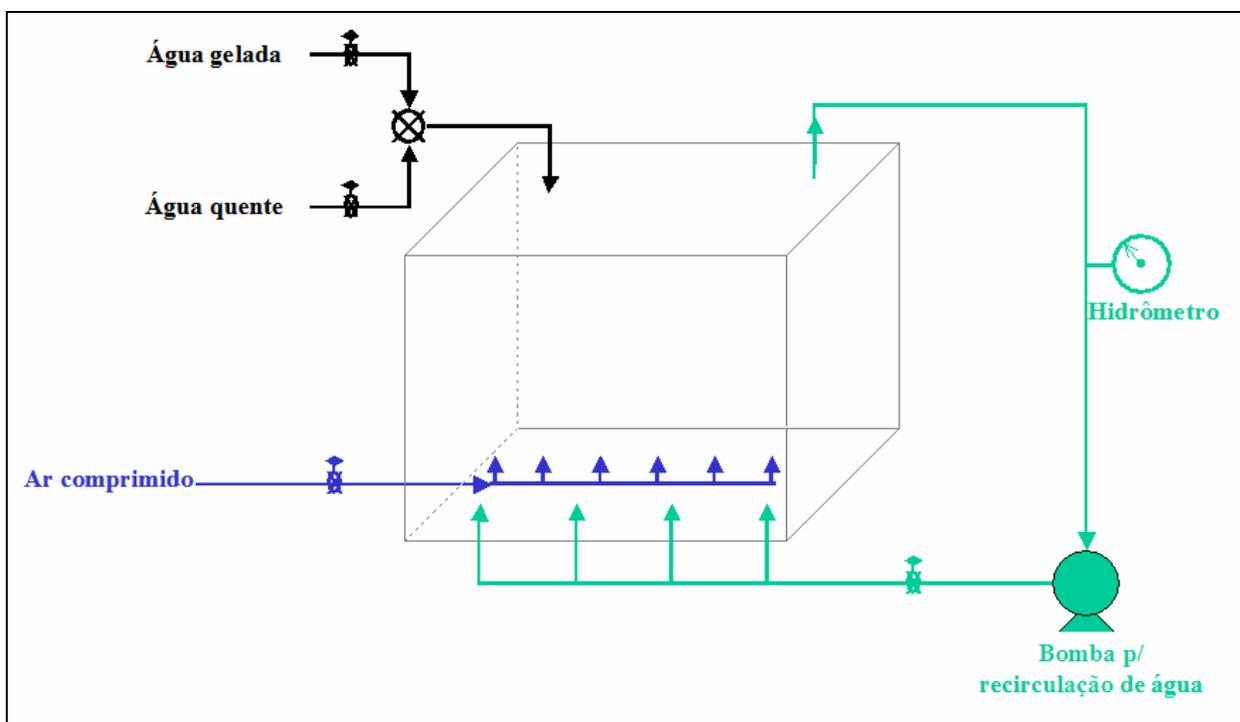


Figura 5: Representação esquemática do Tanque A. Tanque piloto usado nos ensaios de resfriamento das carcaças de frango.

Durante a realização dos ensaios a água era ininterruptamente adicionada ao tanque. O seu nível foi controlado por uma válvula tipo globo, localizada na parte inferior do tanque, e por uma abertura na parte superior, que atuava como “ladrão”.

Os experimentos foram realizados para investigar o comportamento das carcaças de frango quando submetidas a duas diferentes temperaturas de operação. As temperaturas escolhidas foram 1°C e 15°C, no intuito de se obter o comportamento para condições próximas ao *chiller* (último estágio) e ao pré-*chiller* (primeiro estágio) industrial. Aceitaram-se variações de até $\pm 1^\circ\text{C}$ nos valores da temperatura do meio de resfriamento em relação ao valor objetivado.

Em geral, o primeiro estágio da etapa de resfriamento das carcaças tem a água mantida entre 12°C e 15°C, sendo que a legislação estabelece como limite superior de operação a temperatura de 16°C para este estágio. Por isto, a temperatura de 15°C foi considerada adequada para realização dos testes, mantendo-se próximo ao valor extremo.

É estabelecido pela legislação que o último estágio deve ter a temperatura da água inferior à 4°C. Na prática, os *chillers* operam este estágio em temperaturas entre 0°C e 1°C, obtidas com a adição de gelo ao tanque de imersão.

No início dos ensaios abriam-se as válvulas de acordo com a temperatura desejada. Para obtenção da temperatura de 15°C as vazões de água de cada tubulação eram reguladas manualmente.

Medições da temperatura da água com um termômetro digital (marca TESTO, resolução $\pm 0,1^\circ\text{C}$, modelo 106 – T1) foram realizadas continuamente no tanque piloto, para fixação das vazões de água. Os testes só eram iniciados após o tanque estar completamente preenchido e a temperatura estabilizada no valor pré-determinado.

As vazões e as temperaturas dentro das tubulações de fornecimento de água podiam sofrer pequenas variações ao longo do experimento. Assim, medições do valor da temperatura da água dentro do tanque eram realizadas constantemente no intuito de estabelecer-se um controle. As medições foram feitas utilizando-se o mesmo termômetro digital TESTO, acima citado. A correção desta temperatura, sempre que necessário foi realizada pelo ajuste das vazões de fornecimento de água.

Um suporte metálico, com capacidade para quinze carcaças, permitiu que as aves, penduradas pela extremidade inferior da coxa permanecessem imersas em água sem que houvesse o contato direto com o tanque e nem mantivessem contato entre si. Com isto, toda a superfície delas permaneceu “livre” e em contato com a água durante o experimento.

Tanque B

Também concebido em aço inox, o Tanque B era cilíndrico, com altura de 1645mm e diâmetro de 535mm.

Duas hastes metálicas idênticas, com três ganchos adaptados em alturas diferentes em cada uma delas, serviram para colocar as carcaças imersas na água. Estas foram penduradas pela extremidade inferior da coxa, sendo tomado o cuidado para que estas não entrassem em contato com as paredes ou fundo do tanque e nem entre si.

Em cada haste, os ganchos tinham três posições em relação à superfície do tanque: 180mm (nível 1), 845mm (nível 2) e 1470mm (nível 3).

Nos testes realizados neste segundo tanque não foi realizada a agitação do meio. A água utilizada também foi adicionada e controlada da mesma maneira descrita para o Tanque A.

2.2.1. Determinação da Quantidade de Água Absorvida pelas Carcaças

Os experimentos realizados no Tanque A permitiram acompanhar a evolução do percentual de água absorvido pelo frango ao longo do tempo. As condições de operação foram estabelecidas utilizando-se as seguintes condições:

Temperatura da água:

- $T = 1^{\circ}\text{C}$;
- $T = 15^{\circ}\text{C}$.

Agitação do tanque:

- Sem agitação forçada (sem recirculação de água ou injeção de ar);

- Agitação através da recirculação da água;
- Agitação por borbulhamento (injeção de ar), em vazão intermediária.

Foram analisadas todas as combinações possíveis de temperatura da água e agitação do meio, resultando em seis condições diferentes de operação: 1°C/sem agitação, 1°C/agitação com bomba, 1°C/agitação com ar, 15°C/sem agitação, 15°C/agitação com bomba, 15°C/agitação com ar.

Para uma melhor simulação das condições reais, as amostras utilizadas eram retiradas diretamente da linha de produção. Para facilitar e garantir as melhores condições para as amostras, o tanque piloto foi instalado ao lado do *chiller* industrial da unidade fabril da Perdigão em Capinzal-SC.

Os frangos eram coletados exatamente no momento anterior à entrada dos mesmos no pré-*chiller* de lavagem, mantendo assim as condições do processo industrial. No momento de sua coleta, as carcaças eram avaliadas quanto à ausência de rasgos ou ferimentos na pele superficial, pois estes causam interferências na absorção de água. Não eram coletadas aves cujo pescoço não havia sido retirado ou que apresentassem outra particularidade que pudesse interferir nos resultados. Nessa pré-seleção visual também se procurou restringir a faixa de peso das aves.

Depois de selecionadas, as carcaças seguiam o mais rapidamente possível para dentro do tanque piloto. As vísceras presentes na cavidade interna das carcaças eram retiradas manualmente, pois estes miúdos podem se desprender durante a imersão das carcaças no *chiller* piloto, causando erros consideráveis na medição das massas.

As medidas das massas das carcaças foram realizadas através de uma balança da marca Toledo do Brasil - modelo: 2096-H/1, com precisão de $\pm 1g$, fornecida pela empresa, sendo esta calibrada e aferida conforme estipulado pela legislação. Todas as carcaças eram pesadas e identificadas individualmente.

Através do suporte anteriormente citado, colocavam-se as carcaças em contato com a água de resfriamento. Neste instante o cronômetro era acionado e as carcaças

permaneciam submersas durante um intervalo de tempo pré-determinado. Ao fim deste intervalo, as carcaças eram retiradas e mantidas suspensas a partir da extremidade inferior da coxa para que o excesso de água pudesse escorrer, permanecendo suspensas por dois minutos, antes da pesagem. Após a retirada do tanque e pesagem as amostras não retornavam a este, sendo encaminhadas para a fábrica de farinha.

Os intervalos de tempo de imersão das carcaças foram estabelecidos para acompanhar a evolução temporal da quantidade de água absorvida.

No início do experimento, uma amostra foi retirada e analisada a cada dois minutos, até o décimo segundo minuto. Uma amostra foi retirada no trigésimo minuto e as próximas foram obtidas a cada quinze minutos até o sexagésimo minuto. Assim, obtiveram-se as absorções de água nos tempos: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 30, 45 e 60 minutos de imersão.

Como se espera que grande parcela da água absorvida se dê nos primeiros instantes, as medidas no início foram em intervalos menores, possibilitando o acompanhamento da evolução da absorção de água logo após a imersão.

Durante os ensaios 15 frangos foram pesados em cada intervalo de tempo de imersão, para cada uma das seis condições de operação.

2.2.1.1. Modelos Matemáticos para Absorção de Água pelas Carcaças Durante o Resfriamento

Dois modelos matemáticos foram desenvolvidos para descrever a evolução da massa de água absorvida pelas carcaças ao longo do tempo, denominados **Modelo I** e **Modelo II**.

Desenvolvimento do Modelo I

Efetuando um balanço de massa na carcaça de frango, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de variação da massa} \\ \text{de água da carcaça} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de entrada da água} \\ \text{através da fronteira da carcaça} \end{array} \right\} \quad (4)$$

Considerado que:

$t =$ tempo;

$t_0 =$ início do processo (momento de imersão das carcaças em água);

$m =$ massa da carcaça em um dado instante

$m_0 =$ massa da carcaça imediatamente antes de iniciar a absorção de água (antes da imersão), $t = t_0$;

$m_A =$ massa de água absorvida pela carcaça após um intervalo de tempo t ($m_A = m - m_0$).

Pode-se definir a fração mássica (W) de água absorvida em relação à massa inicial do frango pela Equação 5:

$$W = \frac{m_A}{m_0} \quad (5)$$

Em t_0 , o valor atribuído a W é zero, pois considera-se que no início do processo as carcaças ainda não absorveram água. Sabe-se, no entanto, que o frango é constituído em grande parte por água. Além disto, existe uma certa quantidade de água absorvida pelas carcaças nas etapas anteriores ao resfriamento, mas somente a água absorvida no *chiller* será avaliada.

A Equação 6 pode ser escrita como:

$$\frac{d}{dt} \left(\begin{array}{l} \text{massa} \\ \text{de água} \end{array} \right) = jA \quad (6)$$

onde j é o fluxo de água que passa pela fronteira da carcaça (volume de controle) de área A .

O fluxo j pode ser descrito como o produto entre uma diferença de potencial para a transferência de água (força motriz para a passagem de água para a região interna do frango) e uma constante de proporcionalidade (coeficiente de transferência de massa, K_m). A definição deste potencial pode ser tomada de diferentes maneiras, desde que, uma vez definida, seja considerada em todo o restante da análise. Assim,

$$j = K_m \left[\begin{array}{l} \text{diferença de} \\ \text{potencial} \end{array} \right] \quad (7)$$

Como diferença de potencial para a transferência de água é utilizada a diferença entre a quantidade máxima de água que pode ser absorvida (m_{Am}) e a quantidade total de água absorvida (m_A) em um dado instante. Assim, pode-se descrever o fluxo de água para o interior da carcaça pela Equação 8.

$$j = K_m [m_{Am} - m_A] \quad (8)$$

A massa de água (m_A) que aparece na Equação 8 poderá ser considerada como a massa total absorvida desde t_0 , considerando-se que inicialmente a massa absorvida é igual a zero. Substituindo a Equação 8 na Equação 6 vem que:

$$\frac{dm_A}{dt} = K_m A [m_{Am} - m_A] \quad (9)$$

Dividindo a Equação 9 por m_0 obtém-se a Equação 10.

$$\frac{d\left(\frac{m_A}{m_0}\right)}{dt} = K_m A \left[\left(\frac{m_{Am}}{m_0}\right) - \left(\frac{m_A}{m_0}\right) \right] \quad (10)$$

Pela definição dada na Equação 5 e definindo na Equação 11 o valor máximo da fração mássica de água absorvida pela carcaça (W_m), obtém-se a Equação 12.

$$W_m = \frac{m_{Am}}{m_0} \quad (11)$$

$$\frac{dW}{dt} = K_m A [W_m - W] \quad (12)$$

A legislação e as indústrias utilizam como índice de controle para a quantidade de água absorvida o valor percentual. A conversão de fração mássica para percentual de água absorvido é simples e direto, conforme mostrado na Equação 13:

$$P = W \times 100 \quad (13)$$

A área superficial das carcaças (área de absorção de água) é de difícil determinação, pois este não possui uma geometria bem definida e que pode variar de uma amostra para outra. Assim, uma alternativa é embutir o valor da área (A) no valor do coeficiente de transferência de massa (K_m), obtendo-se um novo parâmetro, denominado aqui de segundo coeficiente de transferência de massa, K'_m . Este novo parâmetro terá como unidade o inverso do tempo (min^{-1}). A Equação 14 explicita K'_m .

$$K'_m = K_m A \quad (14)$$

Assim, chega-se a uma equação simples para a análise da cinética de absorção de água pelas carcaças durante o resfriamento em *chiller* por imersão.

$$\frac{dW}{dt} = K'_m [W_m - W] \quad (15)$$

Em termos de porcentagem de massa absorvida, tomando P_m como o percentual máximo que pode ser absorvido pelo frango, escreve-se

$$\frac{dP}{dt} = K'_m [P_m - P] \quad (16)$$

Se o valor de K'_m depender somente das condições térmicas convectivas da água em contato com a superfície das carcaças (grau de agitação e temperatura da água) e da área superficial das mesmas, pode-se ter K'_m constante com o tempo.

Tomando-se o valor máximo de absorção (W_m) como constante e rearranjando a Equação 15 tem-se que:

$$\frac{dW}{(W_m - W)} = K'_m dt \quad (17)$$

Integrando-se a Equação 17 no intervalo de tempo $[t_0 - t]$, desde $W(t_0)$ até o valor de $W(t)$, vem que:

$$\ln\left(\frac{W_m - W(t_0)}{W_m - W(t)}\right) = K'_m t \quad (18)$$

Como definido anteriormente $W(t_0)$ é nulo, resultando na Equação 19.

$$\ln\left(\frac{W_m}{W_m - W(t)}\right) = K'_m t \quad (19)$$

O valor de W em função do tempo, para um dado valor de K'_m , é dado pela Equação 20.

$$W = W_m \left(1 - e^{-K'_m t}\right) \quad (20)$$

Em termos de percentual de absorção,

$$P = P_m \left(1 - e^{-K'_m t}\right) \quad (21)$$

O valor máximo da fração mássica de água absorvida pelas carcaças foi determinado a partir de um experimento específico. Dez carcaças foram imersas em água por 24 horas para a determinação dos percentuais de massa absorvidos, os quais

variaram de 8% a 12%. Assim, assumiu-se o valor de 10% ($0,1 \text{ g}_{\text{água}}\text{g}^{-1}_{\text{frango}}$) como esse valor máximo. O uso de um valor diferente para W_m (ou P_m) não altera conceitualmente o modelo proposto.

O único parâmetro a ser determinado nesta equação é o valor do segundo coeficiente de transferência de massa (K'_m). O conhecimento deste coeficiente nos permite prever a evolução de W com o tempo.

Desenvolvimento do Modelo II

O segundo modelo matemático foi desenvolvido a partir do primeiro. O segundo coeficiente de transferência de massa (K'_m) foi redefinido como sendo dependente da quantidade de água absorvida (W). Considerou-se que o coeficiente de transferência de massa efetivo diminui com o próprio processo de absorção de água pelas carcaças. Assim ele teria a forma representada pela Equação 22, onde K''_m e β são constantes.

$$K'_m = K''_m e^{\beta W} \quad (22)$$

Este terceiro coeficiente de transferência de massa (K''_m) tem a mesma dimensão de K'_m (min^{-1}) e o parâmetro β tem dimensão $\text{g}_{\text{frango}} \text{g}^{-1}_{\text{água}}$.

Substituindo a Equação 22 na Equação 15 vem que:

$$\frac{dW}{dt} = K''_m e^{\beta W} [W_m - W] \quad (23)$$

A solução analítica desta equação pode ser aproximada por uma solução através de séries (SPIEGEL, 1968). Nesta solução, entretanto, obtém-se uma equação transcendental (em termos da série) na qual não é possível explicitar-se o termo W . Além disto, é ainda necessário avaliar-se os limites de convergência da solução (raio de convergência da série). A solução está mostrada na Equação 24.

$$\ln\left(\frac{W_m - W}{W_m}\right) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\beta^i (W_m - W)^i - \beta^i (W_m)^i}{i!} = -e^{\beta W_m} K_m'' t \quad (24)$$

Assim, a resolução desta equação diferencial ordinária (Equação 23) foi obtida numericamente pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem. (GOMES-RUGGIERO e LOPES, 1996).

O programa computacional para a resolução numérica da Equação 23 foi elaborado utilizando-se a linguagem Delphi 7.0[®]. Este possibilitou a determinação dos valores para os parâmetros K_m'' e β que ajustaram adequadamente os dados experimentais de absorção de água em função do tempo. Um diagrama de blocos esquemático deste programa encontra-se no Apêndice A.

Numericamente, os melhores valores dos parâmetros foram aqueles que obtiveram o menor valor para o somatório dos resíduos de todos os pontos de uma determinada condição experimental. O resíduo para cada ponto experimental foi calculado conforme a Equação 25.

$$\text{resíduo} = |\text{valor estimado numericamente} - \text{valor experimental}| \quad (25)$$

2.2.2. Influência do Nível de Agitação na Absorção de Água pelas Carcaças

Para análise da influência do nível de agitação promovido na fase líquida sobre a absorção de água pelas carcaças, realizaram-se medidas em quatro condições de operação.

A agitação foi provocada pela injeção de ar, em duas intensidades. A vazão intermediária foi aquela na qual se realizou a maior parte dos experimentos de absorção de água durante o resfriamento. A outra condição de agitação foi aquela obtida com a válvula de regulação de entrada de água totalmente aberta, permitindo a vazão máxima.

As condições de operação utilizadas seguem descritas a seguir:

- Injeção de ar com máxima vazão, a 15°C;
- Injeção de ar com vazão intermediária, a 15°C;
- Injeção de ar com vazão intermediária, a 1°C;
- Sem agitação, a 15°C.

Utilizando-se o Tanque A, os procedimentos de medida da massa absorvida foram idênticos aos descritos no item 2.2.1.

Para avaliar a influência da agitação na absorção de água pelas carcaças foram realizadas medidas em dois intervalos de tempo de imersão: 15 e 30 minutos. Em cada condição de operação, para cada tempo de imersão, foram coletadas medidas de massa de vinte carcaças, individualmente.

2.2.3. Influência da Pressão Hidrostática na Absorção de Água pelas Carcaças

O Tanque B, descrito anteriormente, foi utilizado para a verificação da influência da pressão hidrostática sobre o percentual de água absorvido pelas carcaças.

Estes testes de absorção de água pelas carcaças seguiram os mesmos procedimentos descritos no item 2.2.1. Os pesos antes da imersão e após a retirada de dentro do tanque foram tomados com a balança fornecida pela Perdigão (marca Toledo do Brasil - modelo: 2096-H/1, com precisão de $\pm 1g$). As carcaças foram mantidas penduradas nos ganchos presos às duas hastes que compõe o Tanque B.

