

Luiz Gustavo Gonçalves Rodrigues

**RESFRIAMENTO DE CARÇAÇAS DE FRANGO POR
IMERSÃO EM ÁGUA E AR FORÇADO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo.

Coorientador: Prof. Dr. Bruno A. M. Carciofi

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rodrigues, Luiz Gustavo Gonçalves

Resfriamento de carcaças de frango por imersão em água e ar forçado / Luiz Gustavo Gonçalves Rodrigues; orientador, João Borges Laurindo; coorientador, Bruno A. M. Carciofi – Florianópolis, SC, 2013.

113 p.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos.

Inclui referências

1. Engenharia de Alimentos. 2. Resfriamento de carcaça de frango. I. Borges Laurindo, João. II. Carciofi, Bruno A. M. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico este trabalho primeiramente aos meus pais, Adélia e Vanderlei pelo incentivo, carinho e apoio em todos os momentos. Também a toda minha família.

Aos Professores João Laurindo e Bruno Carciofi, pela orientação, oportunidade, disponibilidade, paciência, ensinamentos e confiança prestadas durante este trabalho.

A todos os colegas e ex-colegas do laboratório PROFI, em especial, à Bárbara, Carmen, Daniel, Darlene, Fabinho, Franciny, Lenilton, Gabriel, Giustino, Jaqueline, Jhony, Juliano, Marieli, Marta e Vivian, pela companhia e momentos agradáveis no laboratório.

À Emanuelle pelo auxílio, dedicação e comprometimento na execução deste trabalho. À colega Marla pela ajuda experimental ao final do trabalho.

Aos amigos Fabiana e Vinícius Mirapalheta, e a todos os amigos de Rio Grande/RS e Uruguaiana/RS, pela amizade e incentivo durante esta etapa.

À minha madrinha Odila Maciel e seus filhos Luciane, Aline e Astor Filho.

À UFSC, aos Professores e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos pela oportunidade do aprendizado e por tornar possível este trabalho.

À relatora deste trabalho, Professora Ligia Marczak e aos membros da banca examinadora pela disponibilidade e contribuições para o aprimoramento do trabalho final.

A Capes pela concessão da bolsa de estudos.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O Brasil e principalmente o estado de Santa Catarina ocupam uma posição de destaque no mercado internacional com respeito à produção e a exportação de carne de frango. Em uma linha de processamento industrial, a etapa de resfriamento de carcaças de frango até a temperatura central do músculo peitoral atingir 4 °C, é de suma importância para garantir a segurança alimentar e a qualidade do produto final. O resfriamento em tanques de imersão em água (chillers), em câmaras frias com circulação de ar forçado e o resfriamento evaporativo são os métodos mais utilizados industrialmente para o resfriamento de carcaças. A técnica de resfriamento de frangos por imersão com água fria é a mais utilizada no Brasil e EUA. No entanto, mercados mais exigentes, como a Europa, restringem esta técnica devido à água absorvida pelas carcaças durante o processamento. Sendo assim, o estudo de métodos alternativos ao resfriamento de carcaças de frangos por imersão que relacionem as condições de operação desta importante etapa industrial do processamento de carne de frango se faz necessário. A primeira etapa deste estudo buscou determinar o coeficiente de transferência de calor convectivo (h) entre uma esfera de alumínio metálica modelo coberta por um tecido de algodão inicialmente molhado ou seco e o ar refrigerado. Evoluções temporais de temperatura da esfera durante o resfriamento foram utilizadas para determinação dos valores de h para diferentes arranjos experimentais (p. ex., esfera descoberta ou coberta por um tecido de algodão molhado ou seco). Os resultados indicaram que, para as mesmas condições experimentais, o recobrimento da esfera com o tecido molhado aumentou o valor de h em aproximadamente três vezes, o que levou a uma grande redução do tempo de processo quando comparado com a esfera descoberta ou coberta com um tecido seco. Na segunda etapa o objetivo foi estudar o processo de resfriamento de carcaças de frango pelos métodos de imersão em água (IA), ar forçado (AF) e um processo combinado de ar frio-imersão em água (CO) em um aparato experimental especialmente desenvolvido para este trabalho. Foram avaliados a evolução temporal da temperatura do músculo peitoral, a variação da massa durante o resfriamento, a modelagem matemática do tempo de resfriamento e as análises termográficas de carcaças de frango submetidas aos processos de resfriamento. Os resultados obtidos indicaram uma tendência de redução da variação da massa e do tempo de resfriamento quando se utilizou um processo CO na comparação com um processo AF, nas mesmas condições de velocidade e UR do ar. Os

ajustes da variação da massa e a simulação do tempo de resfriamento foram capazes de descrever os resultados experimentais. Complementando o estudo, as imagens termográficas de infravermelho de carcaças de frango resfriadas permitiram a medição da distribuição das temperaturas internas e superficiais das amostras.

Palavras-chave: carcaças de frango, resfriamento, imersão em água, ar frio, método combinado, transferência de calor, tempo, imagens termográficas.

ABSTRACT

Brazil and particularly the state of Santa Catarina occupy a prominent position in the international market with respect to production and export of poultry meat. In a line of industrial processing, the cooling step of poultry carcasses until the core temperature of the muscle pectoralis reaches 4 ° C, is important to ensure food safety and product quality. The water immersion cooling tanks (chillers), in cold rooms with forced air circulation and evaporative air cooling are the most widely used methods for industrial cooling of carcasses. The cooling technique of poultry by immersion in cold water is the most widely used in Brazil and the USA. However, the most demanding markets, such as Europe, restricting this technique due to the water uptake by the carcasses during processing. Thus, the alternative methods study to cooling poultry carcasses by immersion that relate operating conditions of this important stage in the industrial processing of poultry meat is required. The first step of this study determine the coefficient of convective heat transfer (h) between a metallic spherical model covered by cotton tissue initially wet or dry, and cooling air. Temporal temperature evolutions during cooling of the sphere were used to determine the values of h for different experimental arrangements (e. g. Uncovered sphere or sphere covered with wet or dry cotton tissue). The results indicated that for the same experimental conditions, the coating of the sphere with wet cotton increased the h value about three times, resulting in a large reduction of processing time when compared with the uncovered and with the sphere covered by dry tissue. In the second stage the aim was to study the cooling process of poultry carcasses by water immersion (WI), forced air (FA) and a combined process of forced air-water immersion (CO) in an experimental apparatus specially developed for this work. The evaluated parameters were the temporal temperature evolution of the pectoral muscle, the mass variation during cooling, the mathematical modeling of the cooling time and thermographic analysis of carcasses subjected to cooling processes. The results indicated a decreasing trend in the mass variation and cooling time when using a CO process compared with the AF under the same conditions of velocity and RH air. The mass variation adjustments and the simulation of the cooling time were able to describe the experimental results. Complementing the study, infrared thermographic images of poultry carcasses cooled allowed the measurement of the distribution of internal and surface temperatures of the samples.

Keywords: poultry carcasses, cooling, water immersion, cold air, combined method, heat transfer, time, thermal images.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Imagem de um <i>chiller</i>	35
Figura 2.2 - Imagem de um processo de resfriamento por ar forçado em câmara fria.....	39
Figura 2.3 - Imagem de um processo de resfriamento combinado.....	42
Figura 2.4 - Mudanças estruturais que ocorrem no músculo bovino após a morte animal. a) Músculo vivo ou imediatamente após o abate; b) Músculo de 4 a 6 horas <i>post mortem</i> ; c) Músculo em <i>rigor mortis</i>	47
Figura 2.5 – Modelo físico para o mecanismo de absorção de água por carcaças de frangos. (a) Primeiro passo da absorção de água, controlada através de mecanismo hidrodinâmico; (b) Segundo passo da absorção de água, quando há migração interna da água absorvida (mecanismo pseudo-difusivo).....	48
Figura 3.1 - Aparato experimental especialmente desenvolvido e construído para o estudo do processo de resfriamento deste trabalho. (a) Vista frontal; (b) Vista superior.....	50
Figura 3.2 - Montagem experimental usada para estudar o processo de resfriamento por ar forçado de uma esfera. (a) Vista superior; (b) Representação esquemática do posicionamento dos termopares na esfera coberta com tecido de algodão.	53
Figura 3.3 - Diagrama geral das etapas realizadas nos ensaios de resfriamento por ar forçado de uma esfera modelo.	59
Figura 3.4 - Diagrama experimental dos processos de resfriamento de carcaças de frango avaliados neste trabalho.	61
Figura 3.5 - Imagens de luz visível do corte feito na carcaças de frango. a) Vista frontal; b) Vista lateral; c) Vista superior.	65
Figura 4.1 – (a) Exemplo ilustrativo de seis experimentos da evolução temporal das temperaturas centrais da esfera (T_{AI}) descoberta, coberta com um tecido seco e coberta pelo tecido molhado (60 % de UR) durante resfriamento por ar forçado em velocidades V_{1E} e V_{2E} ; (b) e (c) Evolução temporal da esfera coberta por tecido molhado durante resfriamento em 60 % de UR e em velocidades do ar V_{1E} e V_{2E} , respectivamente; (d) e (e) Evolução temporal da esfera coberta por tecido seco durante resfriamento em velocidades do ar V_{1E} e V_{2E} , respectivamente.....	68
Figura 4.2 – Dados experimentais do logaritmo da temperatura da esfera (T_{AI}) pelo tempo utilizado para determinação do coeficiente h entre a esfera descoberta e o ar refrigerado durante um processo de resfriamento na velocidade do ar V_{1E} (Figura 4.2a) e V_{2E} (Figura 4.2b).	72

Figura 4.3 – Evolução temporal da perda de água experimental e simulada do tecido molhado durante resfriamento.	75
Figura 4.4 - Evolução temporal comparativa das temperaturas T_1 (20 mm de profundidade) e T_2 (10 mm de profundidade) inseridas no músculo peitoral das carcaças de frango durante processo de resfriamento: (a) Ar forçado (1 °C e UR=60 %); (b) Combinando ar forçado (1 °C e UR=60 %) e (c) imersão em água fria (1 °C).	79
Figura 4.5 – Exemplos ilustrativos da evolução temporal da massa de carcaças de frango submetidas aos processos de resfriamento (UR = 90 % e velocidade de escoamento V_1F): (a) Resfriamento por ar forçado; (b) Resfriamento combinado.....	89
Figura 4.6 - Valores experimentais da evolução temporal da variação da massa de carcaças de frango e o ajuste a equação de Azuara et al. para os diferentes processos de resfriamento.	90
Figura 4.7 - Evolução temporal das temperaturas experimentais e simuladas (a partir do uso do parâmetro B) da musculatura central de carcaças de frango submetidas ao resfriamento por ar forçado e combinado. Processos: Ar forçado e combinado, UR de 90, 60 e 30 % e velocidades $V_1F = 4,07 \text{ m s}^{-1}$, $V_2F = 5,66 \text{ m s}^{-1}$, e imersão em água. ...	94
Figura 4.8 - Imagens de luz visível de carcaças de frango em diferentes condições: (a) Carcaça inteira, alocada no interior da câmara fria; (b) Em corte com vista frontal; (c) Em corte com vista lateral e (d) Em corte com vista superior.	97
Figura 4.9 - Imagens termográficas de infravermelho da superfície de carcaças de frango em três diferentes momentos para o resfriamento por ar forçado e combinado.....	98
Figura 4.10 - Imagens termográficas de infravermelho de carcaça de frango em cortes em três diferentes momentos para o resfriamento por ar forçado, combinado e por imersão.	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diagrama conceitual da tese.	29
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Produção mundial de carne de frango.....	32
Tabela 4.1 - Valores médios de h determinados para as diferentes condições de resfriamento por ar forçado da esfera sem e com tecido. Os valores em parênteses são relativos ao coeficiente de variação (CV). $h \pm$ desvio padrão (dp).....	74
Tabela 4.2 – Percentual de perda de água no tecido molhado devido ao processo de resfriamento evaporativo, e o tempo de resfriamento necessário para o centro da esfera atingir 4 °C. Os valores em parênteses são relativos ao coeficiente de variação (CV). Valores médios \pm desvio padrão.....	77
Tabela 4.3 - Tempo de resfriamento até 4,0 °C e respectivos coeficientes de variação (CV) para os processos AF, CO e IA. Valores médios \pm desvio padrão.	82
Tabela 4.4 – Variação da massa, tempo de resfriamento e a variação da temperatura de estudos comparativos de processos de resfriamento de carcaças de frango.....	85
Tabela 4.5 - Variação da massa e respectivos coeficientes de variação (CV) para os processos AF, CO e IA. Valores médios \pm desvio padrão.	87
Tabela 4.6 - Valores dos parâmetros estimados para a função empírica proposta por Azuara et al. (1992) e os parâmetros estatísticos do ajuste da função aos dados experimental de perda de massa ou ganho para diferentes processos de resfriamento de carcaças de frango.	93

NOMENCLATURA

AF	Resfriamento por ar forçado
A_{te}	Área superficial da esfera coberta pelo tecido (m^2)
B	Parâmetro que é uma espécie de coeficiente de transferência de calor geral, que é dependente do valor médio do coeficiente h e a área superficial da carcaça de frango ($J s^{-1} °C$)
Bi	Número adimensional de Biot
CO	Resfriamento combinado (ar forçado e imersão em água)
Cp_{ag}	Calor específico da água ($J kg^{-1} °C^{-1}$)
Cp_{Al}	Calor específico do alumínio ($J kg^{-1} °C^{-1}$)
Cp_{ts}	Calor específico do algodão (tecido seco) ($J kg^{-1} °C^{-1}$)
Cp_{tm}	Calor específico do tecido molhado ($J kg^{-1} °C^{-1}$)
CV	Coefficiente de variação
D_{Al}	Diâmetro da esfera de alumínio (m)
D_{te}	Diâmetro da esfera coberta pelo tecido (m)
Dp	Desvio padrão
h	Coefficiente convectivo de transferência de calor ($W m^{-2} °C^{-1}$)
h_{ef}	Coefficiente convectivo de transferência de calor efetivo (que considera o efeito térmico e o evaporativo) ($W m^{-2} °C^{-1}$)
IA	Resfriamento imerso em água
L	Dimensão característica do meio condutivo (m)
k_{Al}	Condutividade térmica do alumínio ($W m^{-1} °C^{-1}$)

k	Condutividade térmica do fluido ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
K	Parâmetro para simulação
Nu	Número adimensional de Nusselt
ΔM	Variação da massa das carcaças de frango (kg)
m_{ag}	Massa de água (kg)
m_{Al}	Massa da esfera de alumínio (kg)
m_F	Massa da carcaça de frango em um instante durante o resfriamento (kg)
m_{Fi}	Massa inicial da carcaça de frango (kg)
m_i	Massa inicial (kg)
m_f	Massa final (kg)
m_{ts}	Massa do tecido seco (kg)
m_{tm}	Massa do tecido molhado (kg)
R^2_{aj}	R quadrado ajustado
r_{ti}	Raio interno da calota esférica de tecido (m)
r_{te}	Raio externo da calota esférica de tecido (m)
R_{cond}	Resistência à transferência de calor condutiva
R_{conv}	Resistência à transferência de calor convectiva
Re	Número adimensional de Reynolds
S	Constante para simulação do modelo de Azuara et al. (1992)
t	Tempo (s)
t_0	Tempo inicial (s)

t_i	Tempo no instante t (s)
T_0	Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$)
T_1	Temperatura do sensor posicionado em profundidade de 20 mm no interior do peito do frango ($^{\circ}\text{C}$)
T_2	Temperatura do sensor posicionado em profundidade de 10 mm no interior do peito do frango ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Al}	Temperatura do centro da esfera ($^{\circ}\text{C}$)
T_i	Temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$)
T_f	Temperatura final ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Fi}	Temperatura inicial do frango ($^{\circ}\text{C}$)
T_{te}	Temperatura externa do tecido ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ti}	Temperatura interna do tecido ($^{\circ}\text{C}$)
T_{ts}	Temperatura do tecido seco ($^{\circ}\text{C}$)
T_{tm}	Temperatura do tecido molhado ($^{\circ}\text{C}$)
\bar{T}_{tm}	Temperatura média na camada esférica do tecido molhado ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	Temperatura do fluido (água fria ou ar frio) ($^{\circ}\text{C}$)
UR	Umidade relativa
V_{1E}	Menor velocidade do ar ao redor da esfera ($0,92 \text{ m s}^{-1}$)
V_{2E}	Maior velocidade do ar ao redor da esfera ($1,42 \text{ m s}^{-1}$)
V_{1F}	Menor velocidade do ar ao redor do frango ($4,07 \text{ m s}^{-1}$)
V_{2F}	Maior velocidade do ar ao redor do frango ($5,66 \text{ m s}^{-1}$)
Δm^*	Varição da massa incompleta (fração de massa que permanece na amostra em um tempo t)
ΔM	Varição da massa de uma amostra