No controle da temperatura da água, o mesmo sistema foi utilizado, contando com duas fontes de alimentação, a $1^{\circ}C$ e $32^{\circ}C$ aproximadamente. Porém, neste experimento, a temperatura do meio foi fixada em uma única condição, a $15^{\circ}C$.

As carcaças foram submetidas a três pressões hidrostáticas diferentes, ou seja, 180mm (nível 1), 845mm (nível 2) e 1470mm (nível 3). As medidas referem-se às distâncias das carcaças submersas até a superfície da água.

2.2.4. Determinação da Evolução da Temperatura Durante o Resfriamento das Carcaças

Para determinação da evolução temporal da temperatura do centro do músculo peitoral das carcaças de frango, foram conduzidos experimentos no *chiller* piloto denominado de Tanque A.

Como no procedimento descrito para avaliação da absorção de água, foram analisadas todas as seis combinações possíveis de temperatura da água e agitação do meio: $1^{\circ}C$ /sem agitação, $1^{\circ}C$ /agitação com bomba, $1^{\circ}C$ /agitação com ar, $15^{\circ}C$ /sem agitação, $15^{\circ}C$ /agitação com bomba, $15^{\circ}C$ /agitação com ar. Foi utilizada, para promover a agitação do meio, a vazão de ar fornecida pela válvula aberta na posição intermediária.

Uma nova variação nas condições de operação foi realizada neste teste. O processo de resfriamento utilizando agitação com ar a $1^{\circ}C$ foi repetido alterando-se o intervalo de tempo em que o sistema de injeção de ar esteve ligado.

Assim, três novas condições de operação foram estabelecidas: 83,33% do tempo do experimento (50 minutos) com válvula de ar aberta na posição intermediária; 66,67% do tempo do experimento (40 minutos) com a válvula de ar aberta na posição intermediária e 50% do tempo do experimento (30 minutos) com válvula de ar aberta na posição intermediária. Manteve-se no restante do tempo as válvulas totalmente fechadas.

Em todos os testes, inicialmente a válvula encontrava-se aberta, sendo interrompido o fornecimento de ar na etapa final do experimento.

As carcaças utilizadas foram obtidas do mesmo modo realizado para os testes anteriores.

Através do suporte adaptado ao *chiller* piloto, as aves foram imersas em água, penduradas pela extremidade inferior da coxa, sem que houvesse o contato direto com o tanque e nem mantivessem contato entre si. Com isto, toda a superfície delas permaneceu em contato com a água, durante o experimento.

A evolução temporal da temperatura foi obtida através de um sistema de medição e registro automático de dados. O coletor de dados (modelo Multipaq – TP0010) trabalhou acoplado a um microcomputador IBM ThinkPad (Pentium MMX – 16 MB RAM), onde se encontrava instalado o software “MultiTracker para Windows™” (versão 4.10 – Copyright DATAPAQ) que serviu para conversão dos sinais dos sensores em valores de temperatura.

Antes da retirada das carcaças da linha de produção, o coletor era programado para realizar a nova corrida. O intervalo entre cada leitura foi de 10 segundos e os testes tiveram 60 minutos de duração.

O coletor de dados possui a faixa de medida entre - 190°C e 400°C. Com capacidade de memória para 16000 dados, sua resolução é de 0,1°C e a precisão 0,5°C. Este coletor dispõe de oito canais e oito sensores de temperatura tipo espeto.

Em cada amostra foram inseridos dois sensores tipo espeto. O primeiro no centro do músculo peitoral, o outro permaneceu na parte superficial do peito, logo abaixo da pele que recobre o mesmo. Um dos sensores foi usado para medir a temperatura da água do tanque durante todo o experimento. Assim, ao término dos experimentos os dados eram adquiridos no microcomputador com o software Multi Tracker.

3. Resultados e Discussão

3.1. Resultados Obtidos no *Chiller* Industrial

As seis unidades de abate de aves visitadas durante a realização deste trabalho possuem características peculiares, mas os aspectos aqui discutidos são comuns a todas as unidades e são resultados das observações efetuadas.

Quando imersas na água do *chiller* as carcaças submergem com tendência de se aglomerarem no fundo do tanque. A rosca sem fim funciona continuamente, girando em um único sentido ao longo de todo o equipamento. Este movimento da rosca provoca o atrito das carcaças com a mesma. Ao atritarem-se, as carcaças são conduzidas pela rosca em direção a um dos lados do equipamento, formando um grande bloco. Esta aglomeração não se desfaz, sendo as carcaças conduzidas nesta forma até a última volta da rosca, aonde as pás irão removê-las de dentro do equipamento.

A formação desses blocos (aglomeração de carcaças) cria barreiras à circulação da água e também diminui a área livre de contato da superfície das carcaças com a mesma. Considerando o que foi anteriormente discutido com relação à transferência do calor das aves para o meio de resfriamento, estes dois aspectos operacionais prejudicam a eficiência e a homogeneidade da transferência de calor entre carcaças e a água.

A pouca mobilidade das carcaças ao percorrerem o equipamento (*chiller*) também causa influência na absorção de água pelas mesmas. Além da redução da área de contato e da dificuldade de circulação da água, a permanência das carcaças em

diferentes profundidades promove diferenças no percentual de água absorvido por elas. Assim, uma carcaça que permanece grande parte do tempo na parte inferior do bloco terá um percentual de água absorvida potencialmente inferior quando comparada à outra carcaça, que esteve na maior parte do tempo em uma profundidade menor. Esta influência da profundidade, e por consequência da pressão exercida pela coluna de água, será mais bem discutida em um item específico apresentado adiante.

A água de resfriamento é sempre alimentada em contra-corrente ao sentido de movimentação das carcaças pela rosca sem fim. A formação dos blocos de carcaças no fundo do equipamento, somada à obstrução causada pela própria rosca sem fim, leva a água a um caminho preferencial. Pôde-se claramente observar este caminho no equipamento. Em um dos lados, rente à parede do *chiller*, a velocidade do escoamento é visivelmente maior se comparada ao seio do mesmo. A criação deste caminho implica na formação de uma zona de estagnação para o escoamento de água fria no bloco de carcaças, diminuindo a eficiência do processo de resfriamento.

Assim, conclui-se que a formação da zona de estagnação está associada ao sistema de transporte das carcaças. A rosca sem fim cobre grande parte da área perpendicular à direção de escoamento da água de resfriamento. Como essa rosca não possui aberturas na sua superfície que permitam a passagem da água (as roscas não são perfuradas), o escoamento fica restrito à região periférica do equipamento. A Figura 6 ilustra o que foi discutido acima através da esquematização da vista superior do *chiller*.

Ao longo dos tanques de resfriamento (*chiller*) existem pontos de alimentação de gelo. É comum observar-se gelo saindo junto às carcaças no final do equipamento. O gelo, com menor massa específica que a água, permanece na parte superior do *chiller* formando uma camada que recobre a superfície do meio de resfriamento. A baixa agitação deste meio não facilita que todo o gelo se misture à água e seja fundido.

Um outro fator que dificulta uma maior eficiência do processo é a irregularidade da matéria-prima com relação à massa e às dimensões das carcaças. As aves abatidas pelos frigoríficos são originárias de várias granjas, possuem sexos diferentes e assim,

apresentam diferenças genéticas e de ambiente. Embora exista um grande esforço para minimizar a variabilidade no tamanho das carcaças, em um mesmo turno podem ocorrer muitas mudanças de lote, acarretando variações importantes na massa média das mesmas. Além disto, em um mesmo lote, as carcaças podem apresentar consideráveis desvios de massa em relação à média. Ainda que as aves se encontrem dentro de uma estreita faixa de massa, podem ser constatadas diferenças na conformidade da sua carcaça: espessura do peito, tamanho da cavidade interna, área superficial, tamanho das asas e das coxas. Todos estes fatores influenciam na transferência de calor e na absorção de água pela mesma.

Constatou-se que o tempo de retenção da carcaça dentro do equipamento de *chiller* pode sofrer grande variação. Carcaças devidamente identificadas, que iniciaram simultaneamente o processo de resfriamento, tiveram tempo de retenção com até 25% de diferença. Durante o transporte pelo sistema de rosca sem fim é comum carcaças ficarem em regiões estagnadas ou mesmo ficarem presas em partes do equipamento. Além disso, a rosca não impõe o mesmo contato sobre todas as carcaças, permitindo que algumas delas atravessem mais rapidamente o sistema de resfriamento em relação às outras.

Medições realizadas nas linhas produtivas ao final do sistema de *chiller* mostraram que as carcaças apresentaram pouca uniformidade nos valores da temperatura no centro do músculo peitoral. Algumas amostras tinham sua temperatura final variando entre si em até 7°C. A não uniformidade foi também observada no percentual de água absorvida pelas carcaças. Atribuem-se essas diferenças aos diferentes caminhos percorridos pelas carcaças, às posições relativas e aos tempos de retenção destas no equipamento, às variações no tamanho das aves e aos caminhos preferenciais da água de resfriamento.

Neste trabalho não foram incluídos os valores de medições realizadas na linha produtiva por razões de sigilo industrial. Estes dados pertencem à Perdigão Agroindustrial S/A.

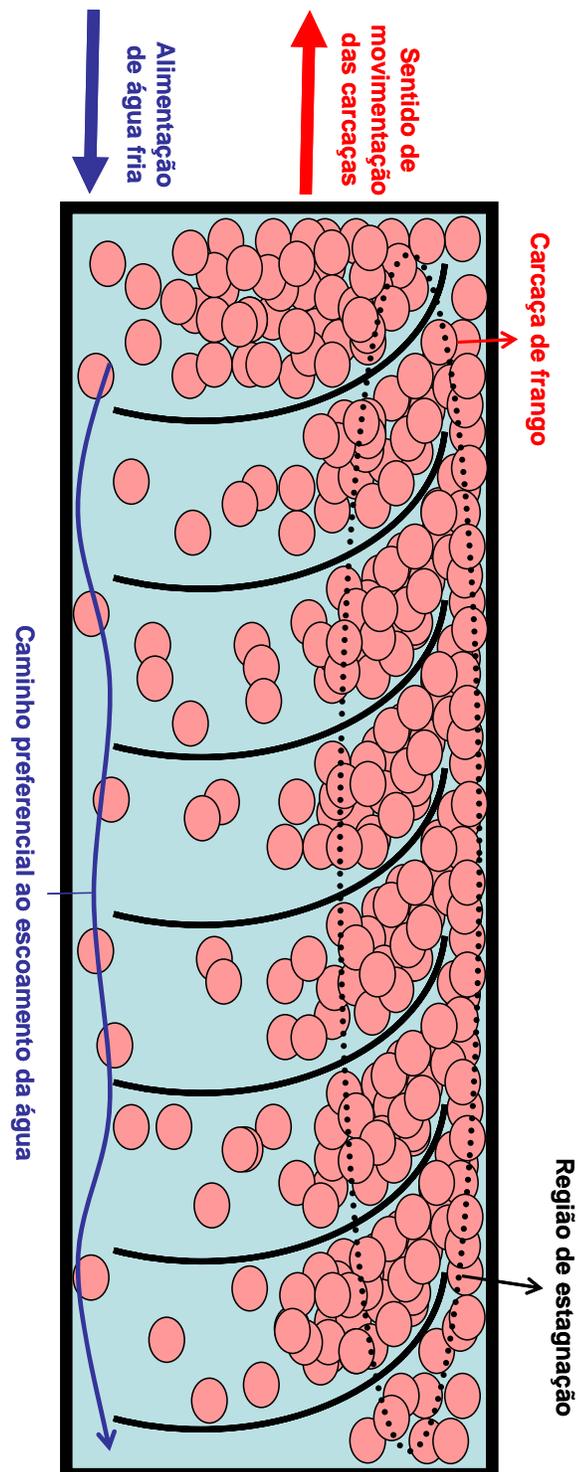


Figura 6: Esquemática da vista superior do *chiller* industrial. Região de estagnação e caminho preferencial da água no equipamento.

3.2. Resultados Obtidos no *Chiller* Piloto

Os dados obtidos a partir dos experimentos realizados nos tanques piloto (Tanques A e B) serão apresentados e discutidos a seguir.

3.2.1 Quantidade de Água Absorvida pela Carcaça

Os resultados da influência das variáveis de processo na absorção de água pelas carcaças de frango são apresentados a seguir.

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados resultados que mostram a influência da agitação da água fria na absorção de água, a duas temperaturas diferentes. Todos os valores apresentados representam valores médios obtidos a partir do resultado da absorção de água de 15 carcaças.

Na Figura 7 apresenta-se a comparação entre as curvas da evolução temporal do percentual de água absorvida pelas carcaças, onde o meio de resfriamento manteve-se em torno de 1°C. Observa-se nesta figura que as curvas de absorção de água obtidas sob agitação, tanto com a bomba de água quanto com ar comprimido, mostraram absorções de água mais elevadas, quando comparados com os valores de absorção de água do processo sem agitação, durante todo o intervalo de tempo analisado.

Na Figura 8 mostra-se o percentual de água absorvida pelas carcaças para temperatura da água de resfriamento em 15°C. Nesta figura maiores valores de absorção de água são evidenciados na condição de agitação por injeção de ar comprimido, superando significativamente as outras duas condições.

Nas duas temperaturas, percebe-se que a agitação do meio sempre influencia de maneira positiva a absorção de água pela carcaça. Esses resultados também indicam que a temperatura influencia positivamente na absorção de água.

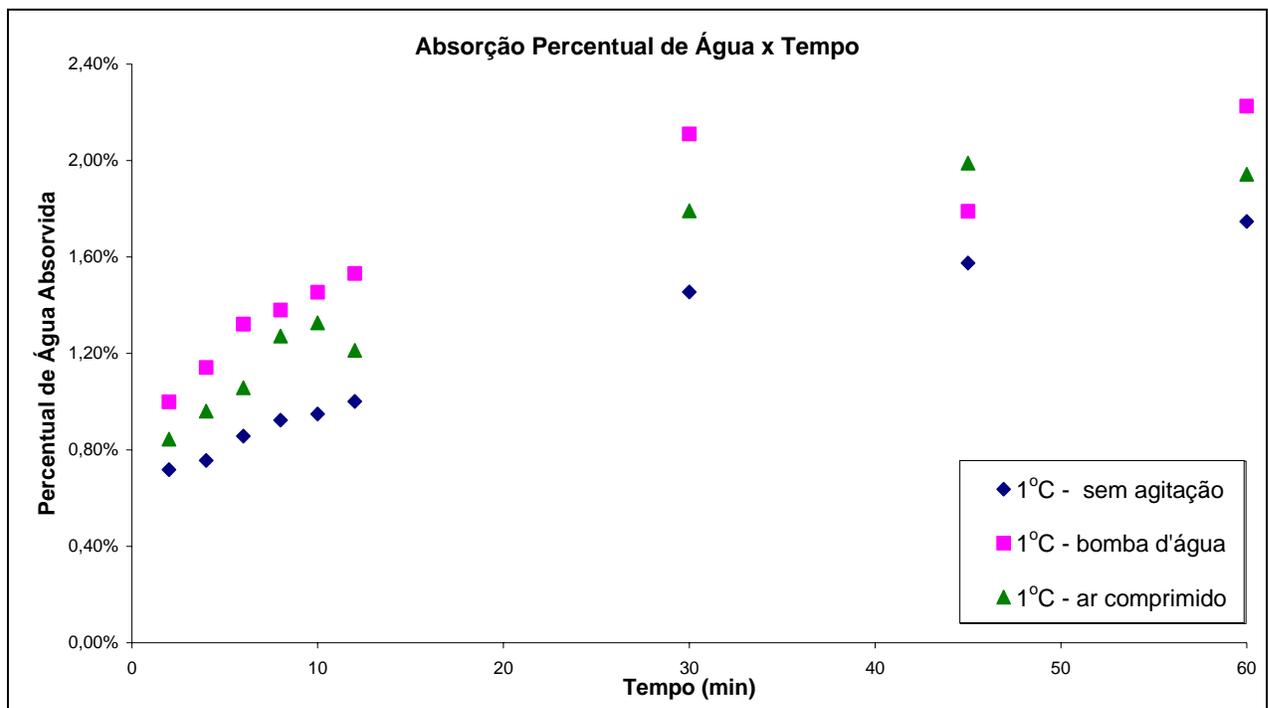


Figura 7: Percentual de absorção de água pelas carcaças de frango em função do tempo para água a 1°C, em 3 diferentes condições de agitação.

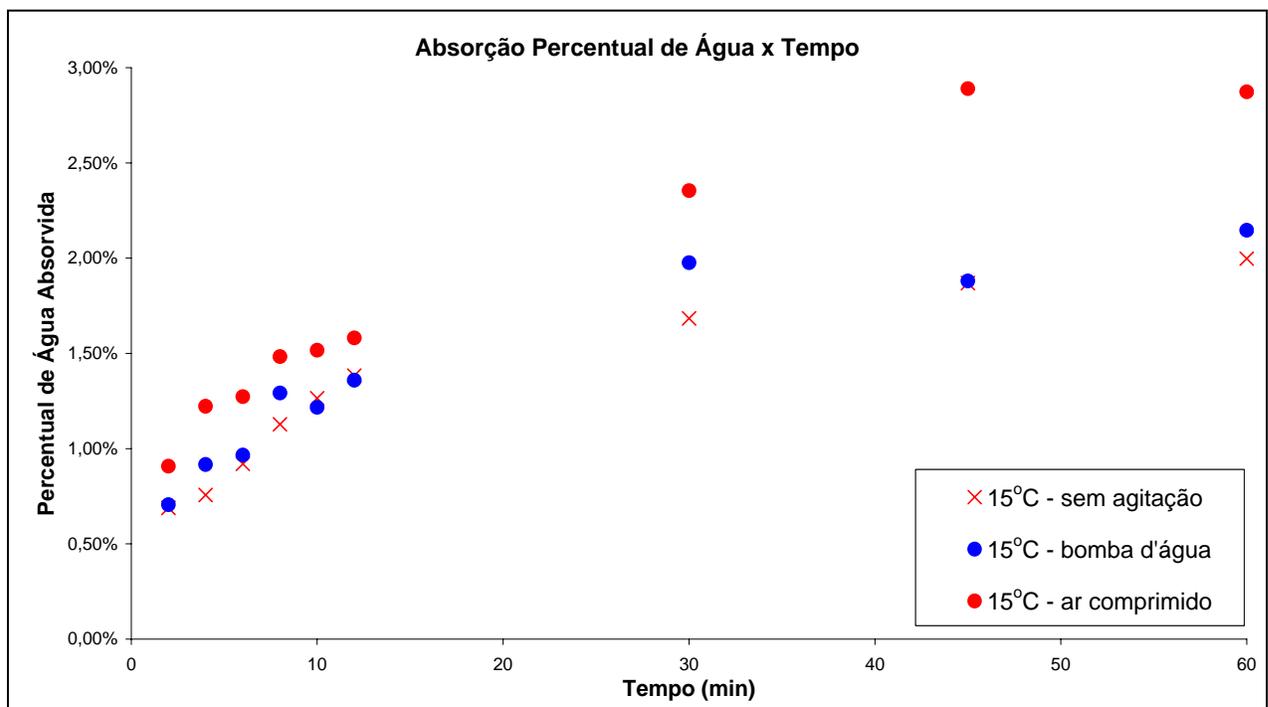


Figura 8: Percentual de absorção de água pelas carcaças de frango em função do tempo para água a 15°C, em 3 diferentes condições de agitação.

Nas Figuras 9, 10 e 11 apresentam-se os resultados que mostram a influência da temperatura na absorção de água pelas carcaças durante o resfriamento. As curvas de absorção de água com o tempo para o meio sem agitação (Figura 9) mostram maiores valores de absorção para o maior valor da temperatura. Na Figura 10, a comparação das curvas de absorção em meio agitado com bomba não mostrou uma influência nítida da temperatura da água na variável estudada. Comparando-se as curvas de absorção de água pela carcaça, em condições de agitação do meio por injeção de ar comprimido (Figura 11), observa-se novamente uma maior absorção de água na temperatura de 15°C. A curva de absorção de água, sob agitação com ar, na temperatura de 15°C, foi a que apresentou maiores valores de percentual de absorção, dentro do intervalo de tempo dos experimentos. Este resultado mostra um comportamento sinérgico entre o aumento de temperatura e a agitação do meio com ar comprimido.

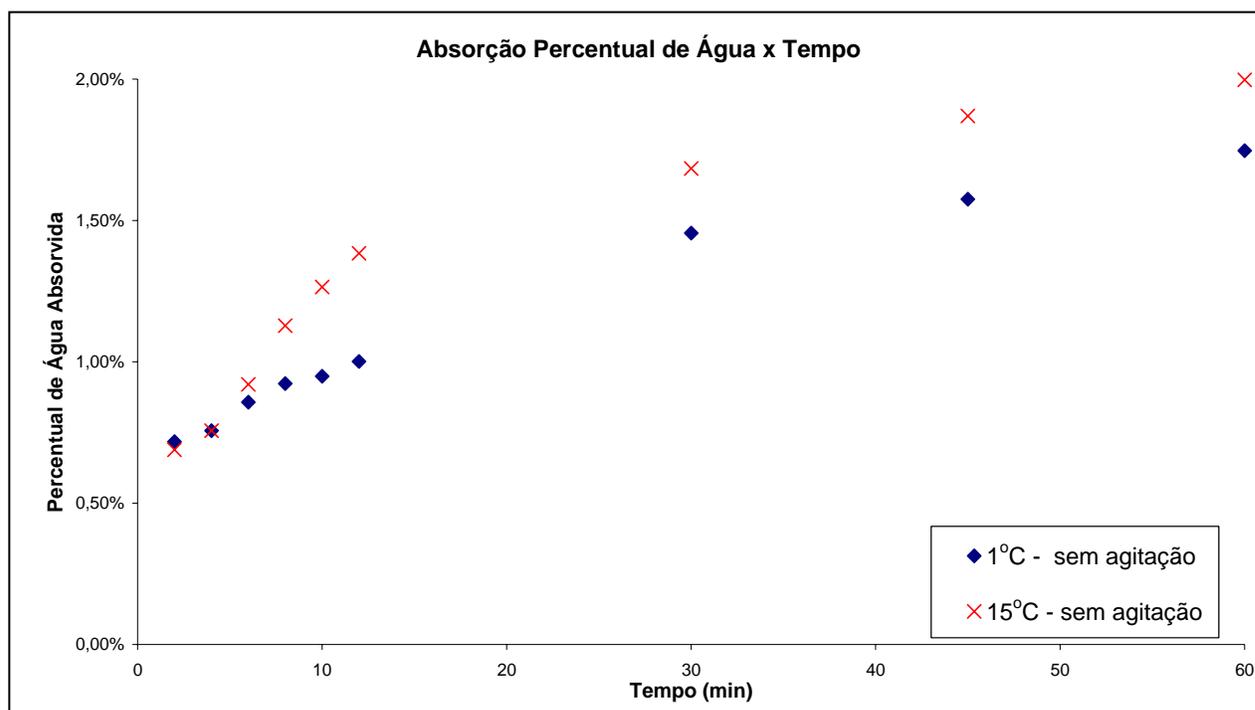


Figura 9: Curvas de absorção de água pelas carcaças de frango, quando não foi usada agitação da água no tanque. Experimentos realizados a 1°C e 15°C.

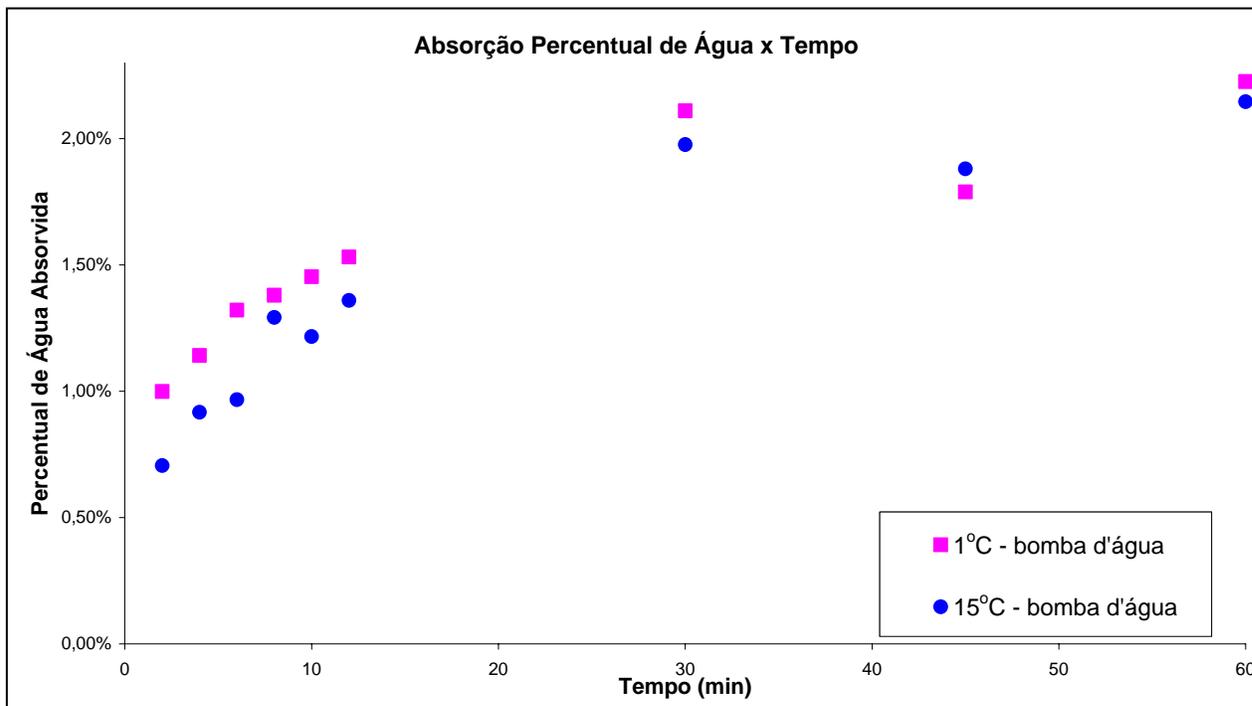


Figura 10: Curvas de absorção de água pelas carcaças de frango, em condições de agitação promovidas pela recirculação de água. Experimentos realizados a 1°C e 15°C.

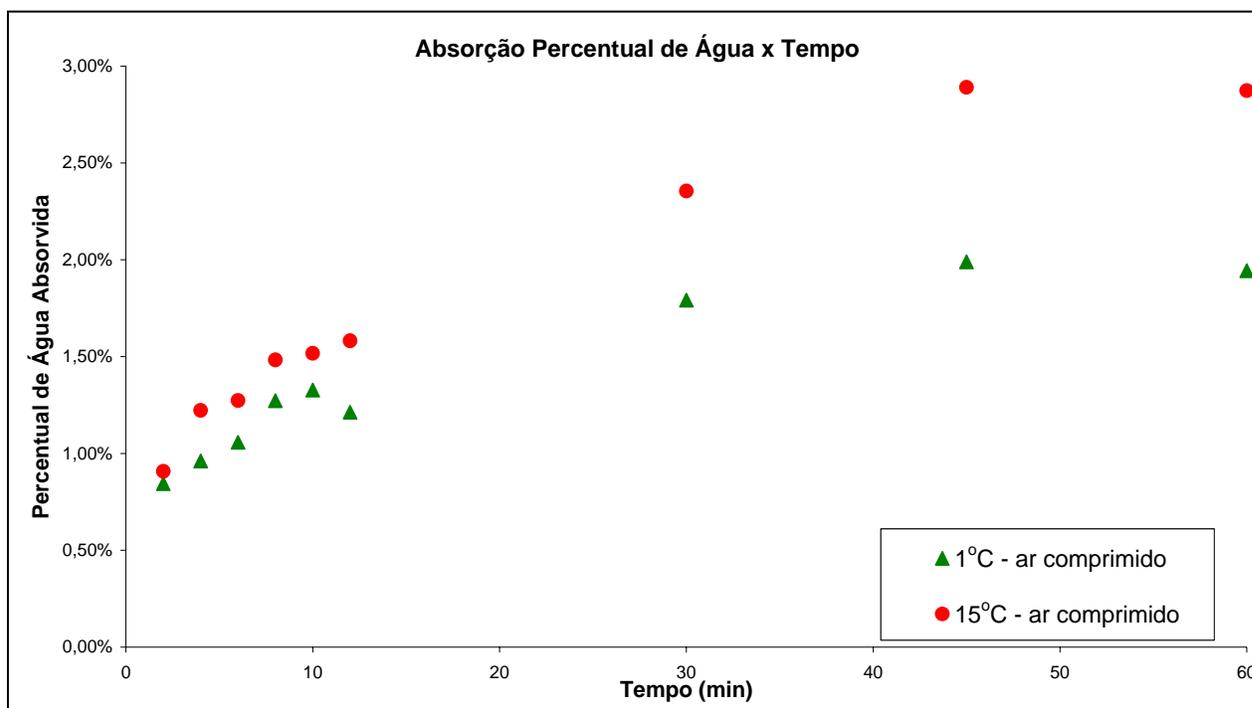


Figura 11: Curvas de absorção de água pelas carcaças de frango, em condições de agitação promovidas pela injeção de ar. Experimentos realizados a 1°C e 15°C.

Os resultados apresentados nas Figuras 9, 10 e 11 mostram que uma parte significativa da absorção de água pelas carcaças ocorre nos primeiros 10 minutos de imersão (aproximadamente 50% da água absorvida durante 1 hora de imersão). Após este período, as curvas indicam que há diminuição das taxas de absorção da água. Uma análise detalhada da cinética de absorção de água, assim como a modelagem matemática dessa absorção, será apresentada a seguir.

Os valores de absorção de água encontrados são inferiores àqueles observados nos *chillers* industriais (3-5%) e muito abaixo do percentual máximo permitido pela legislação brasileira (8%).

3.2.1.1. Modelos Matemáticos para Absorção de Água pelas Carcaças Durante o Resfriamento

Aplicação do Modelo I aos Dados Experimentais

Com os dados experimentais da evolução temporal do percentual de água absorvido pelas carcaças, realizou-se o ajuste das curvas ao primeiro modelo proposto, representado pela Equação 19. Para isto, $\ln(W_m/W_m - W(t))$ foi plotado em função do tempo t e uma equação linear foi ajustada para representar esses dados. Os dados e a função ajustada são apresentados na Figura 12. Esses dados são relativos a um experimento realizado a 1°C e com agitação promovida pela recirculação da água de resfriamento. Os dados e as funções ajustadas para as demais 5 combinações de condições de operação encontram-se no Apêndice B.

No modelo matemático representado pela Equação 19, o segundo coeficiente de transferência de massa é uma constante, cujo valor é o coeficiente angular da reta mostrada na Figura 12, ou seja, $K'_m = 0,0021 \text{ min}^{-1}$. O uso deste coeficiente de transferência de massa constante com o tempo pode ser a causa do ajuste de baixa

qualidade proporcionado pelo Modelo I. Partindo-se da consideração de que este coeficiente de transferência de massa diminui durante o processo de absorção de água, um segundo modelo de transferência de massa foi utilizado.

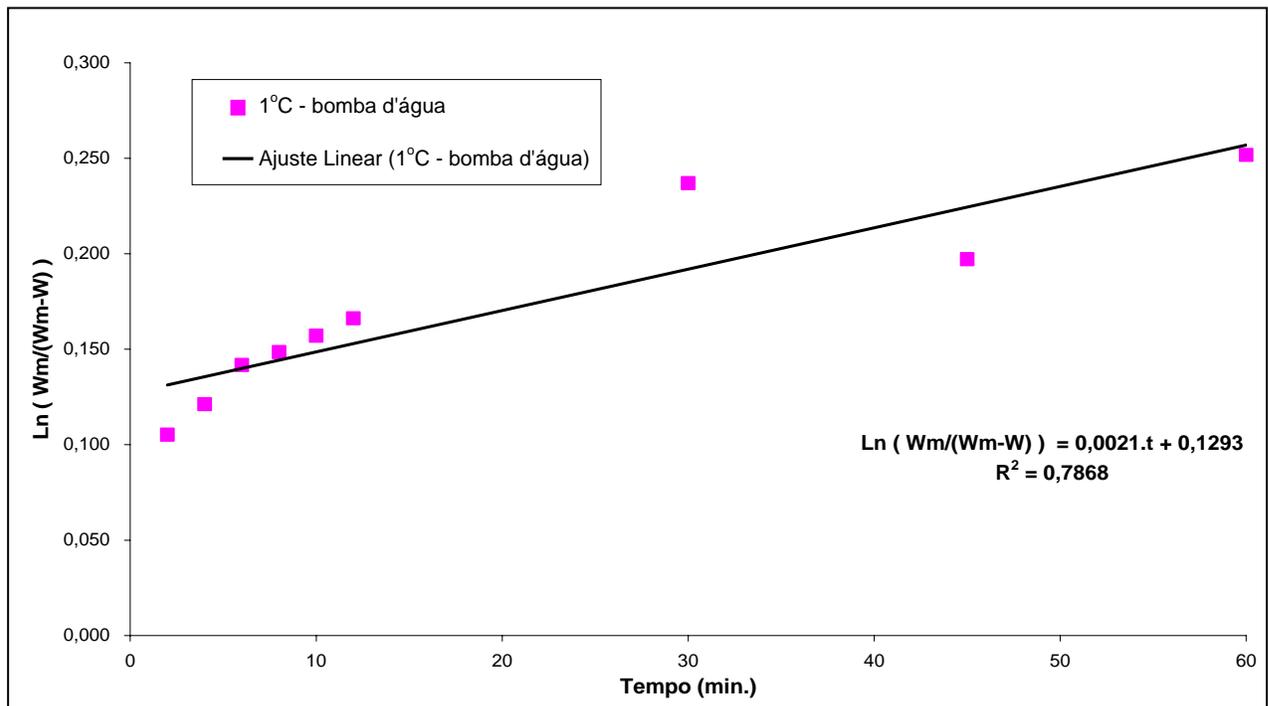


Figura 12: Ajuste dos dados experimentais à Equação 19 (Modelo I), para agitação por bomba d'água e temperatura da água de resfriamento a 1°C.

Aplicação do Modelo II aos Dados Experimentais

Neste modelo, o valor do segundo coeficiente de transferência de massa varia de maneira inversa à quantidade de água absorvida pela carcaça: $K'_m \propto [\exp(\beta|W)]^{-1}$.

O programa computacional construído para a resolução numérica deste modelo foi utilizado para as 6 condições experimentais estudadas. A Figura 13 mostra a interface gráfica do programa elaborado em Delphi 7.0[®].

Utilizando-se de um método de aproximação para resolver a equação diferencial ordinária em estudo (Equação 23), o passo no tempo utilizado para sua resolução pode influenciar nos resultados. Para tal avaliação testou-se, para as 6 condições experimentais, a execução do programa com diferentes valores deste passo. Foi-se reduzindo o valor do passo até que os valores obtidos para os parâmetros e para o erro acumulado fossem estáveis e independentes do mesmo. A Tabela 3 mostra estes valores para uma das condições avaliadas.

Cada redução no valor do passo leva a um aumento, de maneira drástica, no tempo de processamento computacional.

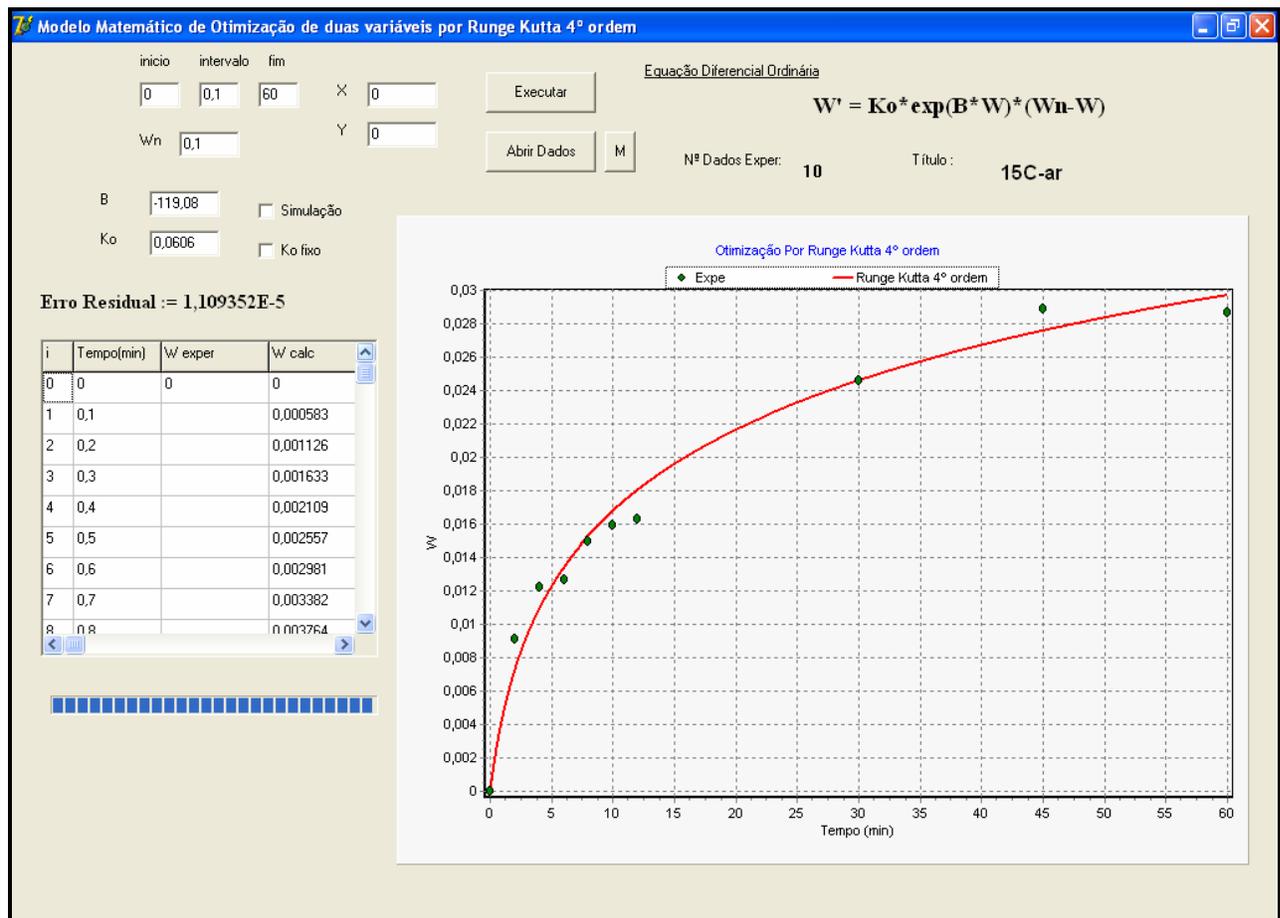


Figura 13: Interface gráfica do programa para determinação do perfil temporal de W e dos valores ótimos do parâmetros K_m'' e β .

Tabela 3: Valores de K_m'' , β e do somatório dos resíduos obtidos pelo programa computacional em diferentes passos no tempo. Dados experimentais a 1°C, agitado com bomba d'água.

Passo no tempo (s)	β ($\text{g}_{\text{frango}} \text{g}^{-1} \text{água}$)	K_m'' (min^{-1})	\sum resíduos ($*10^5$)
1,00	-250,52	0,1708	1,2271
0,50	-266,04	0,2204	1,2520
0,25	-267,84	0,2276	1,2586
0,20	-291,01	0,2875	1,1135
0,10	-291,19	0,2883	1,1134
0,05	-291,19	0,2883	1,1134
0,01	-291,19	0,2883	1,1134

Pode-se observar na Tabela 3, que para valores de passo de tempo iguais ou inferiores a 0,1s os valores dos parâmetros e do erro acumulado tornam-se invariantes. Este valor de passo de tempo foi suficiente para estabilizar a resposta para todas as condições experimentais avaliadas.

Assim, a Tabela 4 traz os valores otimizados encontrados para os parâmetros K_m'' e β . Observa-se que os valores de K_m'' não seguem uma lógica com relação as variações da temperatura ou mesmo da agitação do meio. Porém, por esta nova tabela percebe-se que os valores de β são maiores quanto maior a temperatura da água de resfriamento e maiores para situações onde o meio está agitado.