Δm_{aj}	Varição da massa ajustada de uma amostra
Δm_{∞}	Varição da massa de uma amostra no equilíbrio
ΔT	Varição de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
α	Difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
μ	Viscosidade dinâmica do fluido (N s m^{-2})
ρ_{Al}	Massa específica do alumínio (kg m^{-3})
ρ	Massa específica do fluido (kg m^{-3})

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	25
1.1 OBJETIVO GERAL.....	27
1.1.1. <i>Objetivos Específicos.....</i>	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 MERCADO DE FRANGOS	31
2.1.1. <i>Custos operacionais e energéticos</i>	33
2.2 RESFRIAMENTO DE CARÇAÇAS DE FRANGO	34
2.2.1 <i>Resfriamento de carcaças de frango por imersão.....</i>	34
2.2.2 <i>Resfriamento de carcaças de frango por ar forçado.....</i>	38
2.2.3 <i>Resfriamento evaporativo de carcaças de frango</i>	40
2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO RESFRIAMENTO DE CARÇAÇAS ..	
.....	42
2.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA	46
3 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1 APARATO EXPERIMENTAL	49
3.2 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE CONVECTIVO MÉDIO DE	
TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE UMA ESFERA E O AR FRIO (H) ...	52
3.2.1 <i>Coefficiente h para a esfera descoberta</i>	54
3.2.2 <i>Coefficiente h_{ef} para a esfera coberta por um tecido de</i>	
<i>algodão molhado.....</i>	55
3.2.3 <i>Coefficiente h para a esfera coberta por um tecido de</i>	
<i>algodão seco.....</i>	57
3.2.4 <i>Correlação empírica para estimativa do coeficiente h....</i>	58
3.3 RESFRIAMENTO DAS CARÇAÇAS DE FRANGO	59
3.3.1 <i>Metodologia experimental.....</i>	59
3.3.2 <i>Matéria-prima e preparo das amostras.....</i>	61
3.3.3 <i>Variação de massa durante o resfriamento.....</i>	62
3.3.4 <i>Modelo matemático para o resfriamento de carcaças de</i>	
<i>frango.....</i>	64
3.3.5 <i>Termografia das carcaças de frango.....</i>	65
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67

4.1	COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE A ESFERA DE ALUMÍNIO E O AR FORÇADO	67
4.2	RESFRIAMENTO DAS CARÇAÇAS DE FRANGO	79
4.2.1	<i>Evolução temporal da temperatura do músculo peitoral</i> 79	
4.2.2	<i>Variação da massa das carcaças de frango durante o resfriamento</i>	87
4.2.3	<i>Modelagem matemática do tempo de resfriamento</i>	94
4.2.4	<i>Análises termográficas</i>	97
5	CONCLUSÃO	101
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca mundialmente como um dos três maiores produtores, o maior exportador e um dos sete maiores mercados consumidores *per capita* de carne de frango (ANUALPEC, 2010; UBABEF, 2013). A avicultura brasileira é uma atividade avançada tecnologicamente, atingindo níveis de produtividade comparados aos países mais desenvolvidos, o que contribui de forma significativa para o fornecimento de proteína animal de baixo custo e geradora de riquezas para o país (RICHETTI e SANTOS, 2000).

Assim como a região sul do Brasil, o estado de Santa Catarina apresenta grande destaque neste setor agroindustrial, principalmente pela boa estrutura organizacional das empresas produtoras de carne de frango e das políticas governamentais de incentivo à exportação deste produto. Dados divulgados pela União Brasileira de Avicultura (UBABEF) mostram que, no ano de 2011, Santa Catarina reassumiu a liderança entre os maiores exportadores de carne de frango no país.

O mercado de carnes no Brasil e no mundo está cada vez mais competitivo e complexo. Isso é resultado, sobretudo, do ciclo de vida e do grau de perecibilidade do produto, das exigências por rigorosos controles sanitários e da crescente demanda por diversificação e valor agregado, mesmo no caso de um mercado cujo principal produto é, em essência, uma *commodity* (PEREIRA, 2003).

As principais mudanças no mercado internacional de carne de frango nas últimas décadas estão relacionadas com a adoção de tecnologia em grande escala, tanto no terreno biológico como no produtivo. Assim, no setor primário, a indústria avícola foi um dos segmentos que mais se destacaram mundialmente em termos de absorver com rapidez as novas tecnologias e os novos sistemas integrados de produção e de transferi-los com eficiência, na forma de preços baixos e de elevado padrão de qualidade, para os consumidores finais (NÄÄS, 2003).

A cadeia produtiva do complexo avícola não deve estar atenta somente às questões sanitárias dos países compradores, mas também à imagem deste setor agroindustrial entre os consumidores. Denúncias de fraude associadas à presença de água em excesso em carcaças e cortes de frango são nocivas ao setor e devem ser motivo de preocupação. Estes eventos relativos à quantidade excessiva de água em cortes de frango são muitas vezes associados a procedimentos inadequados de resfriamento (CARCIOFI, 2005). A temperatura e a duração da etapa de escaldagem, o tempo de lavagem das carcaças e os procedimentos de

resfriamento adotados nos *chillers* têm grande influência na absorção de água.

O processo de resfriamento de carcaças de frango, posteriormente às etapas de abate, escaldagem, depenagem e evisceração, é uma exigência de legislações nacionais e internacionais a fim de garantir a preservação da qualidade dos produtos cárneos, uma vez que em baixas temperaturas o processo de resfriamento reduz as velocidades das reações bioquímicas e microbiológicas, mantendo a vida útil dos produtos e estendendo o período de estocagem (DINÇER, 1997; CARCIOFI e LAURINDO, 2010).

O resfriamento das carcaças de frango é uma das etapas mais importantes no processamento da carne, pois a redução da temperatura, além de reduzir o crescimento microbiano, influencia nos principais indicadores de qualidade da carne, tais como sabor, aparência e textura (SAVELL, MUELLER e BAIRD, 2005).

Os métodos mais comuns utilizados para o resfriamento de carnes de frango são a imersão em água fria e o ar forçado refrigerado. As indústrias processadoras dos EUA e do Brasil realizam o resfriamento das carcaças de frango por imersão em água, enquanto que as indústrias processadoras europeias costumam usar o ar frio forçado. Entretanto, o resfriamento por ar forçado está ganhando popularidade nos EUA, devido à limitada disponibilidade de água, às restrições ambientais relacionadas ao descarte dos resíduos das indústrias processadoras e também devido a mudanças nos limites de absorção de água pelas carcaças naquele país (HUEZO et al. 2007b). No Brasil, as indústrias não utilizam o método de resfriamento por ar forçado principalmente pelo maior tempo de processo e pela perda de água pelas carcaças (KLASSEN et al., 2009).

Em 2012, foi introduzido no mercado europeu um novo sistema de resfriamento combinando o uso de ar forçado e imersão em água. Este sistema tem a finalidade de produzir produtos de alta qualidade utilizando os benefícios e reduzindo as desvantagens dos processos por ar forçado e imersão (TOPKIP, 2012; DEMORIK et al. 2013).

Cabe salientar que no Brasil este tema, apesar da grande importância econômica ao país, apresenta escassa investigação científica relacionando dados sobre os tempos de resfriamento, ganho/perda de massa e condições dos processos de resfriamento de carcaças de frango. Neste contexto, pode-se destacar os trabalhos de Neves Filho (1978), Klassen (2008), Klassen et al. (2009), Martins et al. (2011), Paolazzi, Noreña e Brandelli (2013) e os trabalhos do grupo de pesquisa do laboratório de Propriedades Físicas dos Alimentos (PROFI) do

Departamento de Engenharia Química e de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina (CARCIOFI, 2005, CARCIOFI e LAURINDO, 2007; CARCIOFI e LAURINDO, 2010).

Deste modo, o estudo da combinação dos métodos de resfriamento de carcaças de frango por imersão em água fria e de resfriamento por ar forçado é de grande interesse industrial e acadêmico. Esta combinação pode ser uma alternativa viável para resolver as importantes questões relacionadas ao tempo e à absorção/perda de água durante o resfriamento de carcaças de frango. Neste contexto, destaca-se a importância de estudos detalhados sobre os fenômenos de transferência de calor e massa presentes nos processos de resfriamento de carcaças de frango que permitam a avaliação dos parâmetros e variáveis de processo que controlam o tempo de resfriamento e a perda/ganho de massa pela carcaça.

1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho foi investigar a transferência de calor e a troca de massa no resfriamento de carcaças de frango com o uso de ar forçado refrigerado, de imersão em água fria e pela combinação desses como fluidos refrigerantes e quantificar a contribuição do mecanismo evaporativo nesse processo.

1.1.1. Objetivos Específicos

- quantificar a influência da presença de uma superfície molhada ou seca no coeficiente convectivo de transferência de calor (h) entre um sólido e o ar.
- quantificar a influência da umidade relativa e da velocidade do ar no valor de h e na perda de água.
- quantificar a redução do tempo de resfriamento promovido pela umidificação da superfície.
- desenvolver um dispositivo experimental para a realização de testes de resfriamento de carcaças de frango por um processo combinado de ar frio-imersão em água, controlando a UR e registrando a evolução temporal da massa.
- realizar um estudo comparativo do resfriamento de carcaças de frango em câmara fria usando três diferentes processos de resfriamento: com ar forçado, por imersão em água fria e pela combinação desses.

- encontrar modelos matemáticos capazes de descrever o tempo de resfriamento e a variação da massa para os diferentes processos de resfriamento.

- qualificar a distribuição de temperaturas no interior e na superfície das carcaças de frango durante os diferentes processos de resfriamento.

Diagrama conceitual do trabalho

No Quadro 1 apresenta-se um diagrama conceitual que sumariza o estudo realizado nesta tese.

Quadro 1 - Diagrama conceitual da tese.

<p>O quê? Resfriamento de carcaças de frango por imersão em água fria, pela exposição ao ar forçado refrigerado e pela combinação de ambos.</p>
<p>Por quê? O processo de resfriamento é de fundamental importância para a qualidade tecnológica e microbiológica das carcaças, com interesse direto por parte das indústrias nacionais, do governo brasileiro, dos consumidores locais e dos clientes internacionais.</p>
<p>O que já foi feito? Há trabalhos sobre resfriamento em <i>chillers</i> de imersão (Neves Filho (1978), Carciofi (2005), Carciofi e Laurindo (2007); Klassen (2008) e Carciofi e Laurindo (2010)), ar frio forçado (Mielnik et al. (1999), Huezo et al. (2007b), Jeong et al. (2011a) e Demirok et al. (2013)) e que utilizam o processo combinado de aspersão ou imersão em água e ar frio forçado (Mielnik et al. (1999), Perumalla et al. (2011), Jeong et al. (2011a) e Demirok et al. (2013)), entretanto nenhum estudo prévio encontrado utilizou, como no presente trabalho, um dispositivo experimental de resfriamento com o controle da UR e da temperatura do ambiente refrigerado e o registro da evolução temporal da massa das amostras durante todo o processo.</p>
<p>Hipóteses</p> <ul style="list-style-type: none"> • O comportamento da transferência de calor no processo de resfriamento de uma esfera umedecida em câmara fria é um indicativo do que ocorre com carcaças de frango com superfícies umedecidas; • O uso combinado de água fria (imersões rápidas) e ar frio permite controlar a perda de massa durante o resfriamento de carcaças de frango, além de reduzir o tempo de resfriamento das carcaças por ar frio.
<p>Metodologia experimental</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estudo comparado dos comportamentos dos coeficientes de transferência de calor entre uma superfície molhada e o ar de resfriamento e entre uma superfície seca e esse mesmo ar de resfriamento; • Estudo do processo de resfriamento de carcaças de frango por um método combinado de imersão rápida em água e uso de ar frio forçado

com diferentes velocidades e umidades relativas;

- Comparação entre a variação da massa, tempo de resfriamento e distribuição de temperaturas determinadas por imagens termográficas de infravermelho das carcaças resfriadas por diferentes métodos de resfriamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este primeiro capítulo apresenta alguns aspectos referentes ao estado da arte do tema desenvolvido neste estudo e outros aspectos da fundamentação teórica relevante aos mecanismos de transferência de calor e transferência de massa observados neste trabalho.

2.1 Mercado de frangos

Segundo a previsão realizada pela Agência das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), o consumo mundial de carne de frango nos próximos 10 anos atingirá a marca de 124 milhões de toneladas/ano, superando pela primeira vez o da carne suína (carne mais consumida no mundo atualmente). Nas projeções da FAO/OCDE, esse fato ocorrerá em virtude do aumento da renda da população nos países emergentes e da vantagem da carne de frango não apresentar nenhuma restrição cultural ou religiosa (AVISITE, 2013).

Neste contexto, o Brasil poderá se beneficiar devido ao seu amplo reconhecimento no mercado mundial pela produtividade, qualidade de seus produtos e pelo excelente status sanitário de produção. No ano de 2012, a produção de carne de frango brasileira atingiu 12,645 milhões de toneladas (UBABEF), mantendo o país próximo aos Estados Unidos e à China, respectivamente, o primeiro e segundo maiores produtores mundiais atualmente (USDA, 2013). Conforme a UBABEF, no ano de 2012 as exportações brasileiras somaram 4,138 milhões de toneladas, com uma receita de US\$ 8,362 bilhões. Essas estatísticas incluem carnes de frango, peru, pato e outras aves, além de ovos e material genético. A carne de frango correspondeu a 3,918 milhões de toneladas exportadas no citado ano. Com este resultado, o Brasil permanece, desde 2004, como o maior exportador mundial de carne de frango (UBABEF, 2013).

Nas projeções para 2013, segundo o Departamento de Agricultura dos EUA (USDA), os Estados Unidos devem liderar a produção mundial de carne de frango com 16,341 milhões de toneladas. A China deve manter a segunda posição, com 14,1 milhões de toneladas, e o Brasil a terceira, com 13,005 milhões de toneladas (Tabela 2.1). No caso do Brasil, se confirmado o resultado, representa um crescimento de 2,8 % na produção avícola em relação a 2012.

Tabela 2.1 - Produção mundial de carne de frango.