Para uma melhor avaliação deste parâmetro β estabeleceu-se o valor de K_m'' como constante para as 6 condições experimentais estudadas e através do programa computacional buscou-se novos valores ótimos para β . Neste caso, optou-se por um valor intermediário de K_m'' (Tabela 4) sendo este assumido como $0,1 \text{ min}^{-1}$.

Os valores obtidos nesta segunda seqüência de ajustes são apresentados na Tabela 5. A Figura 14 mostra os valores do segundo coeficiente de proporcionalidade

($K'_m = K''_m \exp[\beta W]$) em função da fração de água absorvida pelo frango (W), a partir dos valores mostrados na mostrado nesta Tabela 5.

As Tabelas 4 e 5 ainda apresentam a média dos erros de predição para cada uma das combinações dos valores de K''_m e β . O erro de predição é definido como:

$$\text{Erro predição} = \frac{|\text{valor predito} - \text{valor experimental}|}{\text{valor experimental}} \times 100 \quad (26)$$

Tabela 4: Valores de K''_m , β e do erro de predição médio obtidos pelo programa computacional para as diferentes condições experimentais. Passo no tempo de 0,1s.

Passo no tempo = 0,1s	β ($\text{g}_{\text{frango}} \text{g}^{-1}_{\text{água}}$)	K''_m (min^{-1})	Erro de predição
Água (1°C) Sem agitação	-297,27	0,0763	7,17%
Água (1°C) Agitação Água	-291,19	0,2883	4,47%
Água (1°C) Agitação Ar	-234,12	0,0995	5,64%
Água Ambiente (15°C) Sem Agitação	-209,24	0,0622	5,76%
Água Ambiente (15°C) Agitação Água	-201,25	0,0696	6,30%
Água Ambiente (15°C) Agitação Ar	-119,08	0,0606	7,39%

Tabela 5: Valores de β e do erro de predição médio obtidos pelo programa computacional para as diferentes condições experimentais, fixando-se $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$. Passo no tempo de 0,1s.

Passo no tempo = 0,1s	β ($\text{g}_{\text{frango}} \text{g}^{-1}_{\text{água}}$)	K_m'' (min^{-1})	Erro de predição
Água (1°C) Sem agitação	-328,68	0,1000	8,05%
Água (1°C) Agitação Água	-205,76	0,1000	8,65%
Água (1°C) Agitação Ar	-234,58	0,1000	5,64%
Água Ambiente (15°C) Sem Agitação	-255,75	0,1000	6,77%
Água Ambiente (15°C) Agitação Água	-234,61	0,1000	6,68%
Água Ambiente (15°C) Agitação Ar	-154,13	0,1000	7,51%

Observando-se o comportamento do segundo coeficiente, percebe-se que este é menor em módulo (partindo de um mesmo valor de K_m'') para a condição sob agitação do ar na temperatura de 15°C, levando a maiores valores de K_m' . Na condição de 1°C e sem agitação forçada do meio, o valor de β é o maior em módulo, conduzindo a um maior decaimento do segundo coeficiente de proporcionalidade, tendo este menores valores nesta condição do que nas demais estudadas.

Estes resultados vão de encontro ao esperado ao analisar-se o crescimento de W em função do tempo para as diferentes condições. Um maior valor de K_m' indica uma menor resistência a entrada de água na matriz sólida (carcaça de frango), aumentando assim a velocidade de absorção.

Ainda analisando a Figura 14, pode-se constatar que as duas condições de resfriamento nas quais o meio não foi agitado foram as quais apresentaram menores

valores do segundo coeficiente de proporcionalidade. Assim, demonstra-se maior influência (sobre o percentual de água absorvida pela carcaça) da variação da agitação em comparação a variação da temperatura. Esta observação também estará presente no tópico 3.2.2, a seguir.

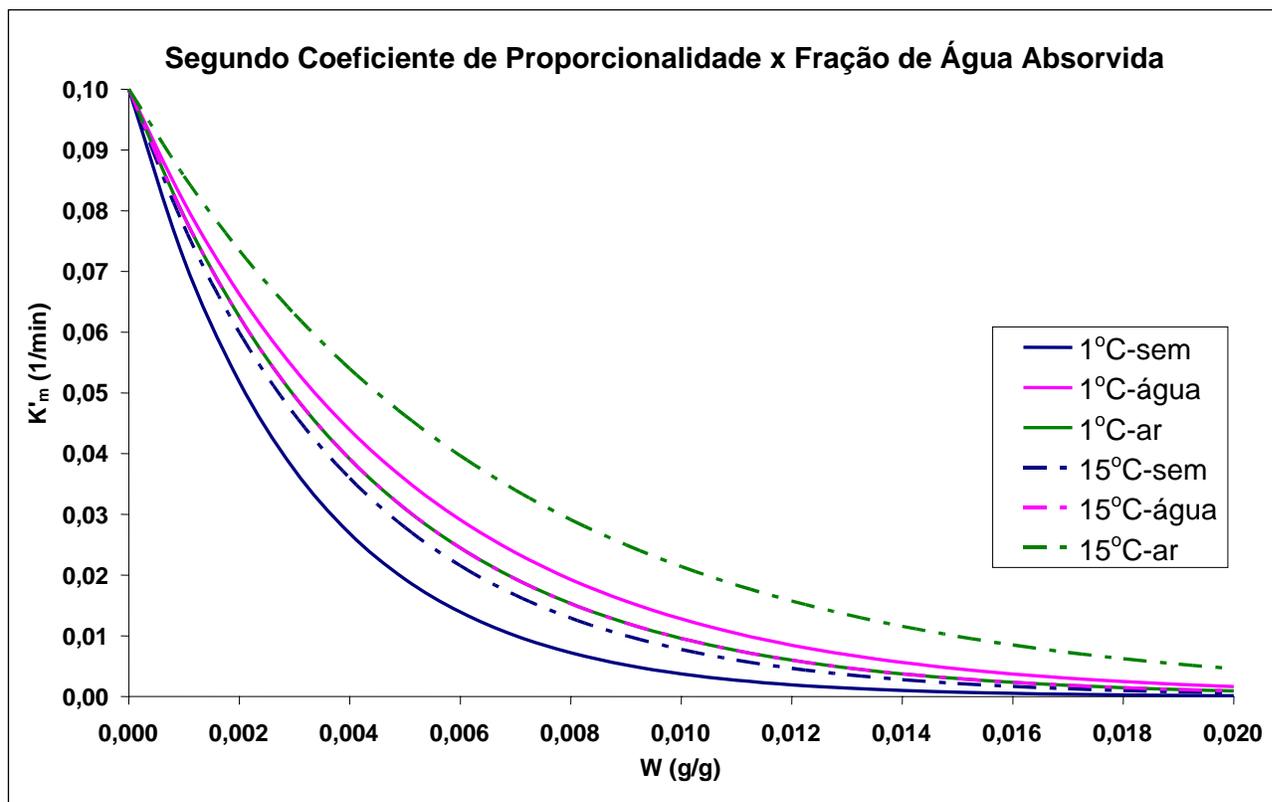


Figura 14: Valores do segundo coeficiente de proporcionalidade para transferência de massa em função da quantidade de água absorvida pela carcaça de frango, nas 6 diferentes condições de operação.

Na Figura 15 têm-se os valores experimentais e os valores calculados pelo método numérico de Runge-Kutta para a fração de água absorvida em função do tempo de imersão no meio de resfriamento, mantido a 15°C sob agitação da bomba d'água. Os gráficos para as demais condições encontram-se no Apêndice C.

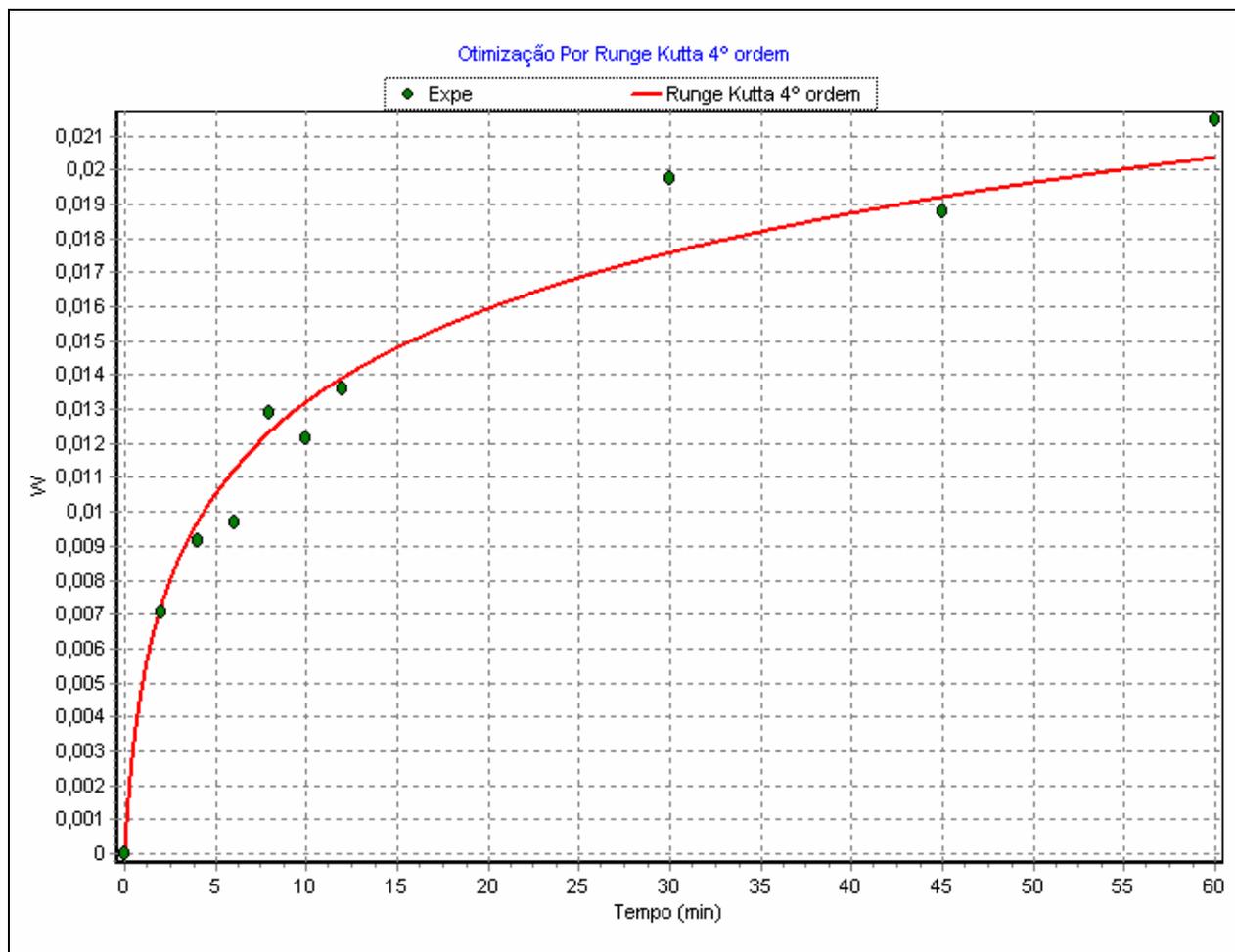
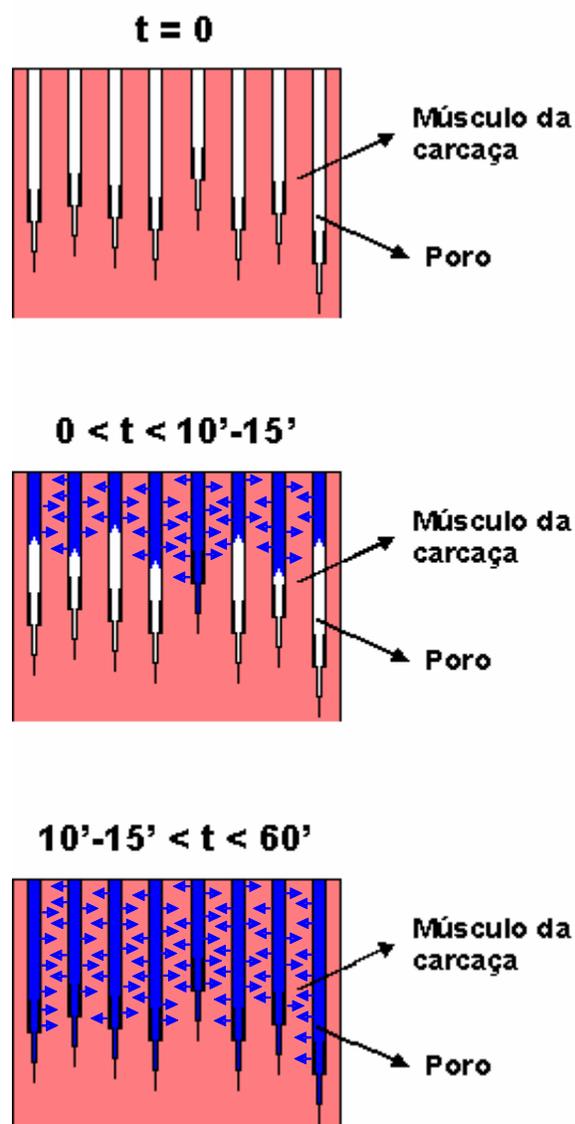


Figura 15: Gráfico da evolução da fração de água absorvida (W) em função do tempo. Valor de $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$, temperatura da água de 15°C sob agitação da bomba d'água.

Devido aos bons ajustes dos dados experimentais pelo Modelo II considerou-se que este foi adequado para descrever o fenômeno de absorção de água pelas carcaças durante o processo de resfriamento. No modelo, o valor do coeficiente de transferência de massa (K_m') variou de modo inversamente proporcional a quantidade de água absorvida pela carcaça, devido a um aumento da resistência à transferência de massa. Este aumento da resistência pode ser explicado pela saturação dos poros nas regiões mais próximas à superfície da carcaça. Assim, o processo de absorção de água passa a ser controlado pela migração interna de água que já penetrou na carcaça, mas que está próxima a superfície. A Figura 16 ilustra essa explicação dos mecanismos de transporte que controlam a absorção de água pelas carcaças.

No início do processo, o músculo peitoral (fibras e espaço interfibras) contém baixa quantidade de líquido, proporcionando maiores taxas de sorção de água. Como se verá mais adiante, esta taxa depende fortemente da pressão hidrostática agindo sobre as carcaças, o que sugere que a entrada de água nas mesmas é controlada por um mecanismo hidrodinâmico. Com o preenchimento dos espaços vazios interfibras desse tecido muscular (poros) e com a saturação da região próxima à superfície da carcaça ocorre uma queda na taxa de absorção de água, a qual passa a depender preponderantemente da migração interna da água absorvida.

Estes valores de K_m'' e β obtidos pelo ajuste da curva experimental ao modelo teórico desenvolvido são bastante específicos e se aplicam apenas às mesmas condições nas quais elas foram determinadas. Assim, qualquer alteração no meio de resfriamento, no tipo de equipamento utilizado, na distribuição das carcaças ou qualquer outra variável importante para o processo implica na necessidade de nova determinação destes parâmetros.



Início do processo ($t = 0$):

Poros livres para entrada de água proporcionando maiores taxas de absorção de água.

Etapa inicial ($0 < t < 10'-15'$):

Absorção de água pela carcaça através do mecanismo hidrodinâmico.

Etapa final ($10'-15' < t < 60'$):

Migração interna da água absorvida (mecanismo pseudo-difusivo).

Figura 16: Representação esquemática dos mecanismos que governam a absorção de água pelas carcaças.

3.2.2. Influência do Nível de Agitação na Absorção de Água pelas Carcaças

Neste item será comparada a absorção de água pelas carcaças quando submetidas à agitação pela injeção de ar a diferentes vazões. Na Figura 17, os valores médios do percentual de água absorvida são apresentados para a temperatura da água de resfriamento igual a 15°C.

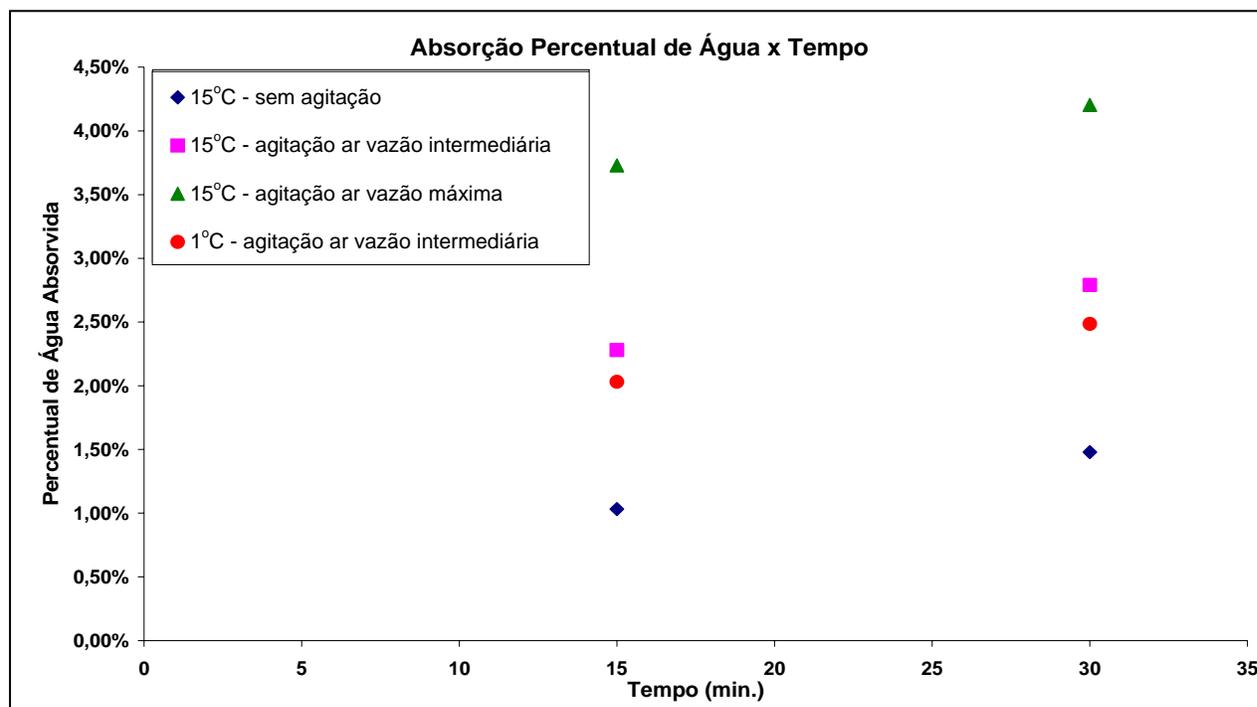


Figura 17: Absorção de água pela carcaça sob diferentes condições do meio de resfriamento agitado pela injeção de ar comprimido.

É grande a influência da vazão de ar no percentual de água absorvida pela carcaça. Nota-se na Figura 17 que quando é passado da condição de meio sem agitação (a 15°C) para agitação com vazão intermediária (a 15°C) o percentual de absorção teve um acréscimo próximo a 100%. Outro grande salto no percentual absorvido é observado quando se compara a condição de agitação pela vazão intermediária à condição de agitação pela vazão máxima de ar comprimido.

Comparando-se os dados obtidos para agitação do meio pela vazão intermediária de ar para duas temperaturas diferentes, novamente observa-se que temperaturas mais

elevadas favorecem a absorção de água. Porém, a diferença causada apenas pela variação da temperatura do meio (“1°C - agitação do ar vazão intermediária” x “15°C - agitação do ar vazão intermediária”) é pouco significativa se comparada à variação causada pelo aumento do borbulhamento no meio (“15°C - sem agitação” x “15°C - agitação ar vazão intermediária” x “15°C - agitação ar vazão máxima”).

3.2.3. Influência da Pressão Hidrostática na Absorção de Água pela Carcaça

Investigou-se a contribuição da pressão exercida pela água de resfriamento no percentual de água absorvida pela carcaça submersa. A evolução da absorção de água pelas carcaças, a três diferentes profundidades (180mm, 845mm e 1470mm), é apresentada nas Figuras 18 e 19. Os valores de percentual de água absorvida representam as médias calculadas a partir das absorções de água determinadas para 15 carcaças.