Produção mundial de carne de frango (em milhões de toneladas ^{*1})				
País	2010	2011	2012	2013 ^{*2}
Estados Unidos	16,563	16,694	16,476	16,341
China	12,550	13,20	13,700	14,100
Brasil	12,312	12,863	12,645	13,005
União Européia	9,202	9,420	9,480	9,580
México	2,822	2,900	2,945	2,950
Índia	2,650	2,900	3,160	3,420
Rússia	2,310	2,575	2,750	2,850
Argentina	1,680	1,770	1,936	2,022
Tailândia	1,280	1,350	1,550	1,450
Turquia	1,430	1,614	1,687	1,700
Indonésia	1,465	1,515	1,540	1,550
Outros Países	13,465	13,619	14,448	14,575
Total Mundial	77,729	80,42	82,422	83,543

Notas: ^{*1} Carne *in natura* com osso. ^{*2} Previsão.
 Fonte: UBABEF, 2013; USDA, 2013.

De acordo com a entidade norte-americana, a produção global de carne de frangos em 2013 está prevista em 83,543 milhões de toneladas, sendo que estes três países que lideram o ranking serão responsáveis por cerca de 52 % da produção mundial (UBABEF, 2013; USDA, 2013).

Um dos fatores que têm contribuído para o aumento gradual no consumo de carne de frango no Brasil e no mundo é o baixo teor de gordura na carne de frango, presente quase que exclusivamente na pele, facilitando sua separação. Outro fator de crescimento é a rápida resposta das indústrias do ramo no desenvolvimento de novos produtos para atender as mais variadas demandas do mercado consumidor.

A alta competitividade entre grandes empresas e a produção intensiva de frangos de corte contribuiu para o surgimento de novas tendências no consumo de carnes de aves, através de uma forte demanda por carnes oriundas de sistemas de produção que garantam a segurança alimentar (alimentação isenta de farinhas e gorduras animais, antibióticos e promotores de crescimento) ou que se preocupem com o bem-estar animal (ZANUSSO e DIONELLO, 2003).

A agroindústria de frango brasileira é um exemplo de competitividade no mercado mundial. Apesar do grande crescimento nesta última década em termos de volume produzido e exportado, percebe-se que há a necessidade de se buscar formas de melhorar o desempenho das empresas que atuam neste segmento da indústria, com a intenção de se manter à frente de seus concorrentes mundiais (SAKAMOTO e BORNIA, 2005).

Neste contexto, o uso do frio apresenta um papel fundamental na conservação e preservação destes alimentos, onde a adequação de tecnologias que assegurem a qualidade do produto desde o processo produtivo até o consumidor é de grande importância neste acirrado e crescente mercado da indústria processadora de carne de frango.

2.1.1. Custos operacionais e energéticos

Além disto, outro aspecto importante a se destacar diz respeito aos custos operacionais e energéticos presentes nos métodos de resfriamento de carcaças de frango utilizados na indústria. Segundo James et al. (2006), quando somente custos energéticos são considerados, o custo do resfriamento imerso com água fria em contrafluxo é 1/5 do método por ar forçado. Entretanto, quando os custos com a água utilizada na produção e as águas residuais são incluídos, os custos operacionais do processo imerso são 50 % maiores do que para o processo em ar forçado. Segundo relatos de Demirok et al. (2013) e Topkip (2012), o método de resfriamento combinando o uso de imersão em água e ar forçado indica uma economia no uso de água utilizada durante o resfriamento (até 95 % de economia) e uma redução dos custos energéticos (até 45 % de economia) na comparação com o sistema de imersão em água fria. Desta forma, uma rápida estimativa a respeito do uso da energia elétrica para o abate de 400.000 frangos d-1 (massa média de 2 kg) mostra um consumo aproximado de energia de 1800 kW d-1, considerando somente a etapa de resfriamento e manutenção das temperaturas da água nos tanques de resfriamento industriais. Nesta estimativa considerou-se a necessidade de redução da temperatura corporal das carcaças em aproximadamente 30 °C e uma renovação obrigatória de água nos tanques em 1,5 L por carcaça no primeiro estágio (ΔT de 10 °C) e em 1,0 L no último estágio (ΔT de 24 °C). Desta maneira, o consumo energético também se torna um fator determinante na escolha do método de resfriamento para produção de carne de frango.

2.2 Resfriamento de carcaças de frango

Os métodos de resfriamento de carcaças de frango mais utilizados na indústria são os métodos de resfriamento em tanques de imersão em água (chillers) e túneis de ar forçado refrigerado (air-chillers). Contudo, o processo de resfriamento evaporativo de carcaças vem ganhando notoriedade nas indústrias processadoras, principalmente na Europa. Assim, a seguir serão apresentados estes três métodos de resfriamento de carcaças de frango.

2.2.1 Resfriamento de carcaças de frango por imersão

O resfriamento por imersão em água é um método comumente utilizado para a remoção rápida do calor de alimentos. Este método pode ser utilizado também como pré-tratamento, realizado antes do produto ser congelado por algum outro processo, como congelamento por ar forçado (LUCAS e RAOULT-WACK, 1998; SILVA, 2007). O sistema é mais eficiente quando a água a baixa temperatura circula ao redor de cada produto, fazendo com que a temperatura da superfície rapidamente se torne semelhante à temperatura da água. Portanto, embalagens reduzem bastante à eficiência do processo (DINÇER, 1997; SILVA, 2007).

Diversos produtos tais como ervilhas, rabanetes, melões, pêssegos, cerejas, laranjas, camarões, caranguejos, sardinhas, atuns e carcaças de aves, podem ser resfriados por imersão em água fria (DINÇER, 1997; LUCAS e RAOULT-WACK, 1998; TERUEL, CORTEZ e NEVES FILHO, 2003; AMENDOLA e TERUEL, 2005). O resfriamento de carcaças de aves por imersão apresenta, relativamente, um baixo custo e maior rapidez, sendo largamente utilizado na América do Sul e do Norte, principalmente em países como Brasil e os EUA, dois dos maiores produtores de aves no mundo (CARCIOFI e LAURINDO, 2010).

Após as etapas de abate, escaldagem, depenagem e evisceração, as carcaças de frango devem ser resfriadas o mais rápido possível. Esta operação é realizada em tanques semicilíndricos, dotados de um helicóide interno que se move lentamente, promovendo o deslocamento das carcaças. As carcaças de frangos são mergulhadas e transportadas em uma mistura de água e gelo, sendo resfriadas desde aproximadamente 40 °C até 4 °C (no ponto mais quente, considerado o centro do músculo peitoral) na saída do equipamento.

Na Figura 2.1 mostra-se uma imagem ilustrativa de um chiller. Ao sair do chiller as carcaças podem ser direcionadas para a linha de frango inteiro ou para a linha de cortes. Durante o deslocamento pelo helicóide, as carcaças de frango tendem a acumular-se em um único lado do chiller, em geral, oposto ao qual se encontra a entrada da água de renovação. Isso faz surgir canais preferenciais de fluxo, o que diminui a troca térmica. Assim, para minimizar este efeito, algumas unidades produtoras provocam a movimentação da água fria borbulhando ar em pequenos furos na base do tanque (CARCIOFI, 2005; SILVA, 2007; CARCIOFI e LAURINDO, 2007; CARCIOFI e LAURINDO, 2010).

Figura 2.1 - Imagem de um *chiller*.



Fonte: Marel (2012).

No processo de abate de frangos, cada país possui legislação específica e apresenta uma série de exigências que devem ser cumpridas, entre as quais se encontra a temperatura do centro do músculo peitoral no final do *chiller*. No Brasil, a Portaria nº. 210/98 (BRASIL, 1998) estabelece que a temperatura final da carcaça deve ser 7 °C no máximo. Na União Européia, a legislação é mais restritiva e estabelece a temperatura máxima final de 4 °C, imediatamente antes de seu corte e transporte (CARCIOFI, 2005; KLASSEN et al., 2009).

De acordo com a mesma portaria (BRASIL, 1998), as taxas de renovação de água nos tanques de pré-resfriamento e resfriamento devem ser na proporção mínima de 1,5 e de 1,0 litro de água por carcaça no primeiro (pré-*chiller* de lavagem) e no último estágio (*chiller* resfriador), respectivamente. Esse consumo de água pode chegar a até

25 % do total da água consumida em um frigorífico (RIELLA e GERLOFF, 2009).

Neves Filho (1978) estudou o efeito da quantidade de água utilizada no resfriamento sobre a redução da temperatura no centro do peito de carcaças. Os resultados mostraram que para frangos de 1,2 kg, inicialmente a 40 °C, o aumento da vazão de 1,6 L kg⁻¹ para 2,1 L kg⁻¹ de carcaça não apresentou diferença na redução de temperatura final das carcaças de frango para um mesmo intervalo de tempo (temperaturas finais em torno de 10 °C). Entretanto, quando as vazões foram de 4 L kg⁻¹ de carcaça, houve uma maior redução da temperatura final das carcaças (decréscimo de 40 °C até 7 °C) para o mesmo intervalo de tempo. Neves Filho (1978) também analisou a influência do tempo de respingo (gotejamento) após o *chiller* no percentual de água retida pelas carcaças. Após 5 minutos de gotejamento as carcaças de frango apresentaram um ganho de massa de 10,1 g a cada 100 g de massa inicial de carcaça. Posteriormente, o tempo de gotejamento foi prolongado em 10, 15 e 20 minutos e as carcaças apresentaram um percentual de ganho de massa de 9,3; 8,9 e 8,6 g a cada 100 g iniciais de carcaça, respectivamente. No entanto, um período de 20 minutos de respingo apresentou um aumento na temperatura corporal das carcaças em mais de 2 °C.

Carciofi (2005) realizou estudos de aspectos relacionados com a redução da temperatura e a absorção de água por carcaças resfriadas por imersão. Os parâmetros de processo avaliados pelo autor 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 1470 mm). Os resultados mostraram que para maiores temperaturas, o aumento da pressão hidrostática e a agitação do meio de resfriamento proporcionam uma maior taxa de absorção de água pelas carcaças. A agitação da água proporcionou maior redução de temperatura das carcaças, porém o tempo de resfriamento total não foi inferior ao tempo de 60 min de processo estabelecido pelos autores.

Klassen (2008) apresenta um estudo de diversas arquiteturas de redes neurais artificiais na descrição e modelagem do processo de resfriamento de carcaças de frango, prevendo a temperatura final e o ganho de massa das carcaças. Os resultados obtidos pelas redes neurais não foram eficientes para representar a temperatura de saída das carcaças, porém, as mesmas foram eficientes para estimar a quantidade de água absorvida pelas carcaças de frango no processo de resfriamento por imersão.

Carciofi e Laurindo (2010) avaliaram o resfriamento de carcaças de frango coletadas diretamente da linha de processamento industrial e resfriadas em um tanque piloto de resfriamento em imersão em água, construído para avaliar a influência do método e da intensidade da agitação da água no resfriamento. Os resultados encontrados indicaram claramente que a compreensão e a quantificação da transferência de calor entre as carcaças e a água de resfriamento são essenciais para a melhoria dos processos e equipamentos. Os autores também utilizaram um modelo matemático simplificado para representar os resultados experimentais e concluíram que o modelo proposto foi uma ferramenta útil para representar a dinâmica de resfriamento das carcaças, podendo ser utilizada para comparar diferentes equipamentos e condições operacionais nas plantas industriais.

Martins et al. (2011) em outro trabalho utilizando redes neurais artificiais para a modelagem da absorção de água por carcaças de frango durante o resfriamento por imersão, mostram que as duas técnicas utilizadas (Análise dos Componentes Principais e as Redes Neurais Artificiais) foram promissoras na predição e descrição do fenômeno de absorção de água nas carcaças. Segundo os autores, a técnica de Análise dos Componentes Principais forneceu informações sobre os principais parâmetros do processo e reduziu de 25 para 10 o número de Redes Neurais Artificiais de entrada.

Paolazzi, Noreña e Brandelli (2013) estudaram a influência do tempo de imersão (18, 22 e 27 minutos), período de adição de gelo (3 e 5 minutos) e o número de turbinas usadas na injeção de ar (1 ou 2 turbinas) na temperatura de carcaças de frango ao final do tanque de pré-resfriamento (*pré-chiller*). Os resultados encontrados pelos autores indicam que o tempo de imersão e o número de turbinas foram fatores que influenciaram a temperatura final das carcaças. Segundo os autores, a melhor condição encontrada foi de 27 minutos de imersão, 5 minutos de adição de gelo e injeção de ar por duas turbinas, ao qual correspondeu a uma temperatura e uma absorção de água das carcaças ao final do *pré-chiller* de 14,6 °C e 4,5 g a cada 100 g iniciais de carcaça, respectivamente. Nestas condições, as carcaças atingiram ao final de todo o processo de resfriamento imerso (*pré-chiller* mais *chiller*) uma temperatura e uma absorção de água de 5,4 °C e 6,8 g a cada 100 g iniciais de carcaça, respectivamente.

2.2.2 Resfriamento de carcaças de frango por ar forçado

O processo de resfriamento de carcaças de frango por ar forçado tem sido a forma predominante de processamento destes produtos na Europa nos últimos 40 anos e está avançando significativamente em países como Canadá e EUA (GAZDZIAK, 2006). O aumento da popularidade deste método pode ser atribuído à limitada disponibilidade de água, às restrições das descargas de águas residuais e às mudanças nos regulamentos governamentais com relação aos índices de retenção de umidade nas carcaças de frango. Além disso, o resfriamento por ar forçado de frangos é melhor aceito para importação pelos países da União Europeia, onde o resfriamento imerso de aves não é bem visto (HUEZO et al., 2007b).

No resfriamento por ar forçado, os valores dos coeficientes de transferência de calor convectivos são menores quando comparados aos valores para o resfriamento utilizando-se água. Assim, para um eficiente processo de resfriamento por ar forçado é necessária à adequada exposição do produto ao meio de resfriamento, possibilitando a obtenção de um alto coeficiente de transferência de calor convectivo e, conseqüentemente, elevadas taxas de fluxo de calor (VISSOTTO, KIECKBUSCH e NEVES FILHO, 2000).

O método de resfriamento de carcaças de frango por ar forçado seco pode ser realizado através do fluxo de ar frio soprado diretamente sobre o produto, notadamente sobre a cavidade abdominal e peitoral de uma carcaça ou com circulação de ar refrigerado, com baixa velocidade do ar, no interior de uma câmara refrigerada (ZHUANG et al., 2009; STORK, 2011).

Figura 2.2 - Imagem de um processo de resfriamento por ar forçado em câmara fria.



Fonte: Bell & Evans (2013).

Para certas ocasiões, no resfriamento por ar forçado, a velocidade do ar tem tanto ou quase o mesmo efeito do que a temperatura do ar. A taxa de resfriamento aumenta rapidamente à medida que a velocidade do ar aumenta de 0 para 4 m s^{-1} , por exemplo. Acima de 6 m s^{-1} , o efeito da velocidade do ar sobre a temperatura da carcaça é quase insignificante (THOMSON, WHITEHEAD e MERCURI, 1974 apud HUEZO, 2007a). A grande desvantagem do resfriamento por ar forçado encontra-se na considerável perda de massa, que resulta em um aspecto ressecado na pele da carcaça. Isto contrasta com o ganho de peso resultante do resfriamento em *chillers* por imersão em água. Tais diferenças contribuem para as restrições do comércio internacional entre os países que utilizam os dois diferentes métodos de resfriamento (SAMS, 2001). Durante o resfriamento por ar forçado, o tempo de resfriamento e a perda de massa são funções das condições ambientais dentro da câmara de refrigeração e do espaço entre as carcaças (JAMES et al., 2006).

Segundo Gazdziak (2006), o resfriamento por ar forçado é descrito como o método de resfriamento que proporciona uma maior qualidade à carne de frango. Estudos comparativos entre resfriamento por imersão em água e por ar forçado relatam que, embora a aparência da carcaça seja considerada melhor, o processo de resfriamento por imersão apresenta indesejáveis consequências para a carcaça de frango, como a perda de água no degelo e maiores perdas no cozimento, na comparação com o resfriamento por ar forçado (HUEZO et al., 2007b).