Carcaças submetidas à imersão, por um mesmo intervalo de tempo, atingiram diferentes percentuais de água absorvida para diferentes profundidades de imersão (distâncias da superfície do tanque). Os dados experimentais mostram a influência positiva da pressão hidrostática sobre a absorção de água. A maior pressão aplicada sobre a superfície da carcaça promove o escoamento da água para o seu interior. Ao se considerar que a entrada de água nas carcaças ocorre por mecanismos hidrodinâmicos, pode-se compreender que o aumento da pressão externa provoque um maior fluxo de líquido nos capilares (poros) próximos da superfície da carcaça.

Os resultados da Figura 18 indicam que a maior influência da pressão hidrostática ocorre nos primeiros 10-15 minutos. Após 30 minutos de imersão, observa-se uma diminuição das diferenças entre os percentuais de absorção de água, entre as três profundidades. Esses resultados corroboram as explicações fenomenológicas apresentadas no parágrafo anterior e no item 3.2.1.

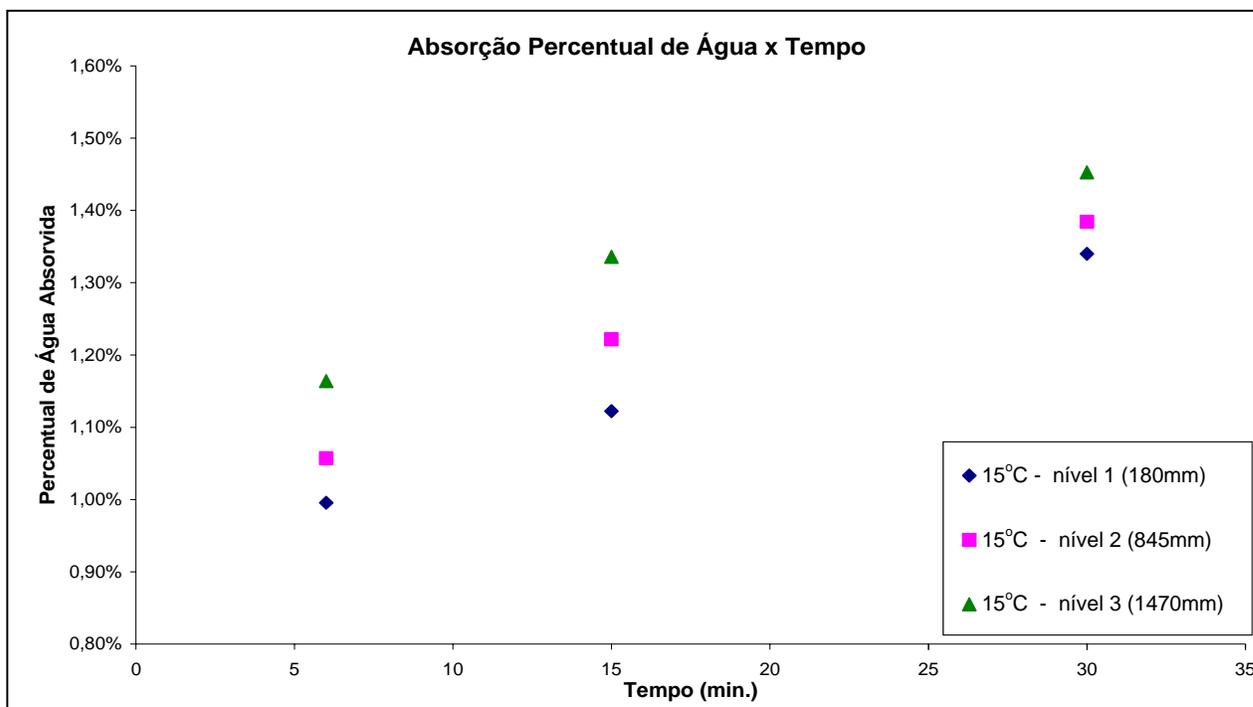


Figura 18: Absorção de água pela carcaça em função do tempo para três diferentes condições de pressão hidrostática.

Na Figura 19 apresentam-se os mesmos dados experimentais da Figura 18, mostrando a absorção de água em função da altura de coluna d'água que age sobre a carcaça. Também fica evidente o crescimento do percentual de água absorvida em função da coluna d'água.

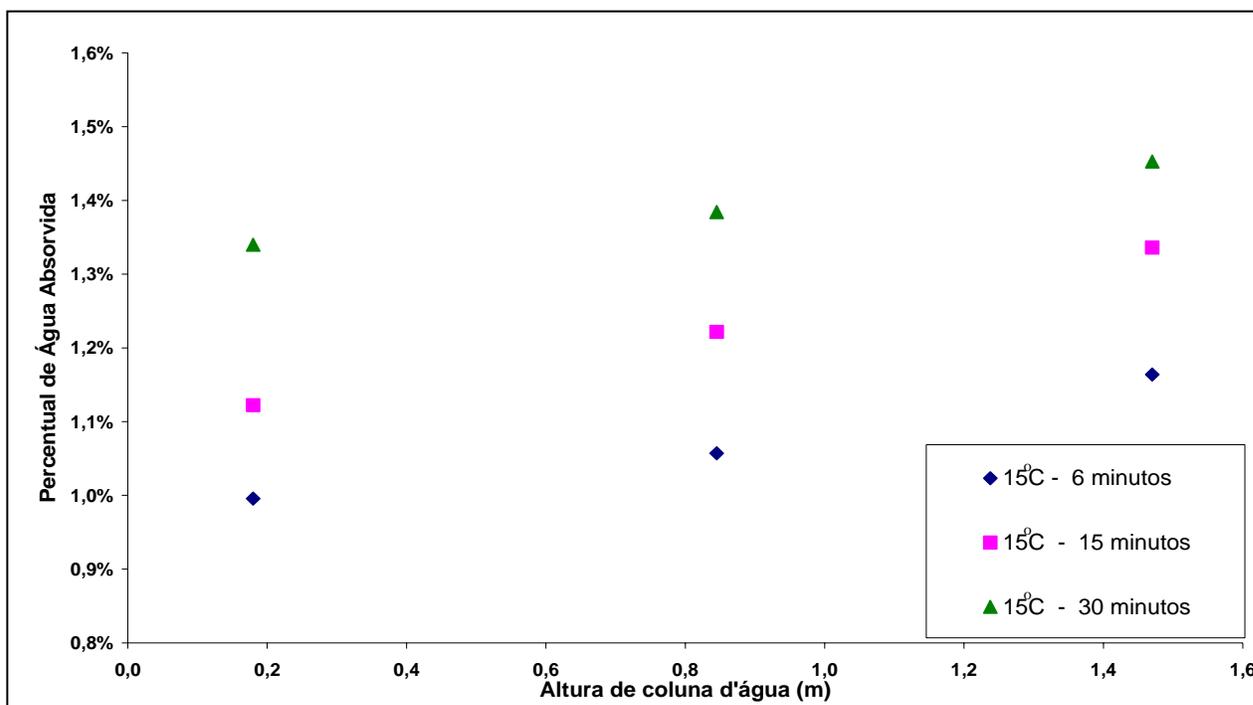


Figura 19: Evolução temporal da absorção de água pela carcaça em função da altura de coluna d'água.

3.2.4. Evolução da Temperatura das Carcaças Durante o Resfriamento

Avaliou-se a evolução temporal da temperatura em dois pontos das carcaças: no centro do músculo peitoral (T_c) e na superfície do músculo peitoral, logo abaixo da pele que o recobre (T_s).

Na Figura 20 apresentam-se os perfis de T_c e T_s para três carcaças submetidas ao resfriamento, em meio sem agitação e a 1°C . Além das temperaturas medidas nas carcaças, apresenta-se a temperatura do meio de resfriamento (T da água) e a indicação do **limite crítico** para a temperatura do centro do músculo peitoral (4°C). O limite crítico é o valor que T_c deve atingir para o processo de resfriamento da carcaça atender a todas as exigências legais e comerciais. Na legenda está indicada a massa da carcaça correspondente a cada perfil levantado.

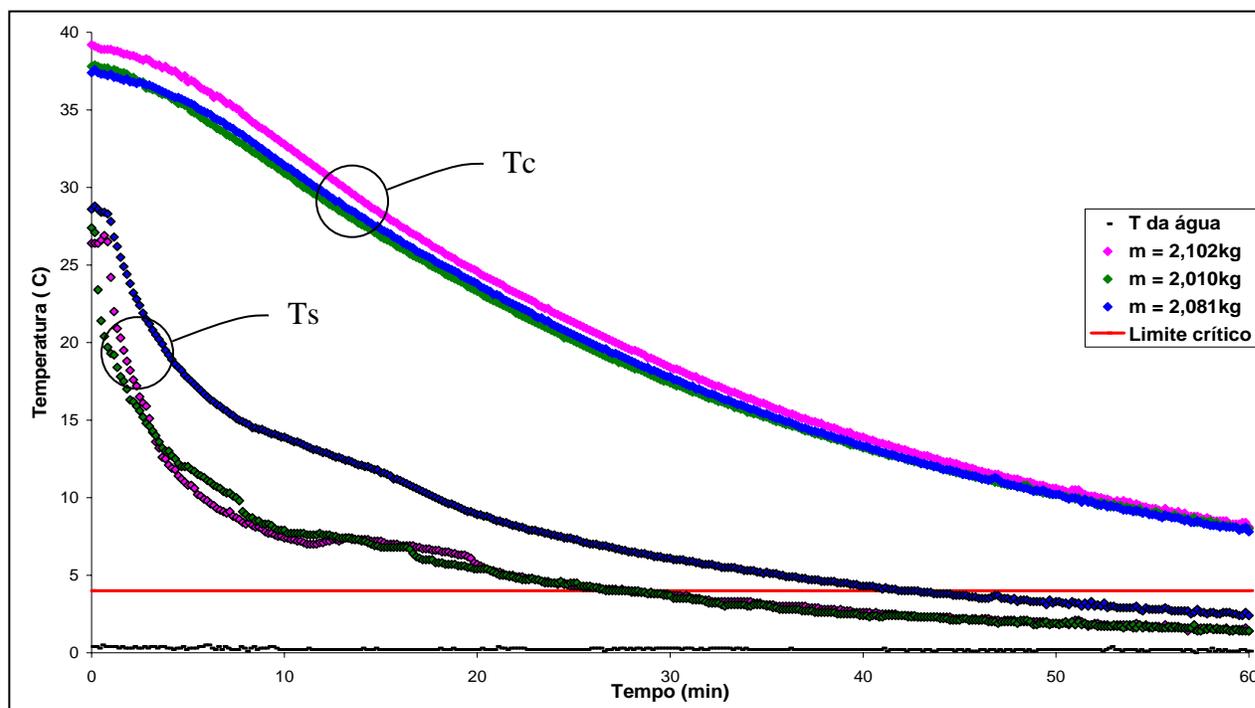


Figura 20: Perfil temporal das temperaturas T_c e T_s para água a 1°C em meio sem agitação.

Na Figura 21 são apresentadas as evoluções das temperaturas das carcaças para a situação em que a água de resfriamento foi igual a 1°C e a agitação foi promovida pela injeção de ar comprimido na vazão intermediária.

Comparando-se as Figuras 20 e 21 observa-se que, depois de decorridos 60 minutos, a T_c para o meio agitado atinge valores muito próximos ao limite crítico, enquanto no meio sem agitação forçada, T_c encontra-se cerca de 5°C acima deste valor.

Os valores de T_s no meio sob agitação diminuem muito mais rapidamente. Na ausência de agitação, T_s atinge o valor do limite crítico depois de 25 minutos, enquanto nas condições dadas na Figura 21 este limite é atingido após 5-8 minutos de imersão.

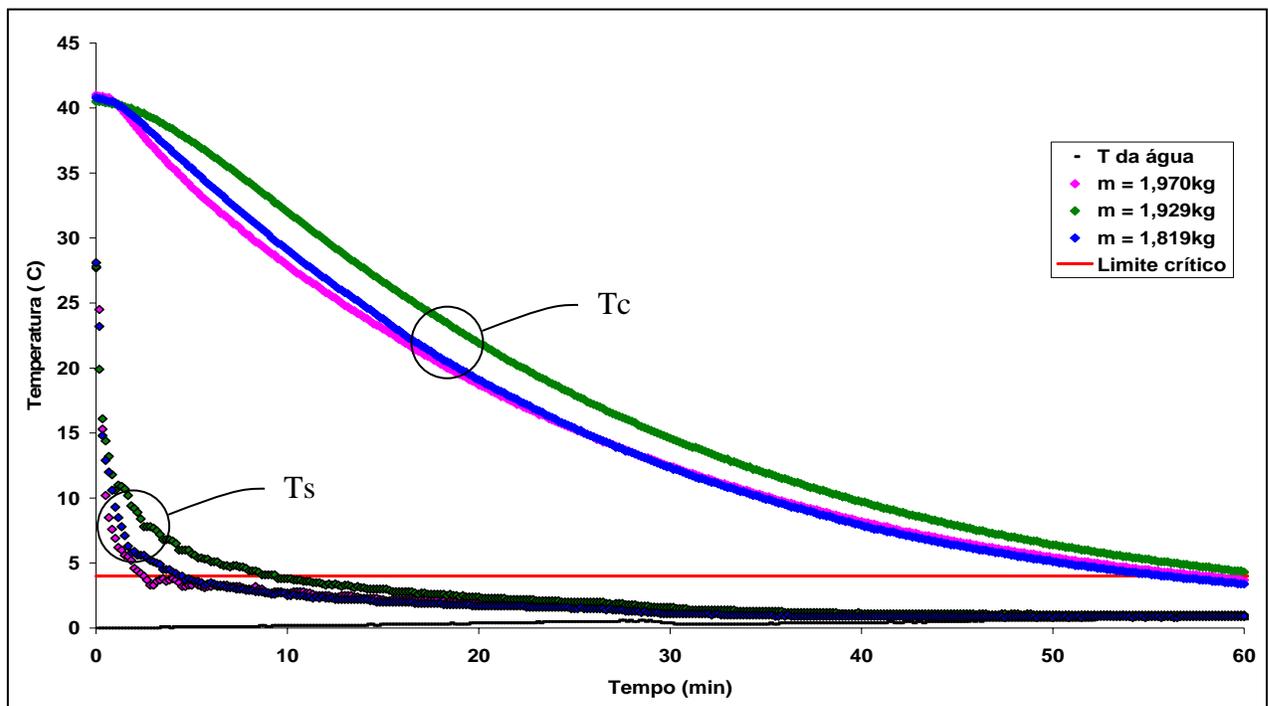


Figura 21: Perfil temporal das temperaturas Tc e Ts para água a 1°C em meio agitado pela injeção de ar (vazão intermediária).

A curva experimental da evolução da temperatura do centro do músculo peitoral com o tempo apresenta uma forma característica de processos regidos pelo mecanismo difusivo, conforme era esperado. Embora o mecanismo de transferência de calor difusivo seja determinante na forma da curva de resfriamento, também fica evidente que a transferência de calor por convecção, promovida pela movimentação do meio de resfriamento, aumentou a velocidade da redução de Tc. Este fato é evidenciado em todas as curvas de resfriamento. Assim, confirma-se que tanto a resistência à transferência de calor condutiva (no interior da carcaça) quanto a resistência à transferência de calor convectiva (entre a carcaça e o meio de resfriamento) são significantes no processo de resfriamento de carcaças por imersão.

Os perfis de temperatura para o meio de resfriamento à temperatura mais elevada (15°C) são apresentados na Figura 22. Neste caso, o meio não estava sob nenhuma condição de agitação forçada.

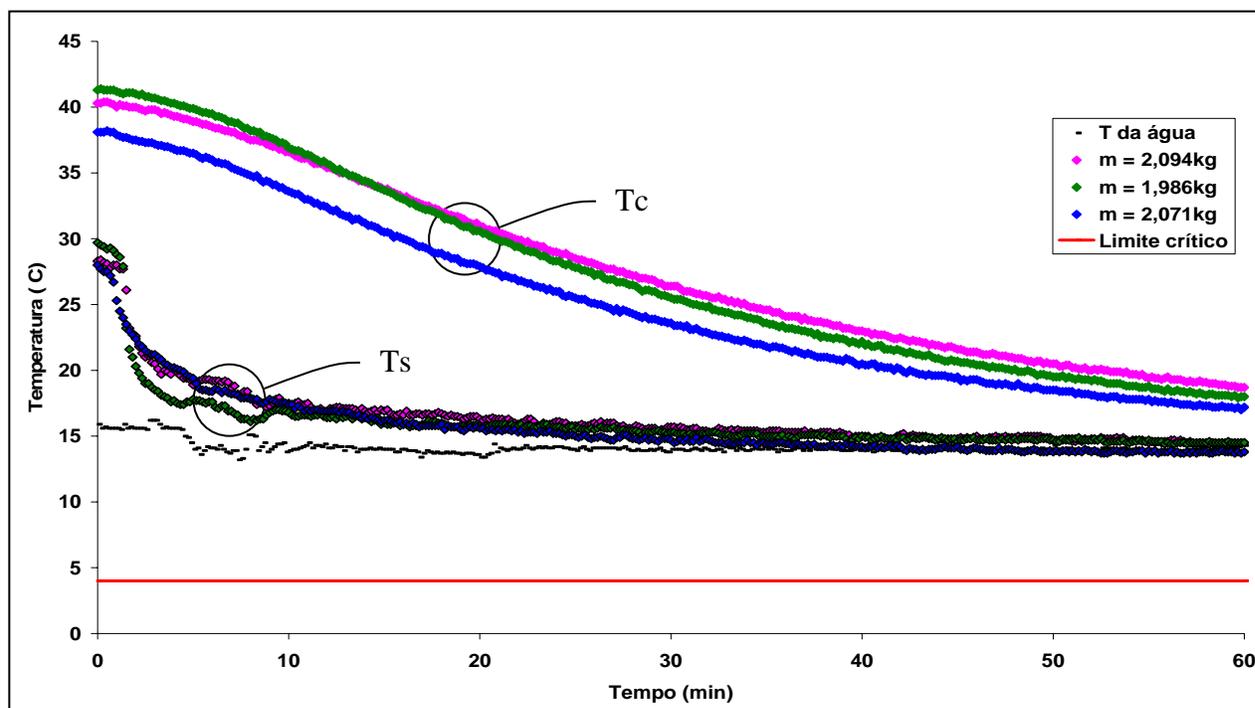


Figura 22: Perfil de temporal das temperaturas T_c e T_s para água a 15°C em meio sem agitação.

Dadas as dificuldades impostas pela geometria das carcaças para o uso de um modelo matemático baseado nos fenômenos de transferência de calor, ajustaram-se equações polinomiais e exponenciais aos dados experimentais de $T_c \times t$.

Nas três condições onde a temperatura do meio de resfriamento foi de 1°C , o perfil temporal de T_c foi ajustado por duas equações. No primeiro intervalo de tempo, do início do processo até o décimo minuto, o perfil parabólico ($y = ax^2 + bx + c$, onde a , b e c são os parâmetros a serem ajustados) foi o que melhor representou os dados experimentais. Do décimo ao sexagésimo minuto, o perfil que se apresentou mais adequado foi o exponencial ($y = p \exp(qx)$, onde p e q são os parâmetros a serem determinados).

Nas Figuras 23 e 24 apresentam-se os dados experimentais de $T_c \times t$ e as equações ajustadas aos mesmos, no período de 0-10 minutos e 10-60 minutos, respectivamente.