Young e Smith (2004) estudaram e compararam a retenção de umidade de carcaças de frangos resfriadas pelos métodos de ar forçado e por imersão. Os autores relataram que para um método de ar forçado (nas condições do ar de 2 °C de temperatura e 2,2 m³ min⁻¹ de fluxo) as carcaças perderam 0,7 g a cada 100 g iniciais de carcaças, enquanto que no processo por imersão em água (sob agitação constante na temperatura de 1 °C) as carcaças resfriadas ganharam 11,7 g a cada 100 g iniciais de carcaça de umidade. Ainda neste trabalho, foi demonstrado que as carcaças refrigeradas por imersão perderam 5,7 g a cada 100 g iniciais de carcaça de sua umidade durante a etapa de desossa e outros 2,1 g a cada 100 g iniciais de carcaça durante o armazenamento.

Huezo et al. (2007b) investigaram o efeito dos métodos de resfriamento imerso em água e por ar forçado quanto a perda/ganho de massa de carcaças de frango. Os autores relatam que sob um processo em ar forçado a perda média de massa de carcaças de frango foi de 2,5 g a cada 100 g iniciais de carcaça (após 150 min de processo), enquanto que para o processo imerso em água o ganho de massa ficou entre 6 a 12 g a cada 100 g iniciais de carcaça em um tempo inferior a 1 hora de processo. Segundo os autores, esta alta variação nos resultados de ganho de massa provavelmente foi provocada pelo corte da cavidade abdominal das carcaças durante a etapa de evisceração, o grau de exposição do músculo em água e ao sexo do animal (relacionado com a quantidade de gordura).

2.2.3 Resfriamento evaporativo de carcaças de frango

O resfriamento evaporativo utilizado na indústria processadora de carne de frango é uma alternativa aos métodos de resfriamento de carcaças de frangos por imersão e por ar forçado. Nesta técnica, uma fina camada de água pode ser pulverizada sobre as carcaças durante um processo de resfriamento por ar forçado a baixas temperaturas (de 2 °C a 4 °C). A evaporação da água remove o calor das carcaças, e um rápido e efetivo resfriamento é alcançado. A transferência de calor no resfriamento evaporativo é maior do que no resfriamento por ar forçado, pois a mudança de fase (evaporação da água da superfície da carcaça) aumenta muito a transferência de calor entre a carcaça e o ar (MIELNIK et al., 1999).

Os sistemas de aspersão com água refrigerada estão atualmente em uso na América do Norte, Europa e outras partes do mundo para as carnes bovinas, de aves e de suínos (SAVELL, MUELLER e BAIRD, 2005). O uso excessivo de água pode causar absorção de água pela

carçaça. Na indústria, geralmente não se controla com precisão a quantidade de água despejada nas carçaças em um determinado período de tempo de processo, assim como existe uma considerável variação na duração da pulverização refrigerada (GREER e JONES, 1997).

O método de resfriamento evaporativo apresenta uma combinação de mecanismos de convecção e evaporação, aos quais provocam taxas de redução da temperatura das carçaças semelhante às obtidas pelo método de imersão em água (JAMES et al., 2006). Desta forma, verificou-se nos últimos três anos o surgimento de novos estudos comparativos a respeito da influência de diferentes processos de resfriamento de carçaças de frango. Estes estudos analisaram comparativamente os processos de resfriamento de carçaças utilizando ar forçado com a adição de aspersões e também imersões em água, com relação a questões ligadas ao rendimento, taxa de resfriamento, qualidade sensorial e microbiológica de amostras analisadas pelos diferentes métodos de resfriamento (JEONG et al., 2011a,b; PERUMALLA et al., 2011; DEMIROK et al., 2013).

Em alguns países europeus, o processo alternativo para o resfriamento de carçaças de frangos combinando a imersão em água e o ar forçado pode ser encontrado em escala industrial. Nesse processo, elaborado e patenteado pela empresa Holandesa TOPKIP (com o nome de sistema combinado de resfriamento, Figura 2.3), as carçaças são movimentadas individualmente em ganchos de transporte (nórias) através de um sistema aberto de tanques com água fria em contrafluxo (contracorrente), seguido de áreas de gotejamento da água das carçaças sob ar refrigerado até as carçaças atingirem uma temperatura final igual ou inferior a 4 °C. Segundo a empresa europeia, este sistema apresenta algumas vantagens em relação ao controle da perda de água das amostras e apresenta uma economia de até 95 % no consumo de água em comparação com *chillers* de imersão em água fria, além da economia de até 45 % em energia na comparação com o resfriamento por ar forçado (TOPKIP, 2012).

Figura 2.3 - Imagem de um processo de resfriamento combinado.



Fonte: Topkip (2012).

Demirok et al. (2013), em parceria com a empresa Topkip (detentora da patente de resfriamento combinado), analisou comparativamente os processos de resfriamento imerso, por ar forçado e o processo combinado. O processo combinado proposto é composto de duas etapas. Inicialmente, as amostras foram submersas em quatro tanques protótipos contendo água fria em diferentes temperaturas (8 °C, 5 °C, 5 °C e 2 °C, respectivamente) e diferentes tempos de imersão (20 s, 40 s, 80 s e 80 s, respectivamente). Posteriormente, segue-se um resfriamento das amostras por ar forçado (3,6 m s⁻¹, 0 °C e UR = 72 %), até 120 min de processo. O objetivo dos autores foi avaliar comparativamente os parâmetros de qualidade e segurança microbiológica das carcaças de frango resfriadas pelos diferentes métodos de resfriamento.

2.3 Transferência de calor no resfriamento de carcaças

Ao chegar ao frigorífico abatedouro, os frangos, possuem sua temperatura corporal pouco abaixo de 40 °C. Poucos minutos após o abate, as carcaças são submetidas ao processo de escaldagem, permanecendo imersas em água quente (entre 55 °C e 70 °C) pelo intervalo de aproximadamente um minuto. Entre a saída da escaldagem, último momento onde o frango ganha calor de maneira significativa, e a entrada do sistema de refrigeração, há um intervalo de tempo inferior a 15 min, quando a ave é transportada nas nórias para o sistema de

evisceração. As condições de operação do tanque de escaldagem e o intervalo de tempo citado são determinantes da temperatura do centro geométrico do músculo peitoral do frango (temperatura de controle) na entrada do sistema de refrigeração. O tamanho da carcaça também influencia neste valor (CARCIOFI, 2005). Após a etapa de abate, a carcaça de frango deve ser resfriada para reduzir e manter a temperatura da sua musculatura abaixo de um valor que venha garantir sua qualidade e segurança (JAMES et al., 2006).

As indústrias brasileiras, na maioria dos casos, utilizam uma série de chillers para resfriarem as aves. Nestes chillers, o processo de resfriamento se dá pelo contato direto das carcaças com água e gelo. 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 conduzidas 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 (CARCIOFI, 2005).

Durante o resfriamento de alimentos o calor flui por condução até a superfície do produto e é transferido por convecção por um fluido de resfriamento ao ambiente externo do alimento (JACKMAN, SUN e ZHENG, 2007). Um estudo completo do resfriamento de carcaças de frango só é possível quando analisados os fenômenos de condução e convecção de calor conjuntamente (CARCIOFI, 2005). O efeito da radiação na transferência de calor de uma superfície sólida pode ser negligenciado comparado à transferência de calor condutiva e devido à condição de convecção forçada da superfície do sólido para um fluido refrigerado (DINÇER, 1997).

A transferência de calor é considerada em regime estacionário se a temperatura em qualquer ponto dentro de um corpo sólido não muda com o tempo. Se a taxa de transferência de calor entre um produto sólido e sua vizinhança muda com o tempo, a transferência de calor é considerada com em regime transiente e a temperatura em qualquer ponto e o conteúdo de calor do corpo sólido variam com o tempo e no espaço. O resfriamento de alimentos sólidos é um notável exemplo de um processo onde ocorre o regime transiente de transferência de calor (DINÇER, 1997).

O sistema caracterizado por dois diferentes meios, um sólido (carcaça de frango) envolto por um fluido (água fria ou ar frio forçado),

com diferentes temperaturas, induz à transferência de calor convectiva, onde o fluido em movimento irá trocar calor com a superfície do sólido. Quanto maior a movimentação do fluido e maior a área de contato entre os dois meios, mais fácil será o processo de transferência de calor por convecção entre as carcaças e o fluido refrigerado (INCROPERA e DEWITT, 2002). A diferença de temperatura entre os meios também define a taxa de transferência de calor entre as fases, conforme dado pela Lei de Newton do resfriamento,

$$q = Ah(T_S - T_\infty) \quad (2.1)$$

em que A é a área de contato, h é o coeficiente médio de transferência de calor convectivo entre um sólido e o fluido e $(T_S - T_\infty)$ é a diferença entre a temperatura da superfície de um sólido e a temperatura do fluido.

O coeficiente convectivo de transferência de calor depende das propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido, da natureza do escoamento e das condições da camada limite que, por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície do sólido (INCROPERA e DEWITT, 2002).

O conhecimento do coeficiente convectivo de transferência de calor é necessário para o projeto de equipamentos em que a transferência de calor convectiva é usada para processar alimentos. Os estudos de medição ou estimativa do coeficiente de transferência de calor durante as etapas de resfriamento, congelamento e aquecimento de alimentos não estão disponíveis para todas as situações de interesse industrial. Os estudos apontam valores do coeficiente de transferência de calor e correlações para alimentos e condições de processos específicas, que nem sempre podem ser generalizados ou extrapolados (DINÇER, 1993; BECKER e FRICKE, 2004).

Os fatores que determinam o coeficiente de transferência de calor estão relacionados com as propriedades térmicas e físicas do meio de resfriamento, com as condições de fluxo (velocidade local em relação ao alimento, turbulência), com as dimensões e formas geométricas dos alimentos. O efeito destes fatores no coeficiente de transferência de calor são frequentemente expressos por correlações entre os números de Nusselt (Nu), Reynolds (Re) e Prandtl (Pr).

Para Amendola e Teruel (2005) uma das causas mais comuns de erro nos cálculos dos processos de transferência de calor envolvendo

estes produtos é originada pelo valor adotado para o coeficiente de transferência de calor.

Landfeld e Houska (2006), em estudo com um “frango metálico” como um modelo físico simplificado, estimaram o coeficiente de transferência de calor (h) durante o resfriamento por ar forçado em um túnel, verificando a influência deste método de resfriamento sobre o valor de h . Os autores relataram que o valor de h entre a amostra metálica e o ar frio foi de cerca de $50 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, considerando um frango metálico correspondente à forma de uma carcaça de 1,5 kg submetida a uma velocidade do ar de $1,3 \text{ m s}^{-1}$ em um ambiente refrigerado com umidade relativa entre 76 e 90 %. Segundo os autores não houve uma maior redução na temperatura do sólido durante o resfriamento devido a sua superfície metálica não estar suficientemente umedecida, o que ocorre em situações reais que apresentam evaporação da água superficial das carcaças de frango. Quando o resfriamento evaporativo foi considerado (a partir de dados experimentais de perda de massa durante o resfriamento de carcaças de frango), os autores encontraram valores do coeficiente h entre o ar e a amostra de $19 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

Santos et al. (2007) apresentaram um estudo com o objetivo de desenvolver uma metodologia simples e apropriada para determinar a distribuição espacial dos valores do coeficiente de transferência de calor (h) no interior de túneis de congelamento. O procedimento experimental adotado pelos autores correspondeu à utilização de um tanque de metal retangular preenchido com uma solução alcoólica, com um sensor de temperatura inserido no seu interior, como um sistema modelo. As temperaturas transientes do sistema (solução tanque) foram utilizadas para calcular os valores de h em diferentes posições no interior dos túneis. O resultado encontrado utilizando a metodologia experimental foi reprodutível e confiável na determinação do h dentro de túneis industriais. Segundos os autores o método foi sensível o suficiente para determinar as heterogeneidades espaciais e mostrou versatilidade com relação à geometria do sistema.

James et al. (2006) relatam dados sobre a influência dos parâmetros de resfriamento (custos de operação, perda de massa e tempo de resfriamento) e métodos de resfriamento (imersão em água, ar forçado e evaporativo) na qualidade de carcaças de frango (textura e aparência). De acordo com os autores, o tempo necessário para resfriar as carcaças de frango é um parâmetro crítico para o desenvolvimento de qualquer sistema de resfriamento. Nesse mesmo trabalho, os autores citam um estudo de Cook e Sair (1938), ao qual é proposta uma equação

para prever o tempo de resfriamento de carcaças de frango resfriadas por ar forçado. Esta equação (2.2) é baseada em um grande número de dados experimentais de massa de carcaça e temperatura do ar durante o resfriamento, mas não inclui a velocidade do ar e detalhes sobre a suspensão das mesmas no equipamento.

$$t^* = -5 + 6,23 \log_{10}(T_i - T_\infty) + 1,156W \quad (2.2)$$

onde t^* é o tempo (horas) para resfriar a carcaça a 2 °F acima da temperatura do ar, T_i é a temperatura inicial da carcaça (°F), T_∞ é a temperatura do ar, e W é a massa da carcaça (lb).

2.4 Absorção de água

Durante o processo de resfriamento por imersão, as carcaças absorvem água que entra, principalmente, nos espaços intercelulares que aumentam durante o estabelecimento do *rigor mortis* (DUFOUR e RENO, 2002). A absorção de água é dependente da temperatura e do tempo de resfriamento por imersão, sendo regulada nas indústrias pela inspeção federal. O controle é realizado diretamente nos tanques industriais, identificando algumas carcaças e determinando o seu ganho de água após o processo de resfriamento nos tanques. 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 (CARCIOFI, 2005).

A legislação brasileira permite o valor máximo de absorção de água de 8 g a cada 100 g iniciais de carcaça (diferença percentual da massa inicial e final da carcaça em relação à massa inicial da mesma) durante o processamento industrial e um percentual de 6 g a cada 100 g iniciais de carcaça de água resultante do descongelamento de carcaças congeladas (método do gotejamento) (BRASIL, 1998).

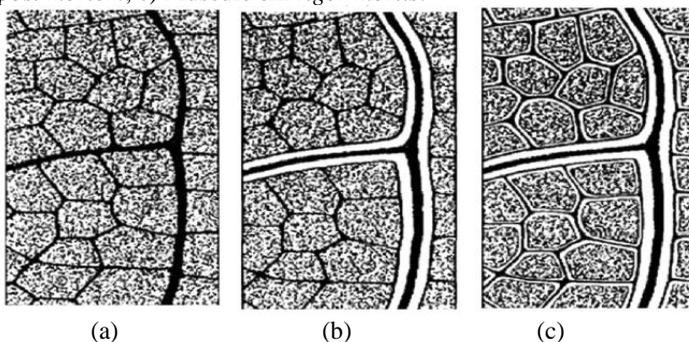
Dados sobre absorção de água em carcaças de frangos relatados por Young e Smith (2004) mostram que os níveis de absorção em carcaças maiores foram superiores que em carcaças menores, onde o tempo de imersão é a variável mais importante associada a essa absorção. James et al. (2006) sugerem que, além do tempo de imersão, a agitação da água é outro fator relevante no controle da quantidade de água absorvida pelas carcaças durante o resfriamento por imersão. Os mesmos autores apresentam dados da literatura que mostram ganho de massa para resfriamento em tanques de imersão, perda de massa para o

resfriamento utilizando ar frio e perdas reduzidas (ou mesmo pequenos ganhos) de massa nas carcaças para os processos de resfriamento utilizando aspersão de água.

Young e Smith (2004) e Jeong et al. (2011a) relatam que a umidade absorvida pelas carcaças durante o resfriamento imerso é parcialmente perdida em um processamento posterior e exposição ao varejo, causando problemas tais como a perda de rendimento, cor e odores indesejáveis e também questionamentos sobre a segurança microbiológica das amostras.

Segundo Offer e Cousin (1992), há dois tipos de espaços intercelulares no músculo *post mortem*. Os espaços entre as fibras e o perimísio e os espaços entre as fibras e o endomísio, que podem ser considerados como capilares abertos nas duas extremidades. Certamente, estes capilares apresentam-se como um dos caminhos preferenciais à absorção de líquidos no músculo animal durante um resfriamento realizado de maneira totalmente imersa. A Figura 2.4 mostra de forma esquemática as mudanças estruturais que ocorrem no músculo bovino em três situações: a) imediatamente após o abate, quando pequenos espaços intercelulares são observados; b) algum tempo *post mortem*, quando os primeiros espaços intercelulares entre as fibras e o perimísio aparecem; c) músculo em *rigor mortis*, quando os espaços entre os feixes de fibras aparecem (OFFER e COUSIN, 1992; SCHMIDT, CARCIOFI e LAURINDO, 2008).

Figura 2.4 - Mudanças estruturais que ocorrem no músculo bovino após a morte animal. a) Músculo vivo ou imediatamente após o abate; b) Músculo de 4 a 6 horas *post mortem*; c) Músculo em *rigor mortis*.

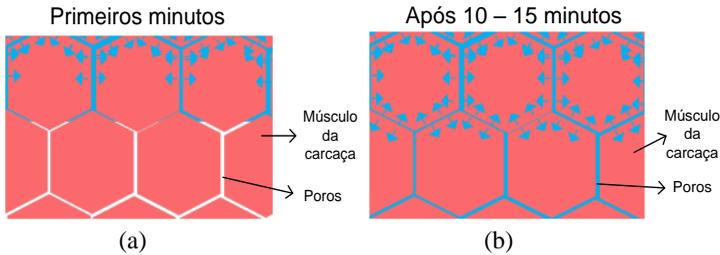


Fonte: Offer e Cousin, 1992 e Schmidt et al., (2008).

De acordo com Carciofi e Laurindo (2007), as carcaças de aves absorvem água rapidamente até que os poros (espaços intercelulares)

estejam parcialmente preenchidos pelo líquido (Figura 2.5a). De 10 a 15 minutos após a imersão (Figura 2.5b), uma segunda etapa de absorção de água ocorre, com uma redução na taxa de absorção de água, sendo controlado por uma pseudo-difusão interna de água no músculo. Os autores também demonstraram que a temperatura de operação do *chiller*, o nível de agitação da água (promovido por recirculação da água ou por injeção de ar comprimido), a pressão hidrostática sobre as carcaças e o tempo de imersão são parâmetros determinantes da quantidade de água absorvida pela carcaça.

Figura 2.5 – Modelo físico para o mecanismo de absorção de água por carcaças de frangos. (a) Primeiro passo da absorção de água, controlada através de mecanismo hidrodinâmico; (b) Segundo passo da absorção de água, quando há migração interna da água absorvida (mecanismo pseudo-difusivo).



Fonte: Adaptado de Carciofi e Laurindo (2007)

Desta forma, após a exposição do estado da arte que sustenta este trabalho, no próximo item será apresentada a metodologia empregada, a descrição do equipamento utilizado e as considerações realizadas para os cálculos dos parâmetros de interesse.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento experimental seguiu duas abordagens. Na primeira foi avaliada a contribuição do fenômeno evaporativo no coeficiente convectivo de transferência de calor (h) entre uma esfera metálica modelo e o ar forçado, a partir de três arranjos do sistema: I) para uma esfera de alumínio descoberta; II) uma esfera de alumínio coberta por um tecido de algodão seco; e III) uma esfera de alumínio coberta por um tecido de algodão molhado. Na segunda abordagem foi avaliado o resfriamento de carcaças de frango por imersão em água fria, pela passagem de ar forçado e pela combinação desses dois.

Para a execução de ambas as abordagens; foi utilizado um aparato experimental especialmente desenvolvido e construído no Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI) do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC, conforme esquematizado na Figura 3.1.

3.1 Aparato experimental

Uma câmara frigorífica com volume útil de 0,95 m³ (dimensões internas: 0,95 x 1,02 x 0,98 m, profundidade x largura x altura, respectivamente) foi equipada com dispositivos para o controle independente da umidade relativa (UR) e da temperatura do ar interno. A câmara dispunha de um ventilador para direcionar o ar e um sistema de elevação e pesagem das amostras. O aparato experimental foi instrumentado permitindo a aquisição e o registro instantâneo da UR e temperatura do ar e da temperatura das amostras.

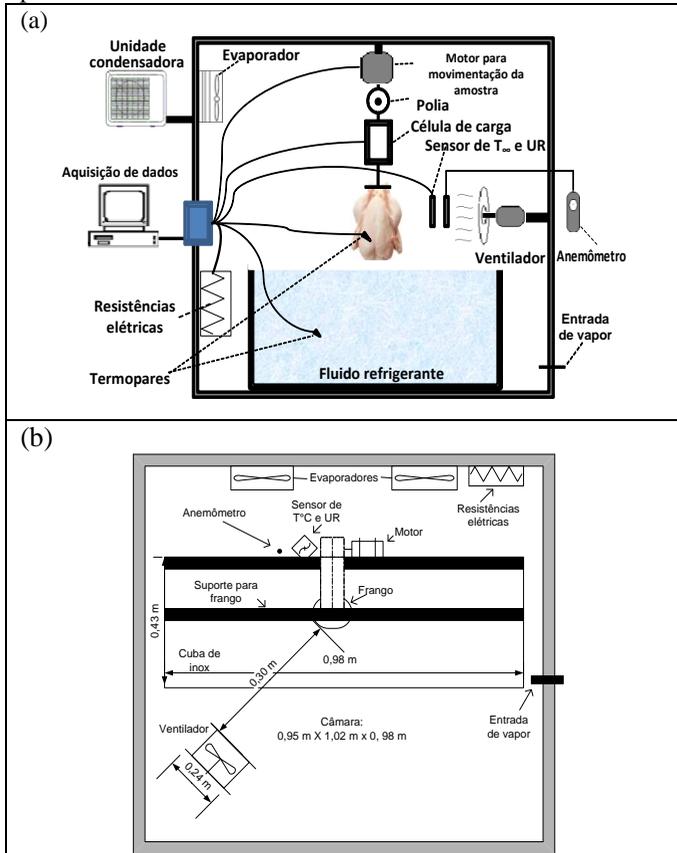
• Aquisição e registro de dados

Um transmissor incorporando os sensores de umidade e temperatura (Novus, RHT-WM, Brasil) foi utilizado para a medição e auxílio do controle da UR e temperatura do ar no interior da câmara fria. Este transmissor apresenta uma faixa de atuação configurável de UR e temperatura entre 0 e 100 % e -40 e 120 °C, respectivamente. As precisões dos sensores de UR e temperatura são de ± 3 % e $\pm 1,5$ °C, respectivamente. Uma interface eletrônica (Novus, N1100, Brasil) conectou o transmissor de UR e temperatura do ar a um computador para a aquisição e registro dos dados experimentais destas duas variáveis através de software Field Chart (Novus, versão 1.8, Brasil).

Todas as demais temperaturas no interior da câmara fria foram medidas com termopares do tipo T. A conversão do sinal analógico para digital foi realizada pelo sistema de aquisição de dados (Agilent,

34972A, USA) utilizando um módulo multiplexador com 20 canais (Agilent, 34902A, USA). Os termopares foram previamente calibrados entre 2 °C e 50 °C utilizando um termômetro de mercúrio aferido (Incoterm, 28368/01, Brasil) como padrão.

Figura 3.1 - Aparato experimental especialmente desenvolvido e construído para o estudo do processo de resfriamento deste trabalho. (a) Vista frontal; (b) Vista superior.



• Controle da UR do ar

O controle da UR foi baseado na condensação do vapor de água durante a passagem do ar pelo trocador de calor do sistema de refrigeração da câmara, compensando a quantidade de água evaporada durante o resfriamento das amostras. Para tal, foi utilizado um inversor de frequência (Danfoss, VLT Micro drive FC 51, China) atuando na

velocidade de rotação do compressor (Danfoss, LCZ 136 - 4,5 HP, Brasil) integrante desse sistema de refrigeração. As variações na rotação do compressor implicaram em alterações da carga térmica removida pelo fluido refrigerante interno à unidade condensadora e, conseqüentemente, alteravam a quantidade de água condensada. Para controle em maiores valores de UR, foi adicionado ao sistema vapor saturado (em temperatura de 111 °C e pressão manométrica de 0,5 kgf cm⁻²) gerado em uma autoclave (Phoenix, AV-50, Brasil) conectada à câmara fria. A inserção do vapor foi realizada pela abertura manual de uma válvula.

• Controle da temperatura do ar

Com o compressor funcionando continuamente, o controle da temperatura do ar no interior da câmara fria foi realizado por um controlador PID (Novus, N1100, Brasil) integrado a um sensor de temperatura (Novus, RHT-WM, Brasil) posicionado no interior da câmara fria. Esse controlador atuou em um conjunto de resistências elétricas alterando a potência dissipada.

• Circulação do ar

O ar frio que circulava na câmara teve o fluxo direcionado por um ventilador (WEG, 1000 rpm, Brasil), em duas velocidades, determinadas por um termo-anemômetro digital (Testo, modelo 425, faixa 0 a 20 m s⁻¹, precisão ±0,03 m s⁻¹, Alemanha). Para a configuração experimental utilizando uma esfera metálica, os valores das velocidades do ar fornecidas pelo ventilador foram 0,92 m s⁻¹ (V_{1E}) e 1,42 m s⁻¹ (V_{2E}). Para a configuração experimental utilizando carcaças de frango, os valores das velocidades do ar (fornecidas após modificação do posicionamento do ventilador) foram 4,07 m s⁻¹ (V_{1F}) e 5,66 m s⁻¹ (V_{2F}).

As medidas das velocidades do ar referem-se às distâncias das amostras (esfera e carcaças) até o ventilador. No Apêndice A estão ilustrados esquematicamente os pontos de medição e os valores das velocidades do ar em cada ponto de medição ao redor de uma amostra de carcaça de frango durante um processo experimental de resfriamento no interior da câmara fria.

• Movimentação e pesagem

Um sistema de movimentação e pesagem de carcaças de frango especialmente desenvolvido para este estudo foi instalado no interior da câmara fria. Um motor automatizador (PPA, New Home - ¼ HP, Brasil) conectado a cabos de aço e polias que executam o movimento dos cabos na direção vertical, foi utilizado com a intenção de realizar a imersão de

carcaças de frango em uma cuba de aço inox (dimensões internas: 0,98 m x 0,43 m x 0,45 m). Este dispositivo experimental funciona de maneira automatizada por meio de um controlador lógico programável - CLP (Novus, NSR-CPU18-DR0-AC, Brasil). O sistema de movimentação permite a imersão das carcaças em água fria por um tempo definido e sua remoção para exposição ao ar frio, auxiliando na investigação do processo de resfriamento por um método combinado de imersão em água-ar forçado.

A massa instantânea da carcaça foi determinada por uma célula de carga (Líder, CS50, Brasil) com capacidade de 10 kg e exatidão de 5 g, conectada ao sistema de movimentação que sustentava as carcaças. Uma interface eletrônica (Líder, LD 1050, Brasil) conectada a um computador possibilitou o monitoramento e o registro dos dados da evolução temporal da massa das carcaças no interior da câmara fria. Para tal, utilizou-se o software AQ Pesagem (Altem, Brasil). A frequência de aquisição foi de 1 medida a cada 5 segundos.

3.2 Determinação do coeficiente convectivo médio de transferência de calor entre uma esfera e o ar frio (h)

Uma esfera maciça de alumínio (diâmetro: $D_{Al} = 0,10$ m e massa: $m_{Al} = 1,41$ kg) foi utilizada como meio modelo para avaliar a influência do mecanismo evaporativo no coeficiente convectivo médio de transferência de calor (h) entre a esfera e o ar refrigerado. Essa esfera foi inserida no interior da câmara fria descrita no item 3.1. Nestes ensaios, a cuba de aço e o sistema de movimentação e pesagem foram removidos do interior da câmara. A esfera foi mantida suspensa por uma rígida haste de polietileno, cujo material foi selecionado para minimizar a transferência de calor condutiva da mesma.

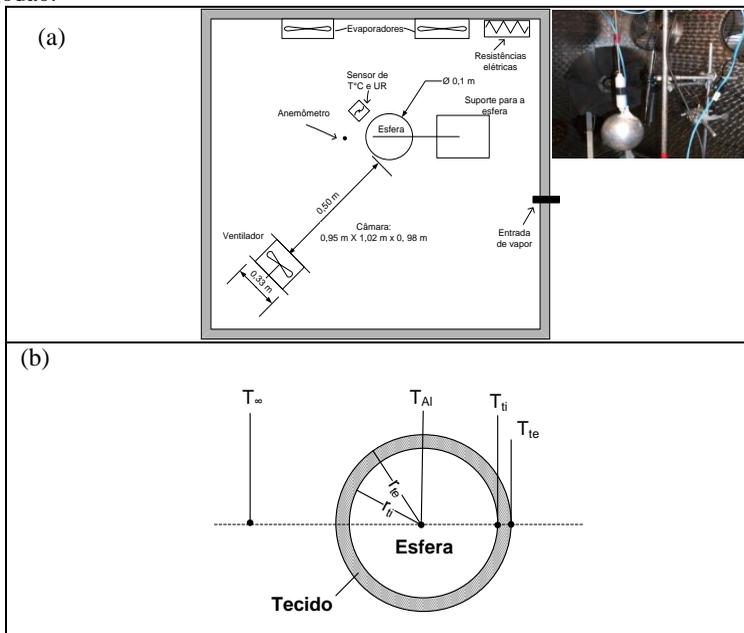
A temperatura do centro da esfera (T_{Al}) foi medida por um termopar tipo T (IOPE, AWG 24, Brasil) inserido no centro geométrico da esfera através de um canal perfurado com uma máquina de precisão mecânica. Esse canal foi preenchido com uma cola térmica (IPT300, Implastec, Brasil) e selado com uma resina epóxi comercial (Araudite Profissional, Brascola, Brasil). O resfriamento foi conduzido em três arranjos da esfera: descoberta, coberta com um tecido de algodão seco e coberta com o mesmo tecido molhado. Os valores de tempo-temperatura para o ar refrigerado (T_w) e para as superfícies interna (T_i) e externa (T_e) do tecido de algodão foram medidas com termopares do tipo T (IOPE, A-TX-TF-TF-R AWG 30, Brasil). Todas as temperaturas foram

registradas conforme o sistema descrito no item 3.1, com frequência de aquisição de uma medida a cada 5 segundos.

As propriedades físicas do alumínio (300 K) foram assumidas constantes: massa específica, $\rho_{Al} = 2702 \text{ kg m}^{-3}$; calor específico, $C_{pAl} = 903 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e condutividade térmica, $k_{Al} = 237 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (INCROPERA e DEWITT, 2002). O tecido seco de algodão teve massa seca (m_{ts}) de 0,009 kg e espessura de 0,001 m. O diâmetro da esfera coberta com tecido (D_{te}) foi de 0,102 m. O calor específico do tecido de algodão ($C_{p_{ts}}$) foi considerado constante no valor de $1300 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (300 K) (INCROPERA e DEWITT, 2002).