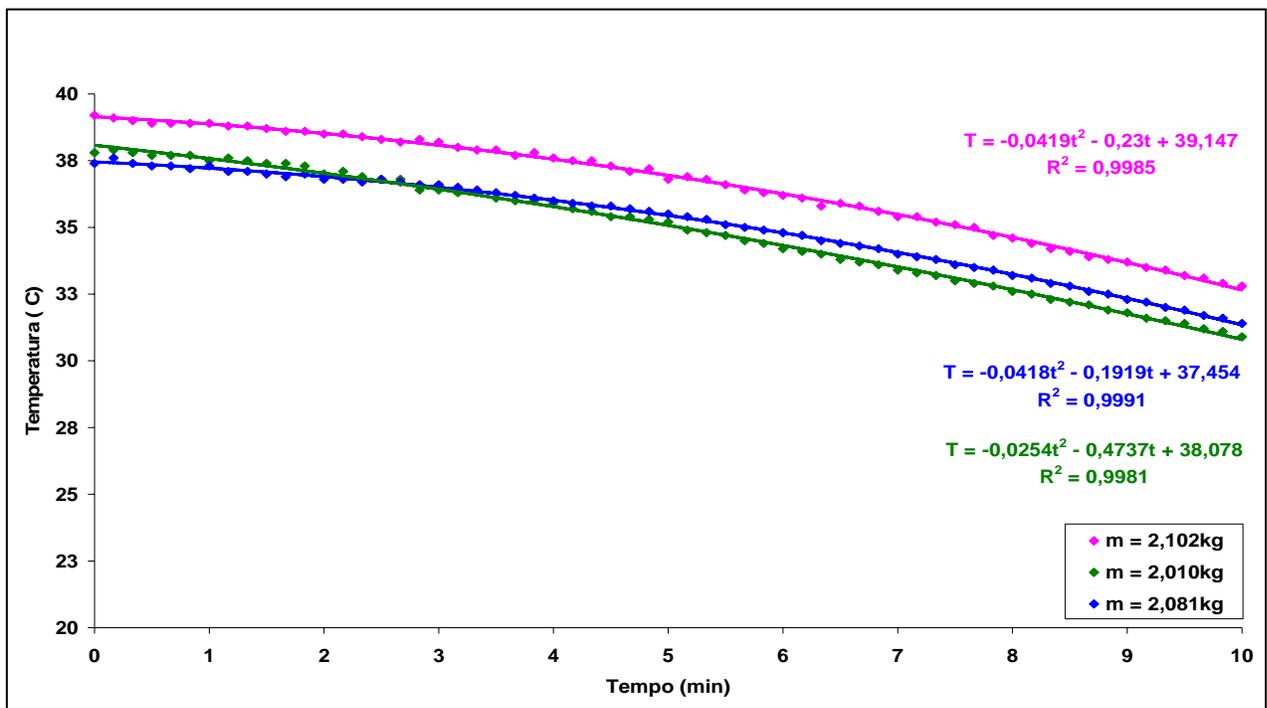


Figura 23: Ajuste dos dados experimentais por equações parabólicas, nos primeiros 10 minutos de imersão, para testes a 1°C.

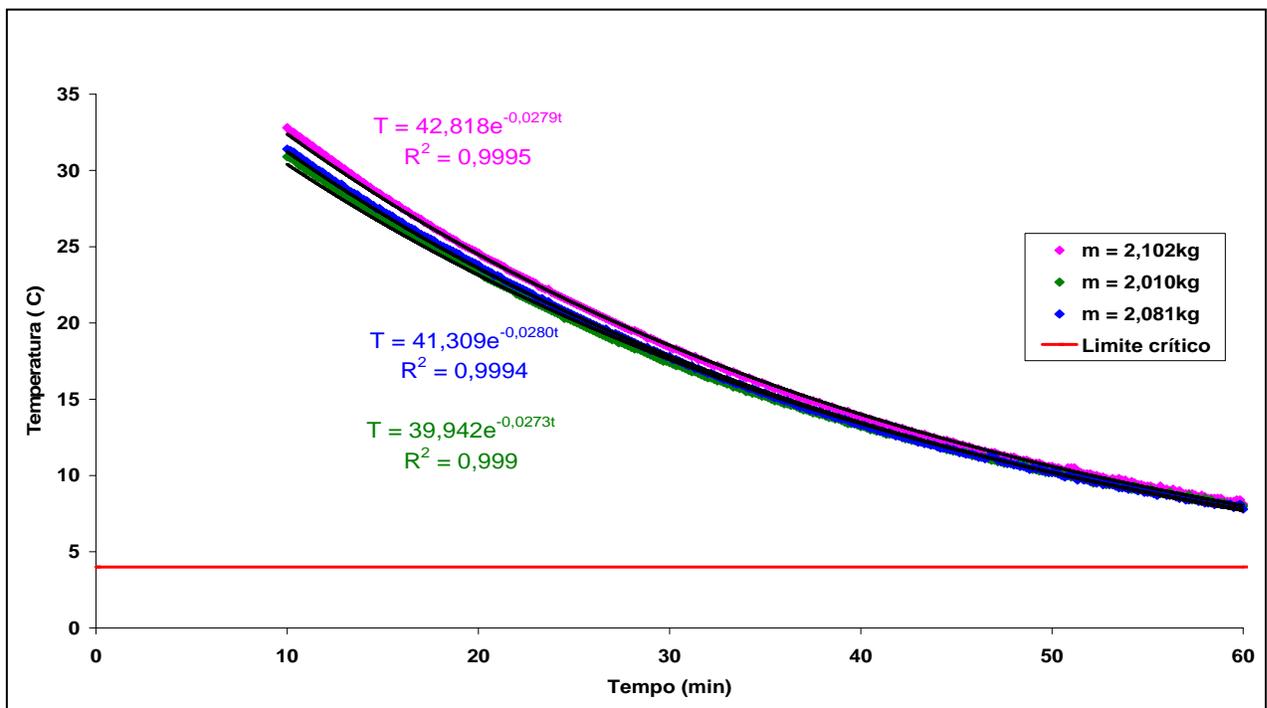


Figura 24: Ajuste dos dados experimentais por equações exponenciais, do décimo ao sexagésimo minuto, para testes a 1°C.

Para os processos onde a temperatura da água foi mantida a 15°C, os dados de T_c em função do tempo puderam ser ajustados por uma única equação. O melhor ajuste obtido foi pelas equações polinomiais do segundo grau ($y = ax^2 + bx + c$). A Figura 25 traz o ajuste para os mesmos dados apresentados na Figura 22, onde o meio de resfriamento está a 15°C e sem agitação forçada.

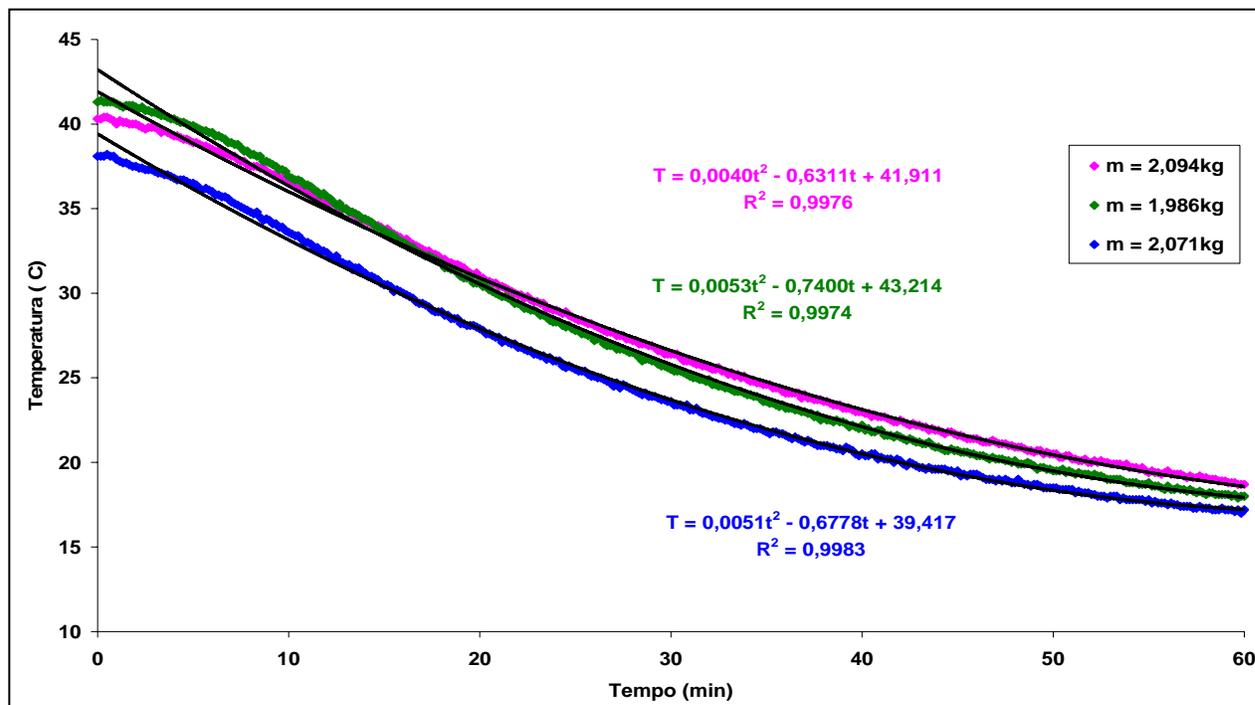


Figura 25: Ajuste dos dados experimentais por equações parabólicas para ensaios a 15°C.

Na Tabela 6 apresenta-se um resumo dos valores médios dos parâmetros ajustados para o processo de resfriamento quando o meio encontrava-se a 1°C. Para a equação exponencial, aparece o parâmetro anteriormente denominado q e para a equação parabólica os parâmetros a e b . Os outros dois parâmetros: p (equação exponencial) e c (equação polinomial), embora apareçam nas equações ajustadas, não foram considerados, pois estes representam justamente a temperatura T_c no início do processo de resfriamento. Esta tabela também apresenta os valores do coeficiente de correlação (R^2) para os dois ajustes.

Tabela 6: Valores médios dos parâmetros q , a e b e dos coeficientes de correlação R^2 referentes às duas equações ajustadas, nas condições de operação a 1°C.

	q	R^2 - exp.	a	b	R^2 - parab.
Água (1°C) Sem agitação	-0,0299	0,9992	-0,0403	-0,2990	0,9982
Água (1°C) Agitação Água	-0,0375	0,9997	-0,0362	-0,5386	0,9983
Água (1°C) Agitação Ar	-0,0404	0,9995	-0,0389	-0,6201	0,9980

Os coeficientes de correlação obtidos nestes ajustes estiveram muito próximos a um, indicando que os modelos empíricos propostos foram adequados para a representação matemática dos dados experimentais.

O valor do parâmetro ajustado q é maior, em módulo, na condição em que o meio de resfriamento é agitado com ar. Para o meio não agitado, este parâmetro apresentou o seu menor valor modular. Quanto maior o módulo deste parâmetro, mais rapidamente decresce o valor de T_c . Assim, pode-se, a partir dele, ordenar as condições mais eficientes para o resfriamento: agitação com ar comprimido, seguido da agitação por bomba d'água e por último, o meio sem agitação.

Os valores dos parâmetros a e b e dos coeficientes de correlação R^2 para os processos cujo meio de resfriamento esteve a 15°C estão na Tabela 7. Nestes ajustes, os coeficientes de correlação também estiveram próximos a um.

Outra análise pode ser feita através dos dados destes experimentos de resfriamento. A Tabela 8 indica os valores da temperatura inicial do centro do músculo peitoral, desta mesma temperatura ao final de 60 minutos e a sua variação ao longo do experimento, para cada uma das três condições de resfriamento a 1°C.

Tabela 7: Valores médios dos parâmetros a e b e do coeficiente de correlação R^2 referentes à equação ajustada, nas condições de operação a 15°C.

	a	b	R^2 - parab.
Água Ambiente (15°C) Sem Agitação	0,0057	-0,7189	0,9982
Água Ambiente (15°C) Agitação Água	0,0066	-0,7839	0,9954
Água Ambiente (15°C) Agitação Ar	0,0076	-0,8649	0,9978

Tabela 8: Valores médios de T_c , em $t = 0$ e $t = 60$ min, e da variação de T_c ocorrida neste intervalo, nas condições de operação a 1°C.

	T inicial (°C)	T em 60min. (°C)	ΔT em 60min. (°C)
Água 1°C Sem Agitação	38,3	7,2	31,0
Água 1°C Agitação Água	39,5	5,0	34,5
Água 1°C Agitação Ar	38,7	4,0	34,7

Nos meios onde houve agitação, a temperatura do centro do músculo peitoral ao final do processo foi menor, atingindo o valor de 4°C no caso do meio agitado pela injeção de ar. Em ambos os meios sob agitação, a variação da temperatura ao longo do 60 minutos foi cerca de 3,5°C maior em relação ao meio não agitado.

Quando o meio de resfriamento foi mantido a 15°C, temperatura comumente utilizada nos pré-chillers, os valores de T_c depois de 10 minutos do início do experimento

e ao final dele (60 minutos) foram analisados. Estes dados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Valores médios de T_c , em $t = 0$, $t = 10$ min e $t = 60$ min, e da variação de T_c ocorrida neste intervalo, nas condições de operação a 15°C .

	T inicial ($^\circ\text{C}$)	T em 10min. ($^\circ\text{C}$)	T em 60min. ($^\circ\text{C}$)	ΔT 10min. ($^\circ\text{C}$)	ΔT 60min. ($^\circ\text{C}$)
Água 15°C Sem Agitação	39,8	34,5	18,0	5,3	21,9
Água 15°C Agitação Água	39,8	34,2	17,3	5,6	22,5
Água 15°C Agitação Ar	40,1	33,8	16,4	6,3	23,7

No intervalo de resfriamento representado pelos primeiros 10 minutos, a agitação mostrou contribuir positivamente na diminuição de T_c . O meio onde não foi imposta qualquer agitação teve a menor variação de temperatura, sendo os valores de T_c ao final do décimo e do sexagésimo minuto maiores que as temperaturas das outras duas condições. Novamente o meio agitado pelo ar comprimido apresentou as maiores reduções de temperatura.

Os resultados das evoluções das temperaturas das carcaças resfriadas sob diferentes tempos de agitação são apresentados na Tabela 10. Foram utilizadas as seguintes condições: sem agitação, agitação nos primeiros 30 minutos, agitação nos primeiros 40 minutos, agitação nos primeiros 50 minutos e agitação durante 60 minutos.

Tabela 10: Valores médios de T_c , em $t = 0$ e $t = 60$ min, e da variação de T_c ocorrida neste intervalo, nas condições de operação a 1°C , variando o tempo de injeção de ar.

	T inicial ($^\circ\text{C}$)	T em 60min. ($^\circ\text{C}$)	ΔT em 60min. ($^\circ\text{C}$)
Água (1°C) Sem agitação	38,3	7,2	31,0
Água (1°C) Agitação Ar 30'	39,8	5,8	33,9
Água (1°C) Agitação Ar 50'	39,3	5,2	34,1
Água (1°C) Agitação Ar 50'	39,2	4,9	34,3
Água (1°C) Agitação Ar 60'	38,7	4,0	34,7

A temperatura da superfície do músculo peitoral (T_s) decai rapidamente em condições de resfriamento onde o meio encontra-se agitado (tempo inferior a 10 minutos para meio agitado pela injeção de ar), conforme exemplificado na Figura 21. Mesmo assim, a manutenção da agitação do meio durante todo o processo de resfriamento garante uma maior velocidade na redução de T_c . O experimento no qual o ar esteve ligado durante todo o teste apresentou a maior variação de T_c no intervalo de tempo estudado. A explicação para isso é que, ao interromper-se a agitação do meio, a resistência à transferência de calor convectiva foi aumentada e a renovação da água localizada na cavidade interna da carcaça foi dificultada. Estes dois aspectos influenciaram para uma menor redução de T_c nos ensaios onde a injeção de ar foi interrompida antes do sexagésimo minuto.

Conclusões

Os resfriadores de carcaças por imersão (*chillers*) apresentam deficiências operacionais que precisam ser alteradas, possibilitando o aumento da sua eficiência. É possível obter-se um processo que propicie melhores resultados quanto ao resfriamento das carcaças, sem que seja necessário um maior consumo de recursos e bens não renováveis (água, energia elétrica, entre outros). Para isto, alguns pontos-chave devem ser considerados: a otimização da circulação da água de resfriamento dentro do equipamento; a otimização da distribuição de gelo ao longo do mesmo; a desobstrução da área da secção transversal ao fluxo de água; a descompactação do aglomerado de carcaças formado ao fundo do equipamento; a busca, ainda maior, pela padronização da matéria-prima utilizada e a melhoria do sistema de transporte das carcaças no interior do *chiller*.

A evolução temporal do percentual de água absorvido pelas carcaças sofre influência positiva da temperatura do meio (em maiores temperaturas, maior a absorção de água pela carcaça), do grau de agitação do mesmo (quanto maior a agitação, mais facilmente a água é incorporada à carcaça) e da pressão da coluna d'água sobre a carcaça (maiores pressões induzem a maiores percentuais de água absorvida). O segundo coeficiente de absorção depende da quantidade de água já absorvida, conforme o segundo modelo matemático proposto. Uma maior temperatura da água de imersão e um maior grau de agitação do meio de resfriamento forneceram maiores valores para o segundo coeficiente de transferência de massa (K'_m), significando maior ganho de massa de água pela carcaça em um determinado intervalo de tempo. A

combinação de maior temperatura do meio com injeção de ar comprimido mostrou efeito sinérgico, potencializando a quantidade de água absorvida pela carcaça.

Aumentando-se a agitação do meio de resfriamento, mais rápida foi a redução da temperatura do centro do músculo peitoral. As resistências à transferência de calor convectiva e condutiva mostraram-se importantes durante todo o período de resfriamento. Dentro do tempo de duração dos experimentos (60 minutos), apenas o meio agitado pela injeção de ar comprimido, com a água de resfriamento sempre a 1°C, atingiu o valor objetivo da temperatura do centro do músculo peitoral, ou seja, o limite crítico de 4°C. Excelentes ajustes matemáticos dos perfis temporais da temperatura T_c foram obtidos por equações parabólicas (do início do processo até o décimo minuto) e por equações exponenciais (do décimo minuto ao final do processo) para o meio de resfriamento a 1°C. Nos experimentos onde o tempo de injeção de ar variou, conclui-se que, mesmo ao final do processo de resfriamento, a resistência convectiva à transferência de calor não pode ser desprezada. Assim, a manutenção da agitação durante todo o processo de resfriamento contribuiu para uma maior velocidade de redução da temperatura do centro do músculo peitoral, mesmo durante a etapa final dos experimentos.

Este trabalho contribuiu com conhecimentos em uma área desprovida de informações de domínio científico público. As observações fenomenológicas e os modelos matemáticos aqui propostos preenchem parte desta lacuna sobre o processo de resfriamento da carcaça de frango. Isto possibilita responder a algumas questões sobre o comportamento da temperatura do centro do músculo peitoral e sobre o percentual de água incorporado à massa da carcaça, bem como comprovar a influência de alguns dos principais parâmetros de processo. A atuação sobre as variáveis operacionais apontadas, aliada às informações sobre o comportamento fenomenológico da transferência simultânea de calor e massa, poderá ser útil para a melhoria do processo de resfriamento das carcaças.

As seguintes propostas ficam como sugestões para trabalhos futuros.

- A investigação da influência da massa da carcaça na cinética de absorção de água e na evolução das temperaturas.
- Estudo da distribuição da temperatura no interior do *chiller* industrial, incluindo as zonas de escoamento preferencial e de estagnação.
- Determinação de coeficientes de transferência de calor convectivos médios nas diferentes regiões do *chiller*.
- Medição do grau de agitação promovido pela injeção de gás, relacionando a vazão de ar comprimido injetado com o volume e a altura da água no tanque.
- Estudo de um processo misto de resfriamento, alternando o uso de água fria e ar com baixa umidade relativa.

Referências Bibliográficas

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES E EXPORTADORES DE FRANGOS. Disponível em <www.abef.com.br> Acesso em: 17 de janeiro de 2005.
2. Ministério da Agricultura e do Abastecimento – Secretaria de Defesa Agropecuária. *“Anexo I – Regulamento Técnico da Inspeção Tecnológica e Higiénico-Sanitária de carne de aves”*. Disponível em <www.agricultura.gov.br> Acesso em: janeiro de 2004
3. DINÇER, I. (1997). *“Heat Transfer in Food Cooling Applications”* – Ed. Taylor & Francis, Washington, D.C., pág. 1.
4. SAKAMOTO, F. T. C. (1999). *“Proposta de um Sistema de Informações para Indústria Avícola Consistente com os Conceitos de Excelência Produtiva. Enfoque nos Segmentos de Commodity e Semi-Commodity”* - Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção/CTC/UFSC. Florianópolis – SC.
5. AVICULTURA INDUSTRIAL. Disponível em <www.aviculturaindustrial.com.br> Acesso em: junho de 2004.
6. ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2002), Inc. *“2002 ASHRAE HANDBOOK – Refrigeration”* – SI edition.