A Figura 3.2 mostra a representação esquemática da vista superior da câmara fria utilizada para o processo de resfriamento de uma esfera modelo e dos sensores de temperatura quando da utilização do tecido molhado cobrindo a esfera.

Figura 3.2 - Montagem experimental usada para estudar o processo de resfriamento por ar forçado de uma esfera. (a) Vista superior; (b) Representação esquemática do posicionamento dos termopares na esfera coberta com tecido de algodão.



3.2.1 Coeficiente h para a esfera descoberta

Inicialmente, a esfera de alumínio foi aquecida e mantida a temperatura de 38 °C (temperatura espacialmente homogênea) por um banho termostático (Tecnal, TE-184, Brasil). Posteriormente, a esfera foi rapidamente conduzida até a câmara fria, com o prévio ajuste da temperatura (1,0 °C) e velocidade do ar (V_{1E} ou V_{2E}). O processo de resfriamento foi monitorado até a temperatura do centro da esfera atingir 4,0 °C, temperatura final típica do resfriamento de carcaças de frango e outros alimentos. Este procedimento foi realizado em quintuplicata para cada condição do ar.

O coeficiente convectivo médio de transferência de calor (h) entre a esfera e o ar forçado foi calculado a partir de evoluções de temperatura da esfera e do ar forçado segundo o método da capacitância térmica global (*Lumped Capacitance Method*). Esse método pode ser utilizado quando a resistência térmica à transferência de calor por condução no interior de um sólido (R_{cond}) for desprezível em comparação à resistência térmica convectiva entre um fluido em contato com a superfície desse sólido (R_{conv}). Como consequência, a temperatura no interior do sólido é considerada espacialmente uniforme em qualquer instante do processo. Em geral, essa aproximação é considerada pertinente se o número de Biot (Bi , Equação (3.1)) for menor do que 0,1 (INCROPERA e DEWITT, 2002), indicando que R_{cond} é inferior a 10 % do valor de R_{conv} .

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{\frac{L}{k_{Al}A}}{\frac{1}{hA}} = \frac{Lh}{k_{Al}} \quad (3.1)$$

na qual k_{Al} é a condutividade térmica do sólido (alumínio) e L é a dimensão característica, definida como a razão entre o volume e a área superficial do sólido.

A validade da aplicação do método da capacitância térmica global para a análise dos resultados experimentais foi verificada após a determinação do h entre a esfera e o ar refrigerado pelo cálculo do Bi . A dimensão característica para uma esfera é um sexto do diâmetro.

A Equação (3.2) representa o balanço de energia na esfera pelo método da capacitância térmica global, assumindo a ausência de gradientes de temperatura no interior do sólido.

$$-hA(T_{Al}-T_{\infty})=m_{Al}Cp_{Al}\frac{dT_{Al}}{dt} \quad (3.2)$$

na qual A é a área de troca de calor convectiva na superfície da esfera de alumínio, m_{Al} é a massa da esfera, Cp_{Al} é o calor específico do material, T_{Al} e T_{∞} são as temperaturas da esfera e do fluido externo, respectivamente, e t é o tempo.

Integrando a Equação (3.2) obtém-se a Equação (3.3), a qual foi utilizada para determinar os valores de h por uso da regressão linear aos dados experimentais da evolução temporal da temperatura:

$$\ln\left(\frac{T_0-T_{\infty}}{T_{Al}-T_{\infty}}\right)=\frac{Ah}{m_{Al}Cp_{Al}}(t-t_0) \quad (3.3)$$

na qual T_0 é a temperatura inicial do sólido no instante t_0 (condição inicial).

3.2.2 Coeficiente h_{ef} para a esfera coberta por um tecido de algodão molhado

A esfera de alumínio recoberta pelo tecido de algodão, conforme descrito previamente, foi imersa na água de um banho termostático (Tecnal, TE-184, Brasil), mantida a temperatura de 38 °C até atingir o equilíbrio térmico. Em seguida, o tecido molhado foi drenado por 40 s para a retirada do excesso de água, sendo imediatamente conduzido à câmara fria para realização do processo de resfriamento. Os experimentos foram realizados em quintuplicada para cada uma das seis condições do ar de resfriamento: duas velocidades de escoamento (V_1E e V_2E) com três umidades relativas, sendo uma condição de baixa UR (30 %), uma UR intermediária (60 %) e outra de alta UR (90 %). O processo de resfriamento foi monitorado até a temperatura do centro da esfera atingir 4,0 °C.

A Equação (3.4) representa o balanço de energia na esfera recoberta pelo tecido. Nesse balanço considerou-se que a variação da energia contida no conjunto esfera metálica e tecido molhado (lado direito da Equação (3.4)) foi consequente do fluxo de calor convectivo na superfície do tecido em contato com o ar (lado esquerdo da Equação (3.4)).

$$-h_{ef}A_{re}(T_{te} - T_{\infty}) = m_{tm}Cp_{tm}\left(\frac{d\bar{T}}{dt}\right)_{tm} + m_{Al}Cp_{Al}\left(\frac{dT}{dt}\right)_{Al} \quad (3.4)$$

na qual A_{re} é a área de troca de calor convectiva na superfície externa do tecido de algodão molhado, T_{te} , \bar{T}_{tm} e T_{∞} são as temperaturas da superfície do tecido molhado, a temperatura média do tecido molhado e do fluido externo, respectivamente, m_{tm} e Cp_{tm} são a massa e o calor específico do tecido molhado, respectivamente, e m_{Al} e Cp_{Al} são a massa e o calor específico da esfera, respectivamente.

Em um dado instante, a temperatura média \bar{T}_{tm} pode ser calculada pela Equação (3.5):

$$\bar{T}_{tm} = \frac{\int_{r_{ii}}^{r_{te}} T_{tm}(r) 4\pi r^2 dr}{\int_{r_{ii}}^{r_{te}} 4\pi r^2 dr} \quad (3.5)$$

na qual r_{ii} e r_{te} são o raio da superfície interna da esfera e da superfície externa do tecido molhado, respectivamente, e $T_{tm}(r)$ é a distribuição de temperatura na casca esférica em função da distância radial ao centro da esfera (r), expressa pela Equação (3.6):

$$T_{tm}(r) = T_{ii} - (T_{ii} - T_{te}) \left(\frac{1 - \frac{r_{ii}}{r}}{1 - \frac{r_{ii}}{r_{te}}} \right) \quad (3.6)$$

na qual T_{ii} e T_{te} são as temperaturas da superfície interna e externa do tecido de algodão, respectivamente.

Assim, após a integração, \bar{T}_{tm} é expressa de acordo com a Equação (3.7):

$$\bar{T}_{tm} = T_{ii} - \frac{(T_{te} - T_{ii})}{(r_{te}^3 - r_{ii}^3)(r_{te} - r_{ii})} \left(r_{te}^4 - \frac{3}{2} r_{ii} r_{te}^3 + \frac{1}{2} r_{ii}^3 r_{te} \right) \quad (3.7)$$

As propriedades físicas da esfera de alumínio foram consideradas constantes, enquanto que as propriedades físicas do tecido de algodão foram corrigidas ao longo dos experimentos em função da quantidade de

água presente. O produto entre a massa e o calor específico do tecido de algodão molhado foi calculado para cada instante pela Equação (3.8):

$$m_{tm}Cp_{tm} = (mCp)_{ts} + (m(t)Cp)_{ag} \quad (3.8)$$

no qual $(mCp)_{ts}$ e $(m(t)Cp)_{ag}$ é o produto entre a massa e o calor específico do tecido de algodão e da água, respectivamente. O calor específico da água foi considerado constante e igual a $4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (INCROPERA e DEWITT, 2002).

A variação da massa de água presente no tecido de algodão foi medida em uma balança semi-analítica (Gehaka, BG 400, Brasil) em diferentes intervalos de tempo durante os experimentos de resfriamento. Essa variação foi expressa percentualmente em relação à massa inicial de água presente no tecido, a qual foi determinada experimentalmente em dez repetições (média = 0,0338 kg e desvio padrão = 0,0003 kg). Uma equação empírica (Equação (3.9)) foi ajustada aos dados experimentais da massa de água pelo tempo:

$$m(t)_{ag} = a \cdot \exp(-b \cdot t) + c \quad (3.9)$$

na qual a , b , e c são as constantes ajustáveis.

Os valores de h_{ef} (que considera o efeito térmico e o evaporativo) foram calculados pela Equação (3.10) a cada intervalo de 5 segundos, possibilitando o cálculo em um valor médio desses.

$$h_{ef} = \frac{l}{A_{te}(T_{te} - T_{\infty})} \left(m_{tm}c_{tm} \frac{\overline{\Delta T_{tm}}}{\Delta t} + m_{Al}c_{AL} \frac{\Delta T_{Al}}{\Delta t} \right) \quad (3.10)$$

no qual T_{te} , T_{∞} , m_{tm} , Cp_{tm} , $\overline{\Delta T_{tm}}$ e ΔT_{Al} foram os resultados experimentais registrados a cada $\Delta t = 5 \text{ s}$.

Os experimentos para determinação do h_{ef} foram realizados em quintuplicatas.

3.2.3 Coeficiente h para a esfera coberta por um tecido de algodão seco

A esfera coberta por um tecido seco foi previamente aquecida em forno elétrico (Fischer, Brasil) até a temperatura de $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A determinação do coeficiente h foi realizada como descrito para a esfera

coberta com tecido molhado (item 3.2.2) com o valor da massa de água ($m(t)_{ag}$) mantido igual a zero.

3.2.4 Correlação empírica para estimativa do coeficiente h

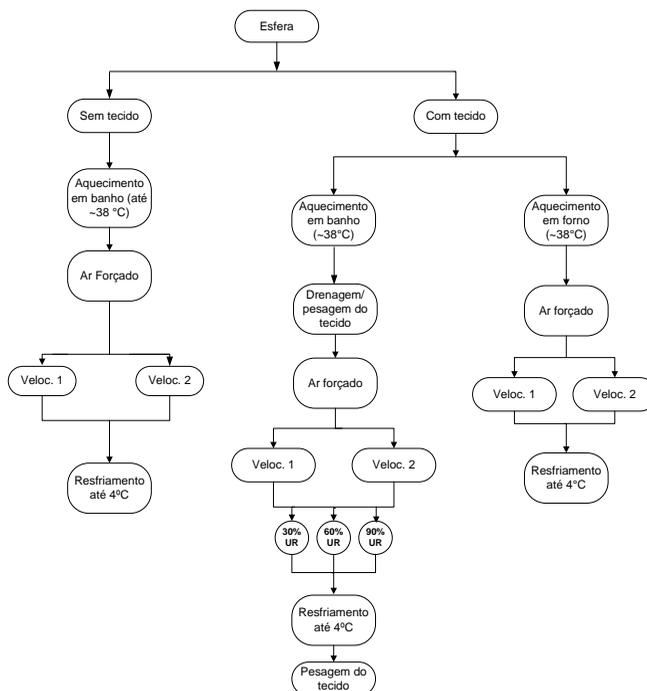
O coeficiente h entre uma esfera e um fluido que escoar ao seu redor (sem transferência simultânea de massa) pode ser estimado por correlações empíricas. Dentre as correlações, algumas das mais utilizadas são as propostas por McAdams (1954), por Whitaker (1972) e por Achenbach (1978). Dessas, a correlação que apresentou os melhores resultados foi a proposta por McAdams que é específica para gases escoando ao redor de esferas (Equação (3.11)), sendo todas as propriedades avaliadas na temperatura de película do fluido. A correlação é limitada pelo Número de Reynolds (Re) entre 17 e 70000 (HOLMAN, 1992).

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0,37(Re)^{0,6} = 0,37 \left(\frac{\rho VD}{\mu} \right)^{0,6} \quad (3.11)$$

na qual Nu é o número de Nusselt, D é o diâmetro da esfera, k é a condutividade térmica do gás), ρ é a massa específica do gás, V é a velocidade do gás, e μ é a viscosidade dinâmica do gás. Neste estudo os valores de Reynolds apresentaram-se próximos de 7000 e 10500 para as velocidades do ar V_1E e V_2E , respectivamente.

A Figura 3.3 sumariza as abordagens experimentais na forma de um diagrama das etapas realizadas no estudo do processo de resfriamento por ar forçado de uma esfera.

Figura 3.3 - Diagrama geral das etapas realizadas nos ensaios de resfriamento por ar forçado de uma esfera modelo.



3.3 Resfriamento das carcaças de frango

As carcaças de frango foram resfriadas em três diferentes condições para o fluido de resfriamento. Foram comparados os processos por imersão em água fria (IA), pelo uso de ar frio (AF) e pelo método combinado (CO). Neste último, a carcaça permaneceu a maior parte do tempo em contato com o ar frio, sendo imersa em água a cada intervalo de tempo pré-determinado.

3.3.1 Metodologia experimental

O aparato experimental utilizado nesta etapa do trabalho é o mesmo descrito no item 3.1 e representado esquematicamente na Figura 3.1. Em todos os experimentos, as carcaças foram resfriadas desde

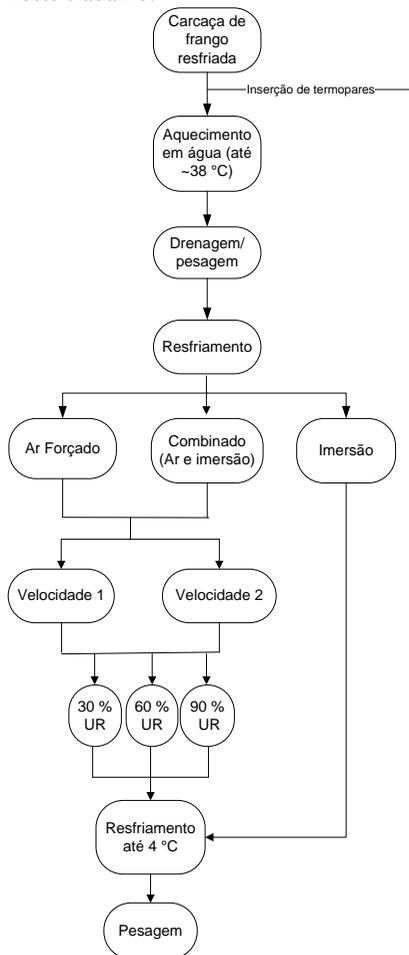
aproximadamente 38 °C até 4,0 °C na região central do músculo peitoral.

No processo AF, as carcaças foram suspensas em um gancho e resfriadas por ar frio (1,0 °C) forçado em três UR (30 %, 60 % e 90 %) e duas velocidades do ar ($V_{1F} = 4,07 \text{ m s}^{-1}$ e $V_{2F} = 5,66 \text{ m s}^{-1}$). No processo IA, as carcaças de frango foram mantidas submersas em uma cuba de aço inox contendo 0,139 m³ de água fria (1,0 °C) e sem agitação. No processo CO, as carcaças foram resfriadas igualmente ao processo AF, exceto pela imersão em água (nas mesmas condições do IA) durante 5 s, a cada 15 min de exposição ao ar. A temperatura do sistema foi mantida pelo ar circulante no interior da câmara fria, cuja programação foi de 1,0 °C (com variação de 1,0 °C) para todos os experimentos realizados. Nos processos AF e CO uma carcaça de frango foi utilizada a cada experimento, enquanto que no processo IA foram utilizadas três carcaças de frango simultaneamente a cada experimento.

A medição e o registro das temperaturas das amostras e dos fluidos de resfriamento foram realizados em intervalos de 5 segundos por termopares tipo T (IOPE, A-TX-TF-TF-R AWG 30, Brasil), conforme descrito no item 3.1.

A Figura 3.4 apresenta um diagrama geral das etapas realizadas no estudo do processo de resfriamento por ar forçado (2 velocidades e em 3 UR, resultando 6 diferentes condições), por imersão em água e combinado (2 velocidades e em 3 UR, resultando 6 diferentes condições) das carcaças de frango, totalizando 13 diferentes condições experimentais.

Figura 3.4 - Diagrama experimental dos processos de resfriamento de carcaças de frango avaliados neste trabalho.



3.3.2 Matéria-prima e preparo das amostras

Os experimentos de resfriamento foram realizados com carcaças de frango oriundas de uma mesma unidade de abate, na cidade de São José-SC, e adquiridas no mercado local da cidade de Florianópolis-SC. Anteriormente à realização dos experimentos, as carcaças foram armazenadas em freezer a -18 °C . A massa inicial de cada carcaça variou de 1,8 a 2,5 kg.

Para todos os processos de resfriamento (AF, CO e IA), as carcaças foram descongeladas e aquecidas, sem embalagem, em recipiente com água em temperatura controlada (40 °C) até a temperatura do ponto central (a 20 mm da superfície) do músculo peitoral atingir 38 °C. Em seguida, as carcaças foram mantidas suspensas por 30 segundos para drenagem do excesso de água e, em seguida, foi determinada a massa em uma balança digital (Filizola, CS-6, Brasil).

Antes de iniciar o resfriamento, dois termopares foram inseridos na musculatura peitoral das carcaças, em profundidades de 20 mm e 10 mm a partir da sua superfície. A primeira posição, a 20 mm da superfície, é estimada como próximo da região mais quente da carcaça. Carcaças com massa na faixa estudada neste trabalho (2,1 kg em média) apresentam espessuras desse músculo entre 40 mm e 45 mm de espessura. De acordo com a legislação brasileira (BRASIL, 1998), o controle do processo de resfriamento das carcaças de frango deve ser realizado pela medida da temperatura do centro do músculo peitoral. Entretanto, não há descrição mais detalhada de como determinar a posição exata, uma vez que o músculo não possui uma forma geométrica clássica e varia entre diferentes carcaças.

3.3.3 Variação de massa durante o resfriamento

A determinação da variação da massa (ΔM) das carcaças de frango submetidas às diferentes condições de resfriamento foi calculada pela Equação (3.12). Os valores são expressos em gramas de água por 100 gramas da amostra antes do resfriamento.

$$\Delta M = 100 \frac{m_F - m_{Fi}}{m_{Fi}} \quad (3.12)$$

na qual m_{Fi} é a massa da carcaça antes do resfriamento e m_F é a massa da carcaça em um instante durante o resfriamento.

A massa final das carcaças foi determinada para cada uma das 13 combinações experimentais de resfriamento. Esses experimentos foram repetidos 9 vezes e, em 3 dessas repetições, a massa das carcaças foi medida ao longo do processo, em intervalos de cerca de 10 ou 15 minutos. Nesse último caso, foram realizadas rápidas medições das massas com subsequente retorno das amostras ao equipamento. Cada carcaça foi reutilizada uma vez neste procedimento experimental.

A equação empírica proposta por Azuara et al. (1992) permite estimar a umidade final de equilíbrio para experimentos curtos. A partir de um balanço de massa no material que é seco (ou absorve água), pode ser escrita a equação:

$$\Delta m_{aj} = \Delta m_{\infty} - \Delta m^* \quad (3.13)$$

na qual Δm_{aj} é a variação da massa da amostra ajustada a equação proposta por Azuara et al. (1992) em um determinado tempo t , Δm_{∞} é a variação de massa no equilíbrio e Δm^* é a variação de massa incompleta (fração de massa que pode ser perdida, mas ainda permanece na amostra em um tempo t).

Nessa equação, Δm_{aj} e Δm^* são funções da velocidade da variação de massa e do tempo. Entretanto, o valor de Δm_{aj} aumenta e o valor de Δm^* diminui durante o processo de resfriamento (associada com a variação de água da amostra). Isto sugere que há uma relação entre Δm_{aj} e Δm^* , representada pelo parâmetro K , ao qual se torna função do tempo e da velocidade da variação de massa:

$$\Delta m^* = \frac{\Delta m_{aj}}{K} = \frac{\Delta m_{aj}}{S.t} \quad (3.14)$$

Substituindo a Equação (3.14) na Equação (3.13) e rearranjando os termos, obtêm-se a Equação (3.15):

$$\Delta m_{aj} = \frac{S.t.(\Delta m_{\infty})}{1 + S.t} \quad (3.15)$$

Esta equação representa a variação de massa ajustada (Δm_{aj}) com o tempo (t) utilizando dois parâmetros, Δm_{∞} e S , assumidos constantes. Esses parâmetros podem ser estimados pela regressão linear aos dados experimentais obtidos durante um curto período de tempo durante o processo. A forma linearizada da Equação (3.15) é apresentada na Equação (3.16):

$$\frac{t}{\Delta m_{aj}} = \frac{1}{S.(\Delta m_{\infty})} + \frac{t}{\Delta m_{\infty}} \quad (3.16)$$

3.3.4 Modelo matemático para o resfriamento de carcaças de frango

A temperatura transiente de uma carcaça de frango submetida a diferentes processos e condições de resfriamento não é uma questão de fácil predição, sobretudo devido à complexidade geométrica das carcaças e a existência de regiões com diferentes composições (pele, musculatura peitoral, ossos, gordura). Além disso, as carcaças tem seu conteúdo de água continuamente modificado durante o processo de resfriamento (JAMES et al. 2006; CARCIOFI e LAURINDO, 2007; CARCIOFI e LAURINDO 2010). Um apropriado modelo matemático para prever o tempo de resfriamento de carcaças de frango deve levar em consideração a transferência de calor na interface água-carcaça ou ar-carcaça de frango (UR e velocidade do ar e a temperatura da água), e as propriedades termofísicas médias das carcaças e suas massas. Um modelo proposto por Carciofi e Laurindo (2010) é apresentado na Equação (3.17). Esta equação é útil para correlacionar a evolução das temperaturas das carcaças de frango em função das temperaturas iniciais (T_{Fi}), tempo de processo (t), temperatura média do ar ou da água (T_{∞}) e o coeficiente h entre o fluido de resfriamento e as amostras. Nesta equação, m_{Fi} é a massa inicial da carcaça, B é uma espécie de coeficiente de transferência de calor geral, que é dependente do valor médio do coeficiente h e da área superficial da carcaça (A , que é de difícil medição), as quais são variáveis desconhecidas. A relação $B C_{pF}^{-1} m_{Fi}^{-1}$ tem unidade s^{-1} :

$$T = (T_{Fi} - T_{\infty}) \exp \left[- \left(\frac{B}{C_{pF} \cdot m_{Fi}} \right) t \right] + T_{\infty} \quad (3.17)$$

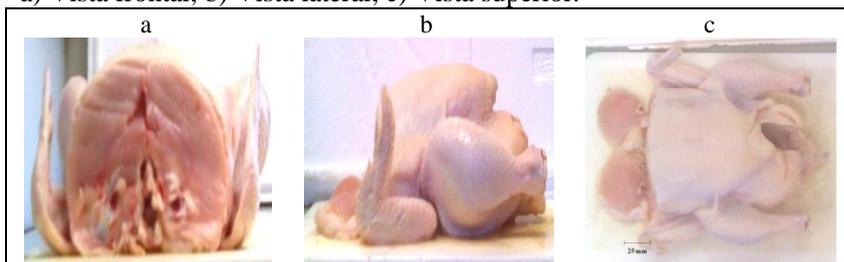
na qual C_{pF} é o valor do calor específico médio da carcaça de frango ($C_{pF} = 3,31 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, segundo Toledo (1991) e Dossat (2004)).

A estimativa média do parâmetro B foi realizada a partir de uma regressão linear aos dados experimentais da evolução temporal da temperatura das carcaças durante cinco repetições de resfriamento para cada condição experimental (diferentes valores de UR e velocidade do ar). A estimativa do parâmetro B leva a uma equação operacional que pode ser aplicada para representar as taxas de resfriamento de geometrias complexas, como as carcaças de frango, durante diferentes condições operacionais de resfriamento.

3.3.5 Termografia das carcaças de frango

A coleta das imagens termográficas foi realizada com uma câmera de infravermelho (Flir T360, Flir System, Suécia). Foram registradas imagens da superfície das carcaças, suspensas no interior da câmara fria, durante a execução do resfriamento AF e CO (com uma rápida abertura do equipamento) e da parte interna das carcaças (cortes da região peitoral). Nesse último caso, as carcaças foram removidas da câmara fria e cortadas na altura da musculatura peitoral, conforme Figura 3.5. Foram feitos cortes transversais na região peitoral das carcaças em uma espessura de 25 mm com o intuito de acompanhar comparativamente através de imagens termográficas de infravermelho as temperaturas das seções internas das carcaças de frango.

Figura 3.5 - Imagens de luz visível do corte feito na carcaças de frango. a) Vista frontal; b) Vista lateral; c) Vista superior.



A distância entre a câmera e a carcaça foi de 0,5 m para as imagens registradas no interior da câmara fria e foram tomadas a 0,2 m para as imagens dos cortes da região peitoral. Foi assumido que a emissividade das carcaças de frango é de 0,98 (adaptado do valor da emissividade da pele humana) (STEKETEE, 1973).

3.4 Análise estatística

A análise estatística foi realizada com auxílio do *software* Estatística (*StatSoft*, versão 8.0, 2007, USA). Os valores experimentais do coeficiente h , da perda de água durante o resfriamento da esfera envolta pelo tecido molhado e da variação da massa e o tempo de resfriamento das carcaças de frango foram avaliados pela Análise de Variância (*one-way ANOVA*). Os resultados médios foram comparados pelo teste de *Tukey* a um nível de significância de 5 %.

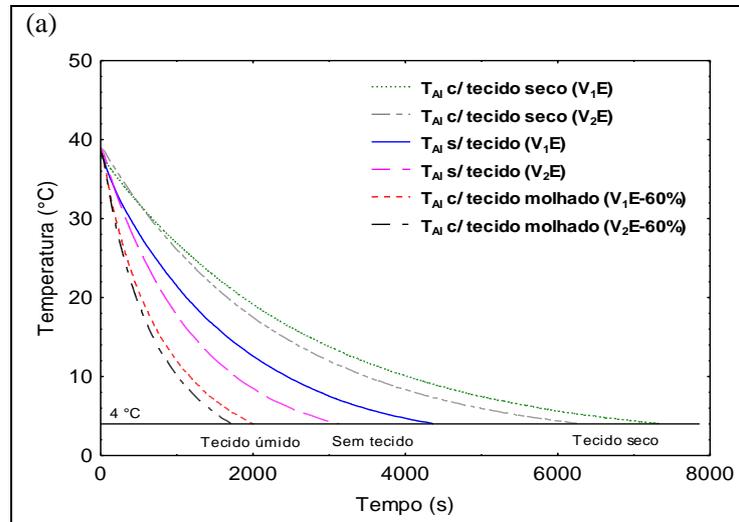
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

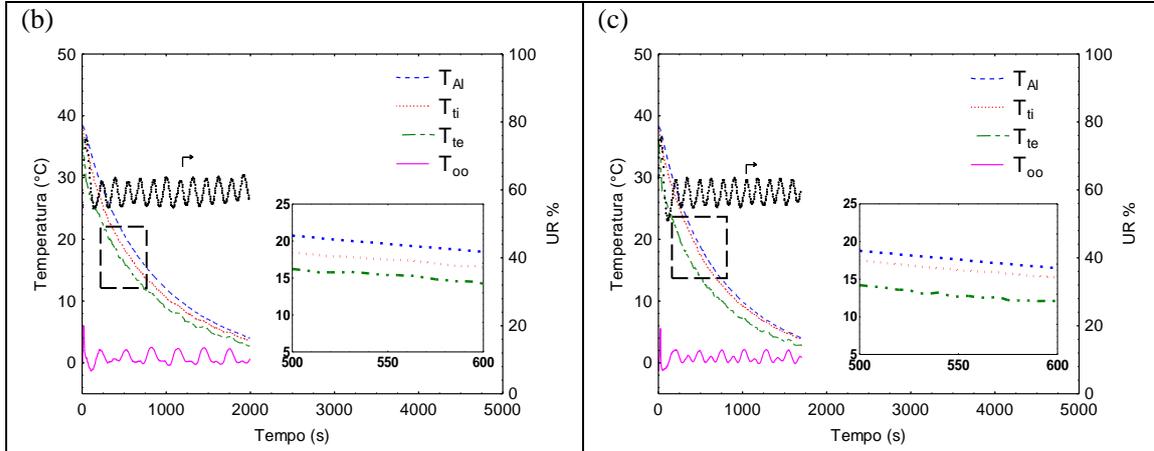
Esta etapa do trabalho está dividida em 2 seções, conforme apresentadas a seguir. A primeira seção diz respeito aos resultados e discussões sobre o estudo do resfriamento de uma esfera de alumínio com e sem a cobertura de um tecido de algodão. A segunda seção trata do estudo do processo de resfriamento de carcaças de frango por diferentes métodos.

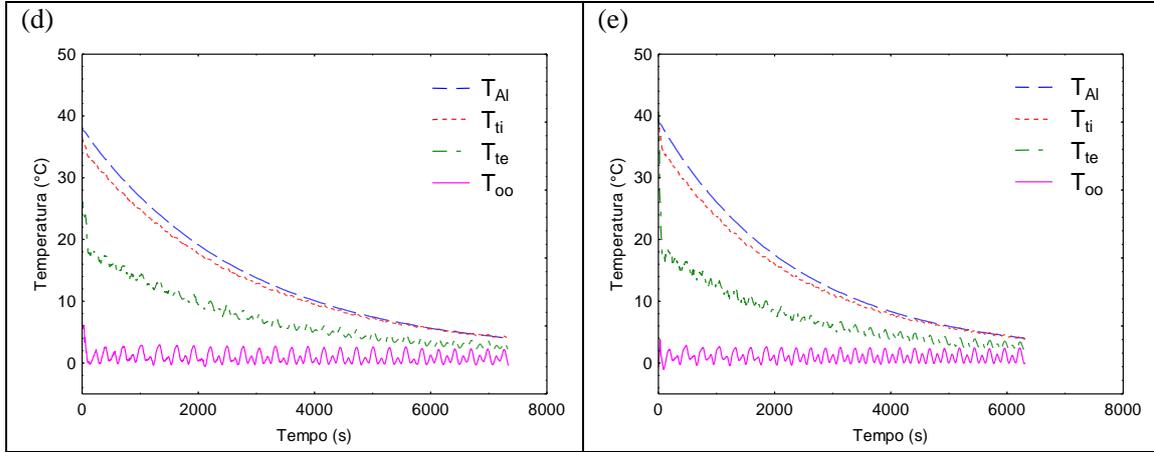
4.1 Coeficiente de transferência de calor entre a esfera de alumínio e o ar forçado

Na Figura 4.1 estão apresentadas as evoluções temporais da temperatura da esfera (T_{Al}) em três arranjos experimentais (Figura 4.1a) e as evoluções temporais da esfera (T_{Al}) coberta pelo tecido molhado (Figura 4.1b-c) e coberta por um tecido seco (Figura 4.1d-e) durante resfriamento por ar forçado nas velocidades V_{1E} ($0,92 \text{ m s}^{-1}$) e V_{2E} ($1,40 \text{ m s}^{-1}$) com UR = 60 %.