7. FRIGOMAQ - INDÚSTRIA DE MÁQUINAS FRIGORÍFICAS CHAPECÓ LTDA. Disponível em <www.frigomaq.com.br> Acesso em: junho de 2004.
8. NEVES FILHO, L. C. (1978). *“Estudo de Algumas Variáveis no Resfriamento Contínuo por Imersão de Frango”* – Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos), FEA/UNICAMP. Campinas-SP.
9. LAURINDO, J. B; HENSE, H; CARCIOFI, B. (2003). Relatórios 1, 2 e 3 do projeto “Desenvolvimento tecnológico dos processos industriais da Perdigão”, sub-projeto “Resfriamento e congelamento de carcaças e de corte de aves”. Videira-SC.
10. INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. (1998). *“Fundamentos de Transferência de Calor e Massa”* – Ed. LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro - RJ, 4ª. edição, págs. 2, 118-120, 154, 448.
11. BENNETT, C. O.; MYERS, J. E. (1978). *“Fenômenos de Transporte – Quantidade de Movimento, Calor e Massa”* – Ed. McGraw-Hill, São Paulo-SP, p. 248.
12. SINGH, R. Paul., HELDMAN, Dennis R. (1993). *“Introduction to food engineering”*. 2ª edição. Academic Press, San Diego, USA.
13. SPIEGEL, M. R.; (1968). *“Mathematical Handbook of Formulas and Tables”* – Schaum’s Outline Series, McGraw-Hill Book Company, USA.
14. GOMES-RUGGIERO, M. A.; LOPES, V. L. R. (1996). *“Calculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais.”* – Editora Makron Books, Rio de Janeiro – RJ, 2ª. Edição, págs. 326-339.

Apêndice A

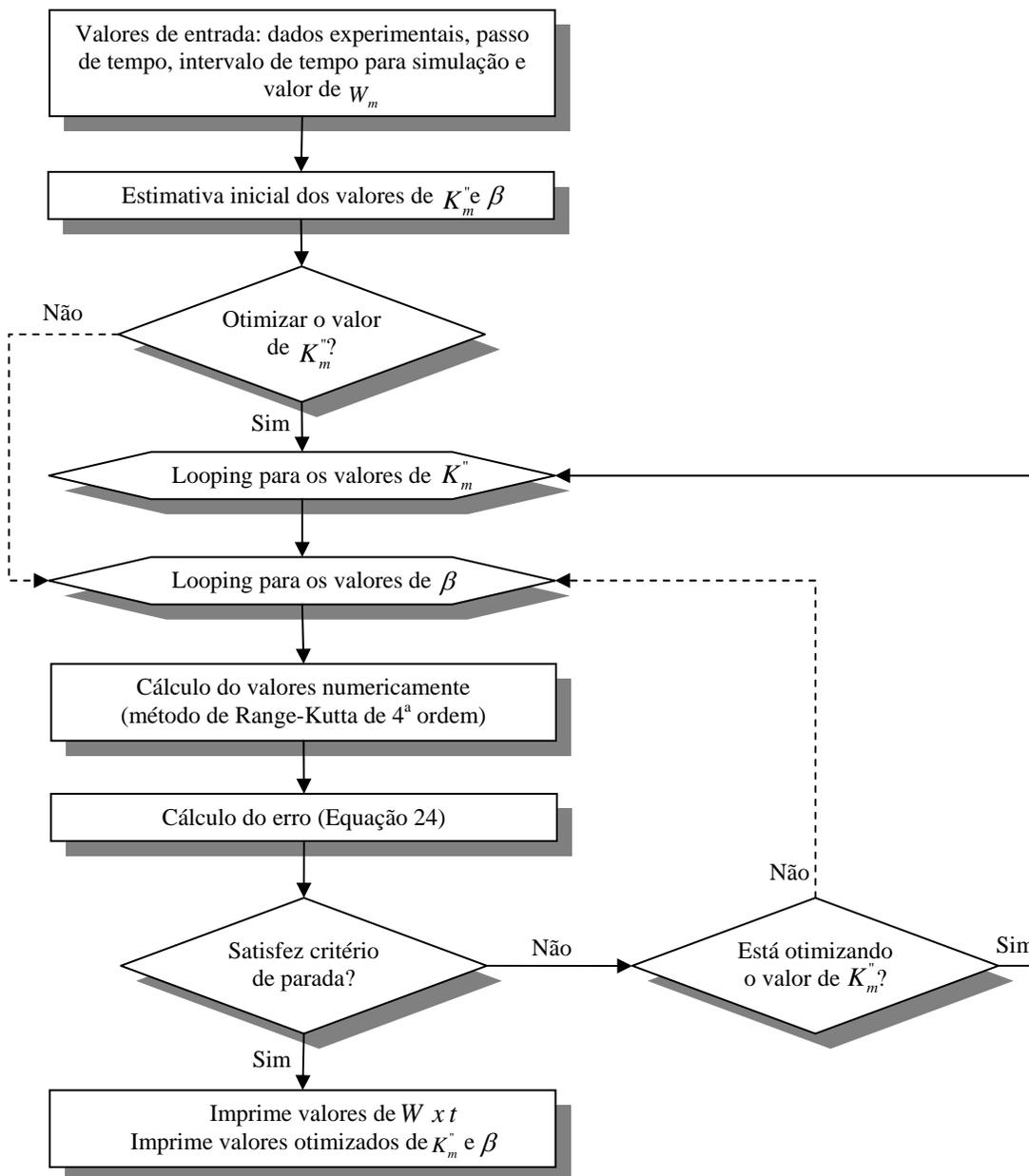


Figura A-1: Diagrama de blocos representativo do algoritmo para o programa computacional construído.

Apêndice B

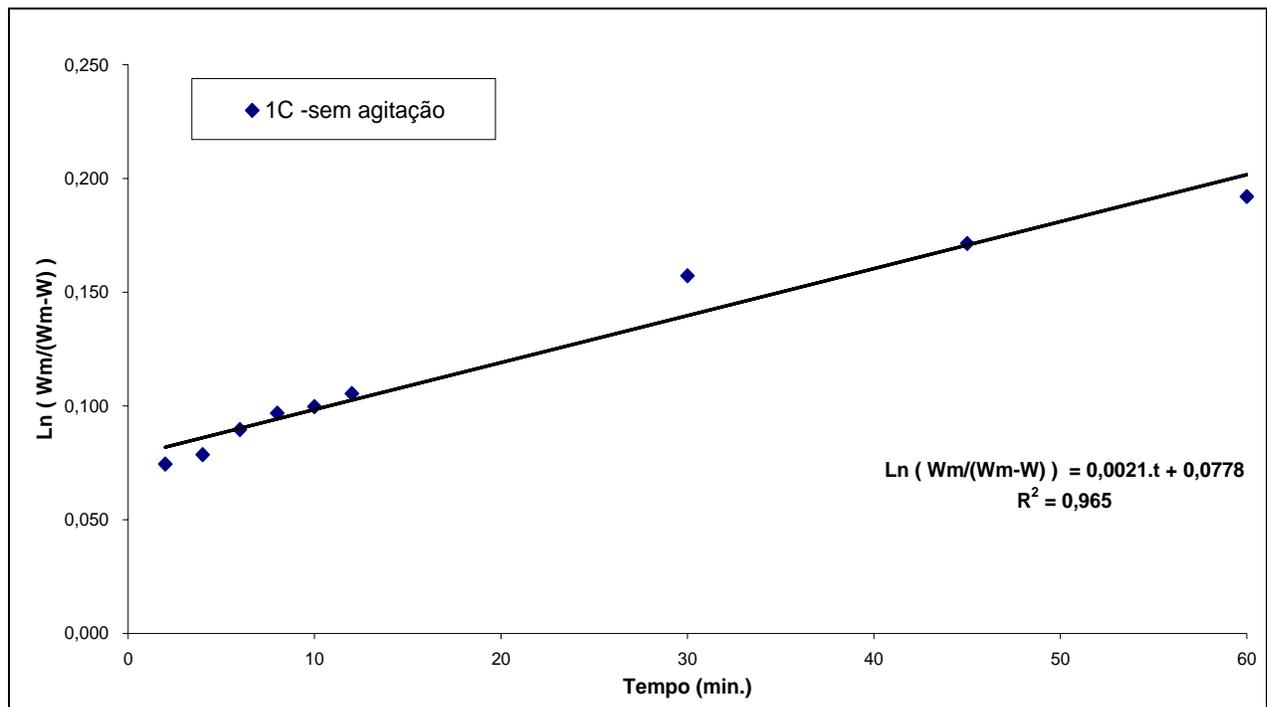


Figura B-1: Gráfico e equação linearizada pelo o Modelo II para meio de resfriamento sem agitação e temperatura da água a 1°C.

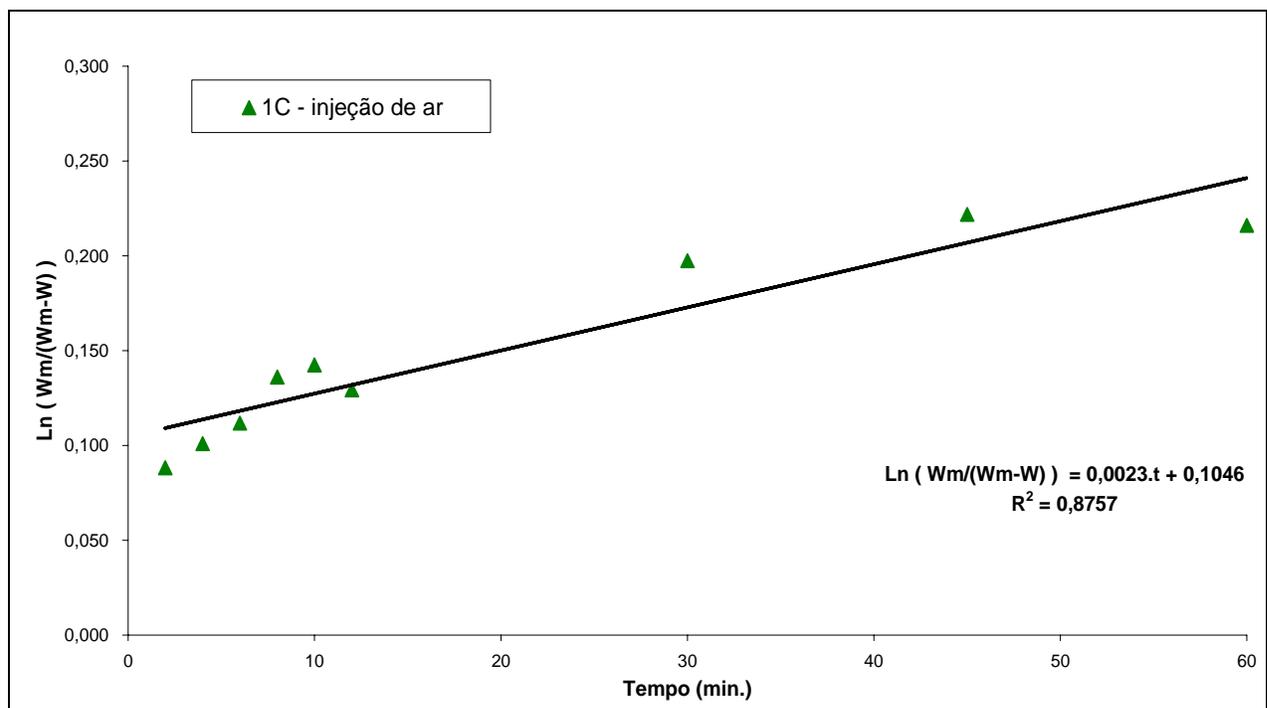


Figura B-2: Gráfico e equação linearizada pelo o Modelo II para meio de resfriamento agitado por injeção de ar comprimido e temperatura da água a 1°C.

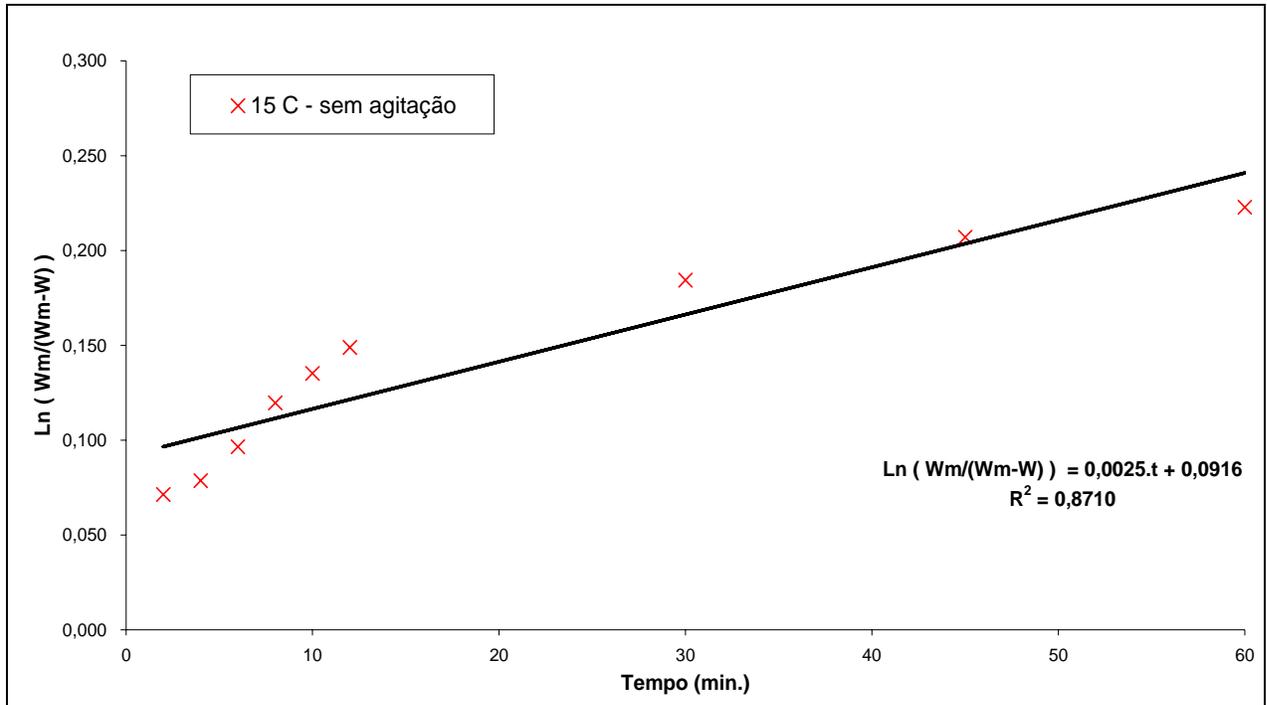


Figura B-3: Gráfico e equação linearizada pelo o Modelo II para meio de resfriamento sem agitação e temperatura da água a 15°C.

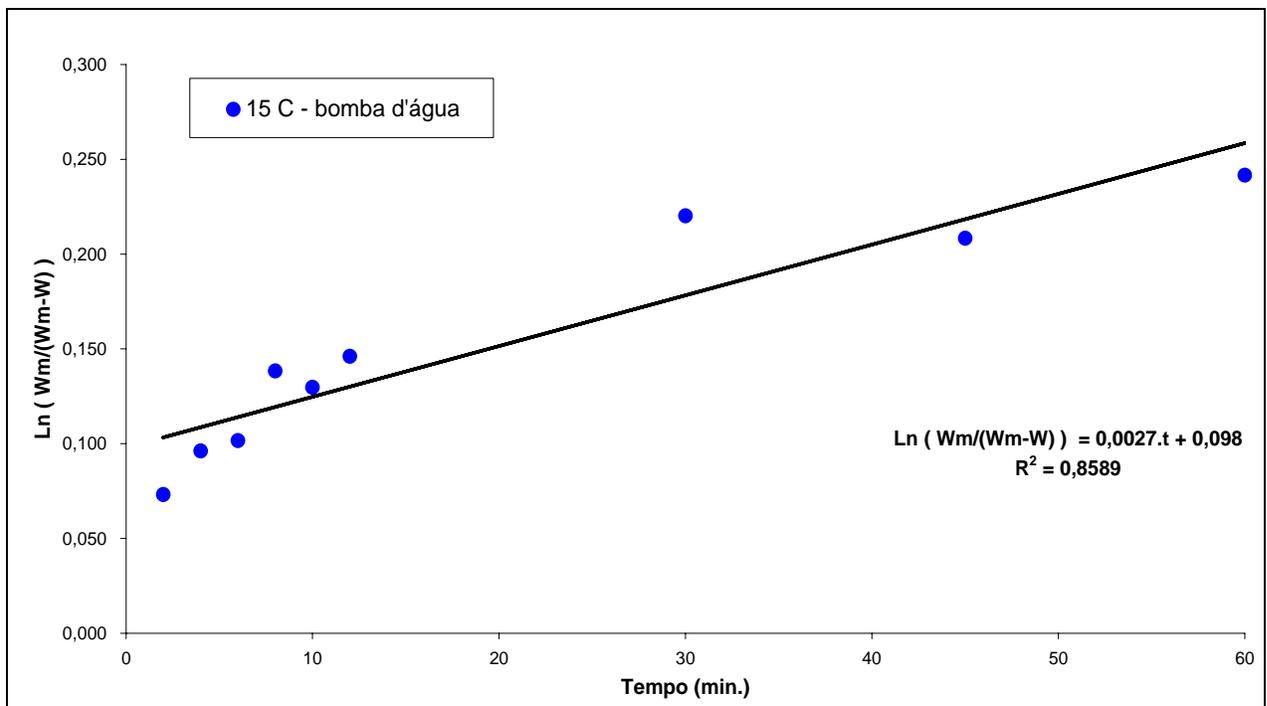


Figura B-4: Gráfico e equação linearizada pelo o Modelo II para meio de resfriamento agitado por bomba d'água e temperatura da água a 15°C.

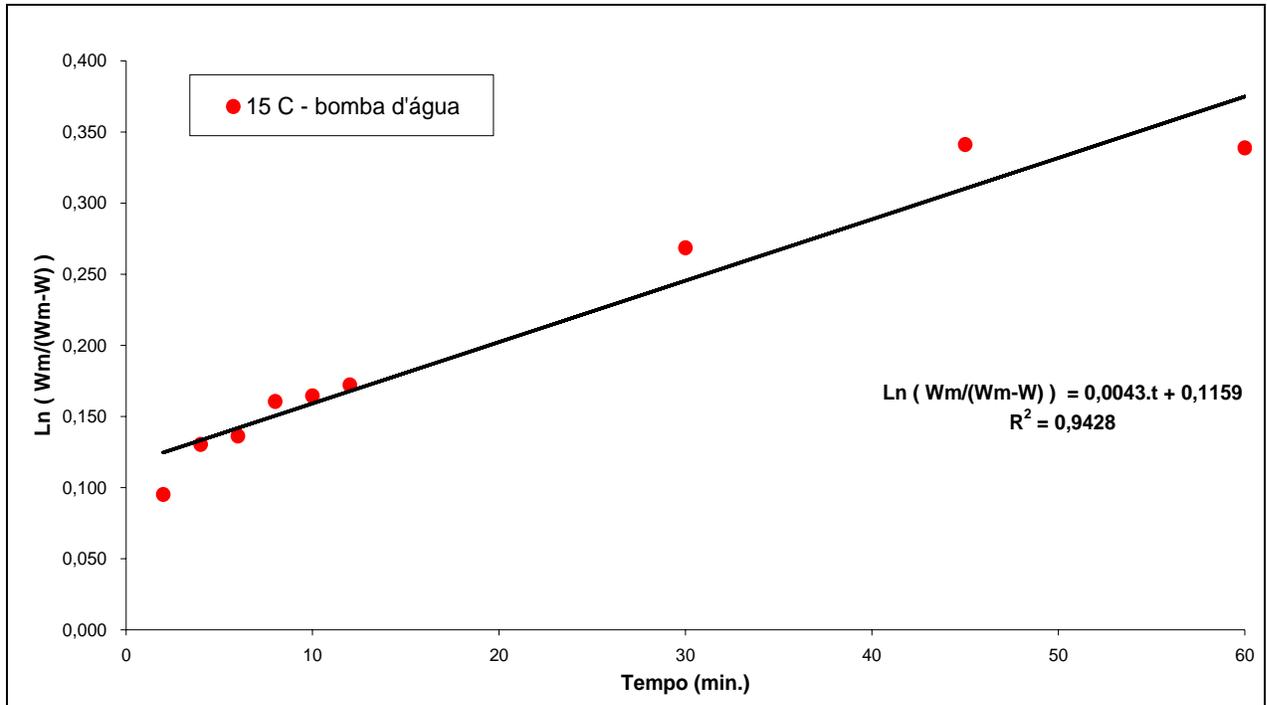


Figura B-5: Gráfico e equação linearizada pelo o Modelo II para meio de resfriamento agitado por injeção de ar comprimido e temperatura da água a 15°C.

Apêndice C

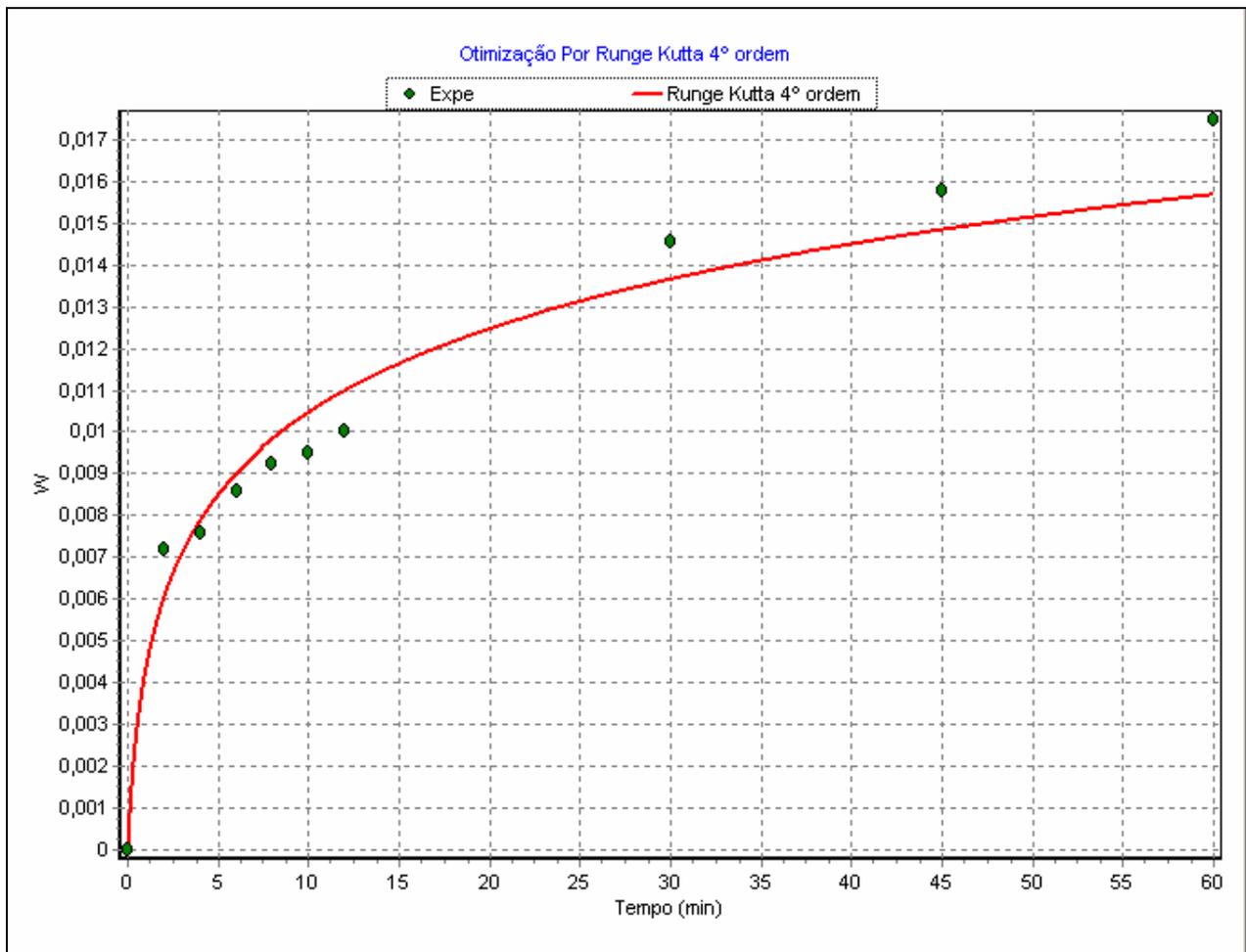


Figura C-1: Gráfico da evolução da fração de água absorvida (W) em função do tempo.

Valor de $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$, temperatura da água de 1°C sem agitação forçada.

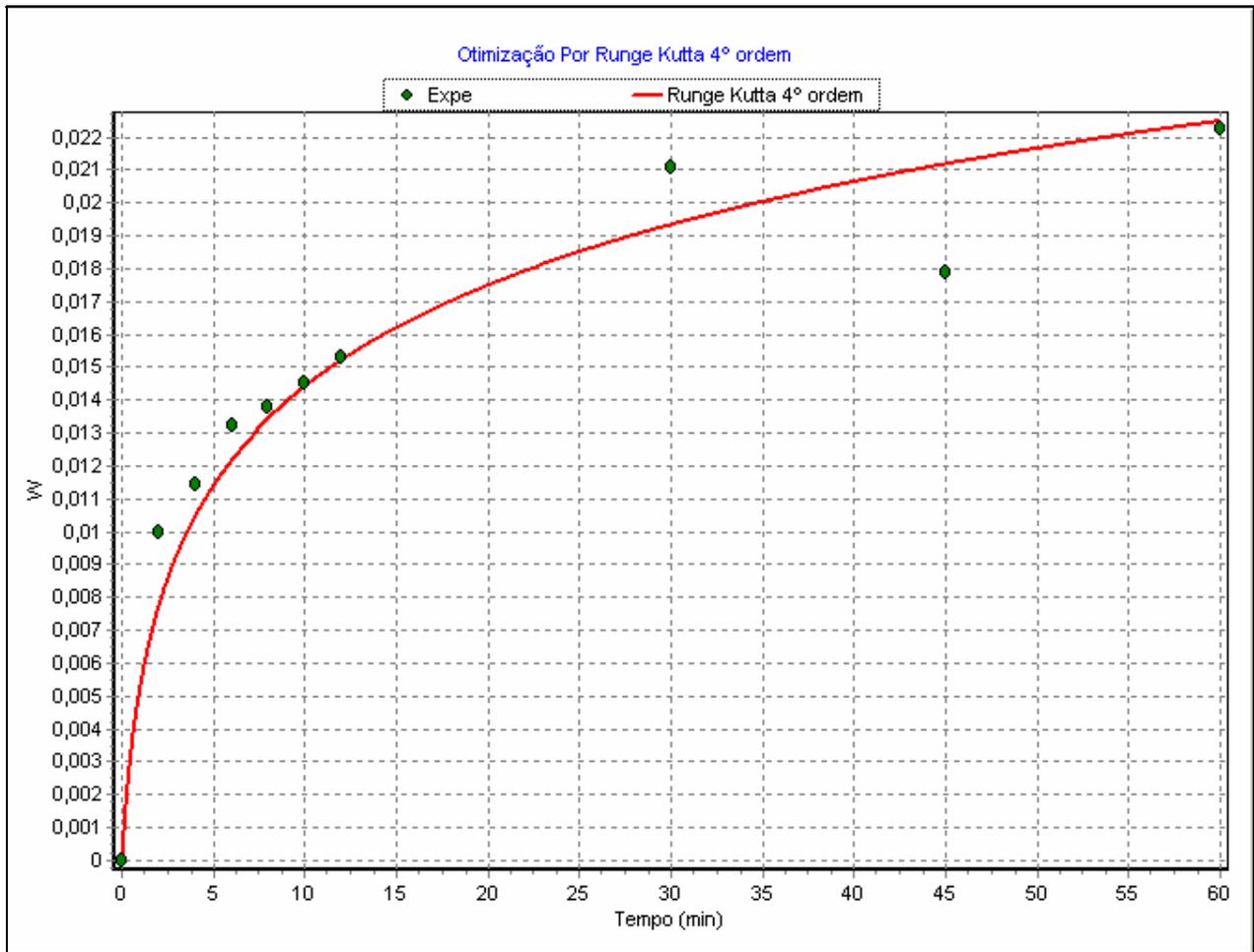


Figura C-2: Gráfico da evolução da fração de água absorvida (W) em função do tempo. Valor de $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$, temperatura da água de 1°C sob agitação por bomba de água.

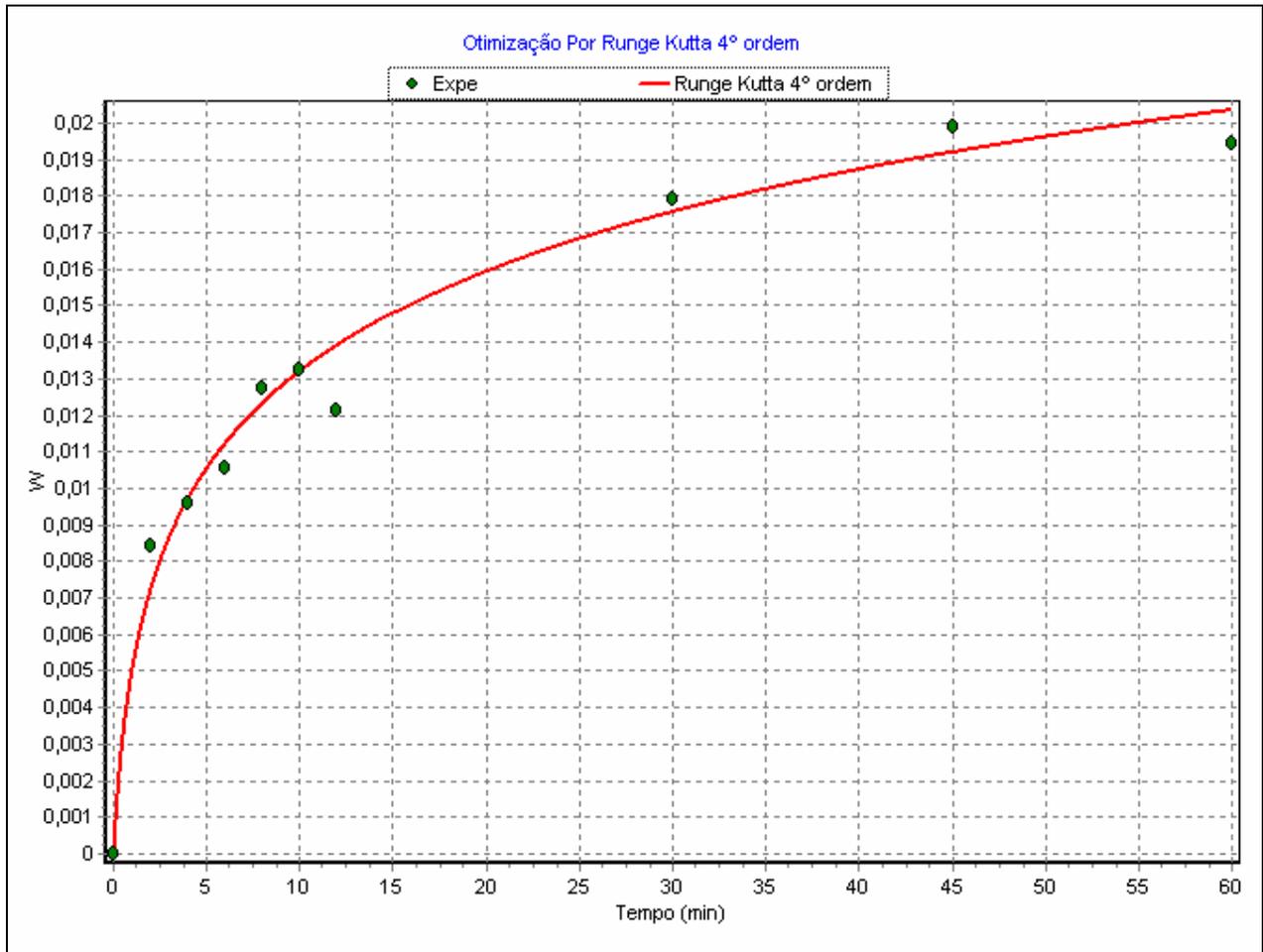


Figura C-3: Gráfico da evolução da fração de água absorvida (W) em função do tempo.

Valor de $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$, temperatura da água de 1°C sob agitação por injeção de ar.

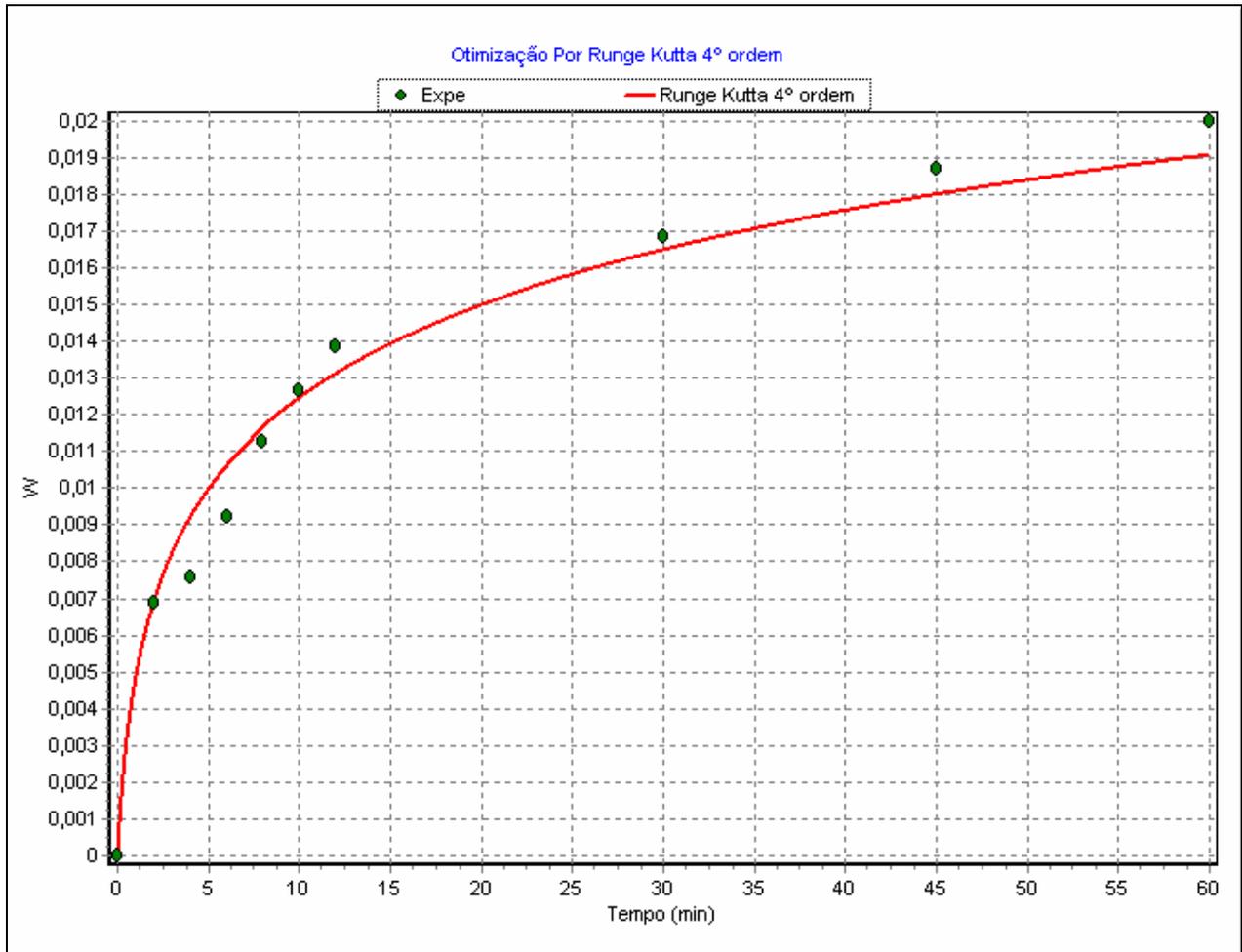


Figura C-4: Gráfico da evolução da fração de água absorvida (W) em função do tempo. Valor de $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$, temperatura da água de 15°C sem agitação forçada.

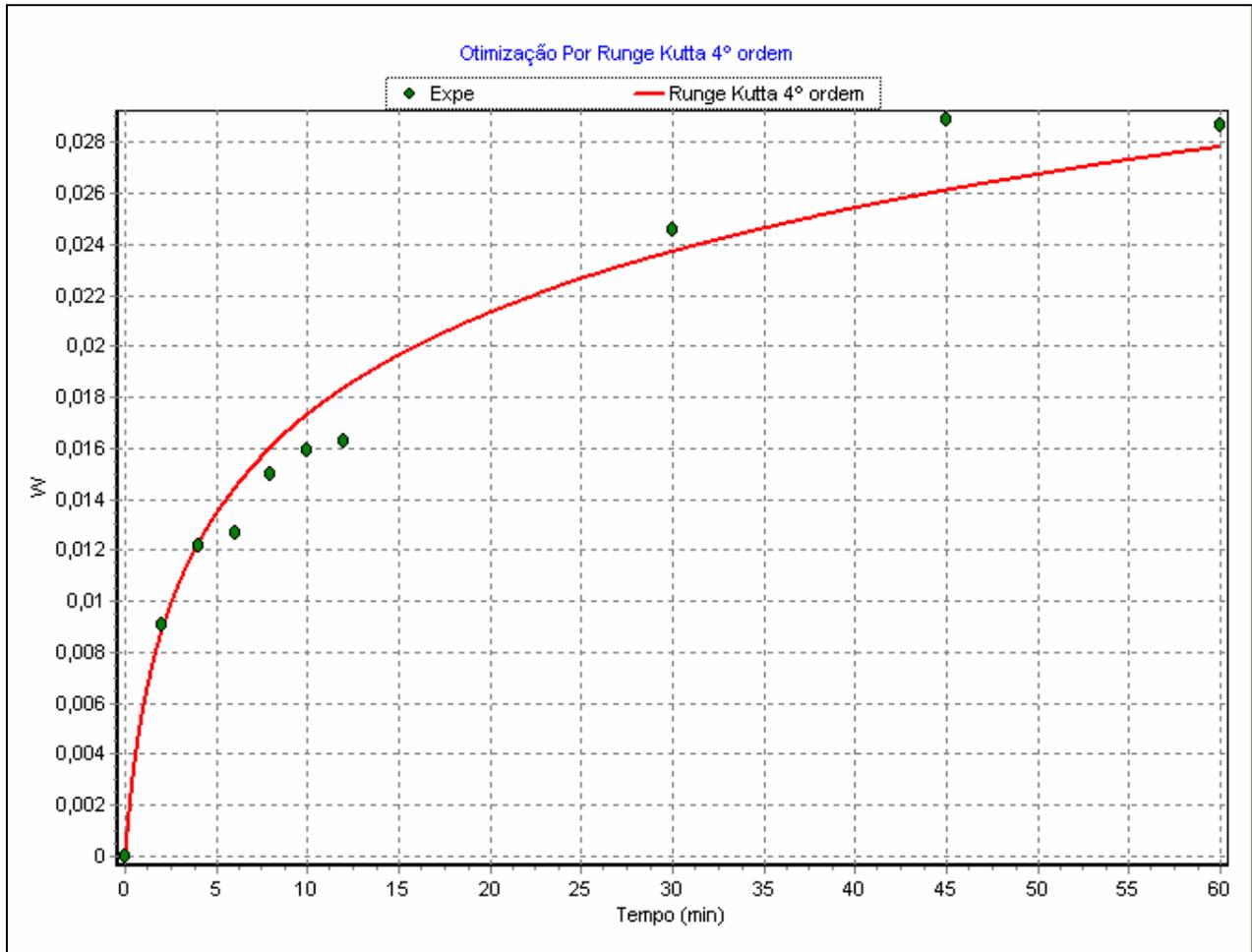


Figura C-5: Gráfico da evolução da fração de água absorvida (W) em função do tempo.

Valor de $K_m'' = 0,1 \text{ min}^{-1}$, temperatura da água de 15°C sob agitação por injeção de ar.