Figura 4.1 – (a) Exemplo ilustrativo de seis experimentos da evolução temporal das temperaturas centrais da esfera (T_{Ai}) descoberta, coberta com um tecido seco e coberta pelo tecido molhado (60 % de UR) durante resfriamento por ar forçado em velocidades V_1E e V_2E ; (b) e (c) Evolução temporal da esfera coberta por tecido molhado durante resfriamento em 60 % de UR e em velocidades do ar V_1E e V_2E , respectivamente; (d) e (e) Evolução temporal da esfera coberta por tecido seco durante resfriamento em velocidades do ar V_1E e V_2E , respectivamente.







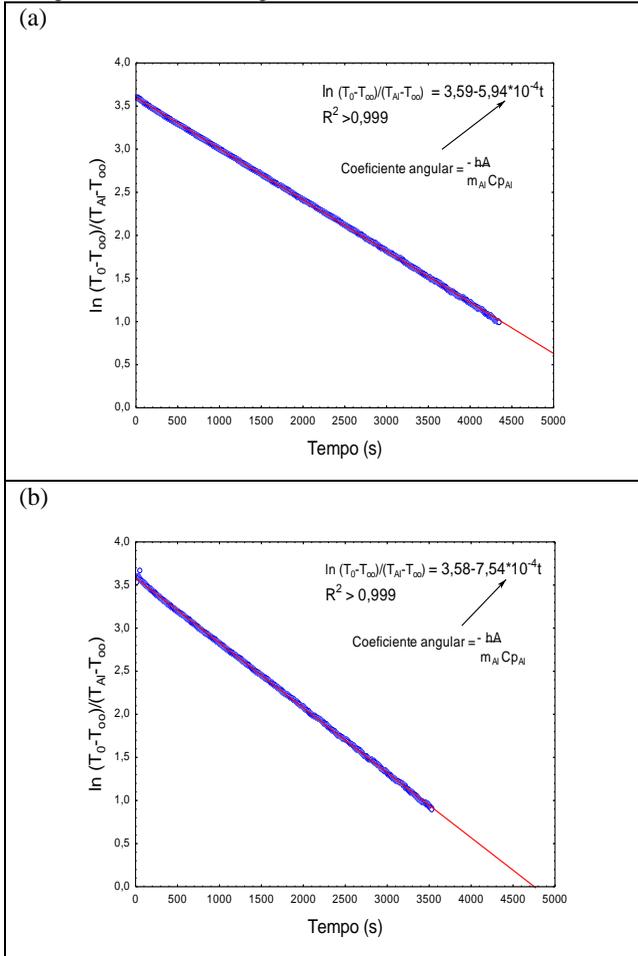
Pode-se observar na Figura 4.1a uma grande redução no tempo de resfriamento de uma esfera coberta com um tecido molhado, quando comparado com o tempo de uma esfera com tecido seco e sem cobertura do tecido molhado, em ambas as velocidades do ar. Esta redução do tempo de processo pode ser explicada como consequência da evaporação da água presente na superfície do tecido molhado. O fenômeno do resfriamento evaporativo aumenta as taxas de transferência de calor, mesmo com o efeito de isolamento térmico do tecido de algodão. Esse mesmo comportamento foi confirmado em todos os ensaios de resfriamento para as três diferentes UR e para as duas velocidades do ar. As evoluções temporais de temperatura da esfera com a cobertura de tecido seco e molhado para os demais processos de resfriamento encontram-se no Apêndice B.

Verifica-se na Figura 4.1d, e Figura 4.1e que o tecido seco atuou como uma espécie de isolante térmico, reduzindo a transferência de calor e aumentando o tempo de resfriamento em ambas as velocidades do ar V_{1E} e V_{2E} , apesar dos valores do coeficiente h apresentarem-se 16,0 % e 5,3 % (para V_{1E} e V_{2E} , respectivamente) maiores do que os valores para a esfera descoberta.

Pode-se observar também na Figura 4.1 pequenas oscilações nas evoluções temporais de UR e da temperatura do ar (T_{∞}) durante o processo de resfriamento no interior da câmara fria. Estas oscilações estão relacionadas com o trabalho do inversor de frequência e da resistência elétrica no controle da UR e da temperatura do ar durante todo o período de monitoramento do processo.

A determinação do coeficiente h realizada pela regressão linear está ilustrada na Figura 4.2 para os experimentos realizados na velocidade do ar V_{1E} e V_{2E} .

Figura 4.2 – Dados experimentais do logaritmo da temperatura da esfera (T_{Al}) pelo tempo utilizado para determinação do coeficiente h entre a esfera descoberta e o ar refrigerado durante um processo de resfriamento na velocidade do ar V_1E (Figura 4.2a) e V_2E (Figura 4.2b).



Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados de h e dos coeficientes de variação (CV, razão entre o desvio padrão e a média) obtidos a partir dos dados experimentais da evolução temporal da temperatura (regressão da seção 3.2.1) e estimados pela correlação de McAdams (Equação (3.11)) para o resfriamento da esfera de alumínio

nas diferentes condições investigadas. Em todas as condições experimentais, os valores do Bi foram inferiores ou iguais a 10^{-2} , indicando que os gradientes de temperatura no interior da esfera metálica não foram significativos e que o método da capacitância global foi escolhido adequadamente.

Os valores experimentais médios de h apresentaram baixos coeficientes de variação ($CV < 10\%$), o que indica a reprodutibilidade do método. O coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear da Equação (3.3) apresentou valores experimentais que variaram entre 0,987 e 1 para todas as regressões.

Em comparação às estimativas experimentais, os valores obtidos pela correlação de McAdams para o coeficiente h foram 23,0 % e 25,2 % (para V_1E e V_2E , respectivamente) menores no resfriamento da esfera sem cobertura, e 33,0 % e 28,1 % (para V_1E e V_2E , respectivamente) menores no resfriamento da esfera coberta com tecido de algodão seco. Estas diferenças estão de acordo com os relatos de Holman (1992) e Incropera e Dewitt (2002) ao qual consideram normais erros de até 30 % fornecidos pelas correlações empíricas. Além disso, o tecido de algodão aumentou a rugosidade da superfície, aumentando a turbulência na camada limite hidrodinâmica e, conseqüentemente, afastando o valor observado de h do valor estimado pela equação empírica. Observa-se também que os valores experimentais apresentaram-se dentro da faixa de valores típicos para o h para convecção forçada de gases mostrada por Incropera e Dewitt (2002), ao qual destacam uma faixa entre 25 – 250 $W m^{-2} K^{-1}$ para a convecção forçada.

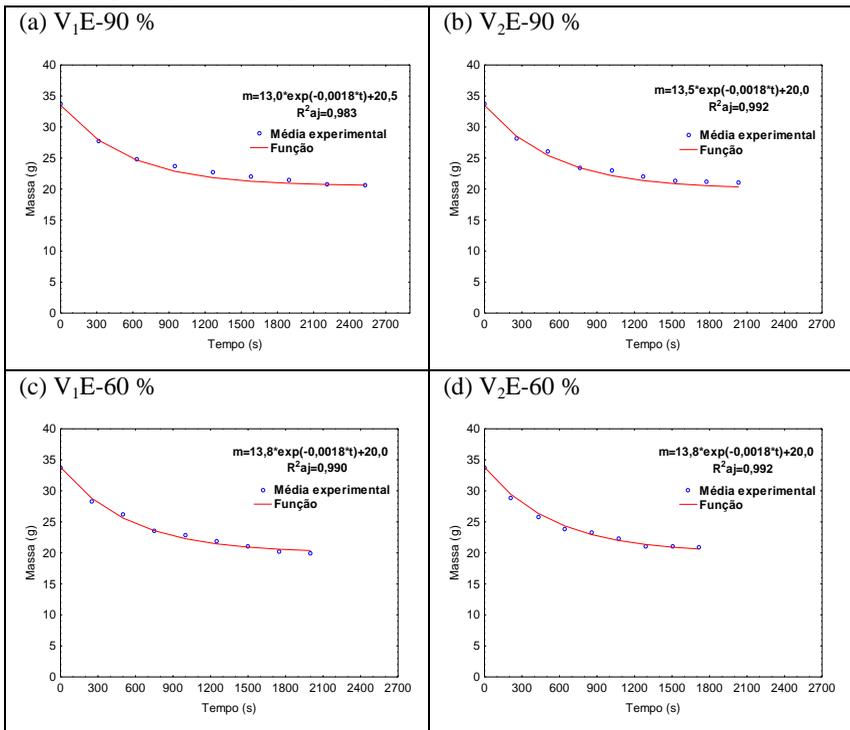
O fenômeno evaporativo aumentou o valor do coeficiente h_{ef} em aproximadamente três vezes, em todos os casos experimentais utilizando a esfera recoberta pelo tecido molhado, quando comparado com a esfera recoberta pelo tecido seco na mesma velocidade do ar. Os resultados do coeficiente h_{ef} também mostram que o aumento da velocidade do ar promoveu um aumento significativo do coeficiente ($p < 0,05$), como esperado, entretanto o valor da UR não afetou significativamente o valor de h ($p > 0,05$) em ambas as velocidades do ar.

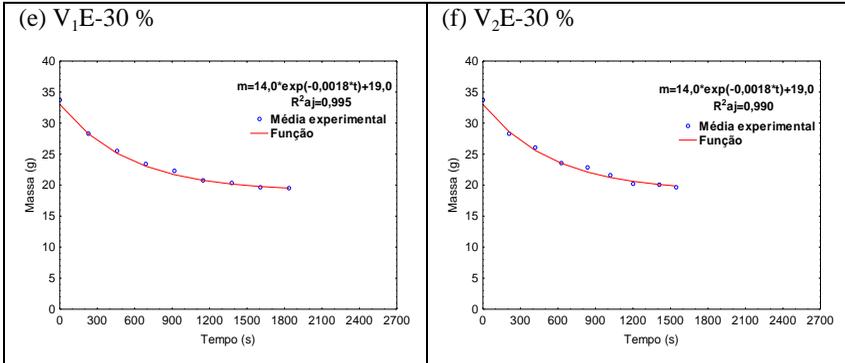
Tabela 4.1 - Valores médios de h determinados para as diferentes condições de resfriamento por ar forçado da esfera sem e com tecido. Os valores em parênteses são relativos ao coeficiente de variação (CV). $h \pm$ desvio padrão (dp).

Velocidade do ar (m s ⁻¹)	% UR	Sem tecido		Com tecido		
		Correlação McAdams	Balanço energia	Correlação McAdams		Balanço energia
				Tecido seco	Tecido seco	Tecido molhado
		H (W m ⁻² K ⁻¹)	$h \pm dp$ (W m ⁻² K ⁻¹) (CV %)	h (W m ⁻² K ⁻¹)	$h \pm dp$ (W m ⁻² K ⁻¹) (CV %)	$h_{ef} \pm dp$ (W m ⁻² K ⁻¹) (CV %)
Ar V ₁ E	30					76,4±5,3 ^{a,C} (6,9)
	60	18,7	24,3±2,1 ^{a,A} (8,8)	18,9	28,2±1,1 ^{a,B} (4,0)	72,5±3,5 ^{a,C} (4,8)
	90					68,0±4,1 ^{a,C} (6,1)
Ar V ₂ E	30					97,8±8,2 ^{b,B} (8,3)
	60	24,0	32,1±1,8 ^{b,A} (5,6)	24,3	33,8±2,5 ^{b,A} (7,3)	93,1±10,8 ^{b,B} (11,7)
	90					91,3±5,5 ^{b,B} (6,0)

Na Figura 4.3 é apresentada a evolução temporal da perda de água do tecido molhado (experimental e simulada) durante resfriamento por ar forçado em condições de UR (90 %, 60 % e 30 %) e duas diferentes velocidades do ar. Conforme descrito no item 3.2.2, a massa inicial média de água no tecido molhado antes do resfriamento apresentou o valor de 0,0338 kg (valor inicial para todos os ensaios de resfriamento) e ao final dos diferentes processos de resfriamento as massas médias experimentais de água foram de 0,0195 kg, 0,0199 kg e 0,0206 kg na velocidade V_1E e de 0,0197 kg, 0,0209 kg e 0,0210 kg na velocidade V_2E nas UR de 30 %, 60 % e 90 %, respectivamente. Observa-se que o modelo empírico matemático (Equação (3.9)) foi adequado para representar a evolução temporal de perda de água no tecido de algodão molhado durante os processos experimentais de resfriamento em diferentes condições de UR e velocidade do ar.

Figura 4.3 – Evolução temporal da perda de água experimental e simulada do tecido molhado durante resfriamento.





Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados experimentais relacionando a influência das condições do ar de resfriamento (velocidade e UR) na perda de água relativa (% , determinada pela redução da massa do tecido molhado) e o tempo de resfriamento (tempo para T_{AI} alcançar $4\text{ }^\circ\text{C}$). Como esperado, o aumento da UR do ar diminuiu a perda de água durante o resfriamento. Porém, a maior diferença entre os percentuais de perdas de água não foi maior do que 6 % (37,6 % para $V_2E-90\%$ e 42,1 % para $V_1E-30\%$). Como observado anteriormente na Figura 4.3, o maior tempo de resfriamento ocorreu para a condição experimental $V_1E-90\%$ (a pior condição, devido à maior UR e menor velocidade do ar), demandando um tempo 65 % maior para o centro da esfera alcançar $4\text{ }^\circ\text{C}$ do que o processo $V_2E-30\%$ (a melhor condição, devido à menor UR e maior velocidade do ar).

Tabela 4.2 – Percentual de perda de água no tecido molhado devido ao processo de resfriamento evaporativo, e o tempo de resfriamento necessário para o centro da esfera atingir 4 °C. Os valores em parênteses são relativos ao coeficiente de variação (CV). Valores médios \pm desvio padrão.

Velocidade do ar (m s ⁻¹)	UR (%)	Percentual de	Tempo total para
		perda de água no tecido (%) CV (%)	atingir 4 °C (s)
Ar V ₁ E (0,92)	30	42,1 \pm 1,1 ^a (2,7)	1841,7 \pm 38,8 ^c (2,1)
	60	41,1 \pm 1,3 ^{a,b} (3,1)	2015,0 \pm 13,2 ^b (0,6)
	90	38,9 \pm 1,4 ^{b,c} (3,5)	2541,7 \pm 127,9 ^a (5,0)
Ar V ₂ E (1,42)	30	41,6 \pm 0,6 ^a (1,5)	1546,3 \pm 25,6 ^e (1,6)
	60	37,9 \pm 1,9 ^c (5,2)	1715,0 \pm 9,4 ^d (0,5)
	90	37,6 \pm 0,8 ^c (2,2)	2033,0 \pm 79,7 ^b (3,9)

^{a-e}Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ($p < 0,05$).

Na comparação com os resultados experimentais encontrados na mesma velocidade do ar, o aumento da UR de 30 % para 90 % aumentou o tempo de resfriamento em 38 % e 31 % para V₁E e V₂E, respectivamente. A variação do tempo é significativa, resultante da contribuição do fenômeno evaporativo no aumento da transferência de calor neste tipo de processo de resfriamento. Os valores de CV relativos à perda de água e o tempo total de resfriamento podem ser considerados

pequenos ($< 10\%$), indicando grande reprodutibilidade dos resultados encontrados.

Os resultados obtidos nesta etapa do estudo mostram que para as mesmas condições de resfriamento, o coeficiente convectivo de transferência de calor entre uma esfera modelo e o ar frio forçado pode ter seu valor aumentado em aproximadamente três vezes cobrindo-se a esfera com um tecido molhado, na comparação com a esfera coberta por um tecido seco. Conseqüentemente, o tempo de resfriamento da esfera coberta pelo tecido molhado foi menor do que os tempos observados para a esfera coberta por um tecido seco na mesma velocidade do ar. Este resultado pode ser explicado pelo aumento da transferência de calor promovido pelo resfriamento evaporativo que ocorre na superfície umedecida.

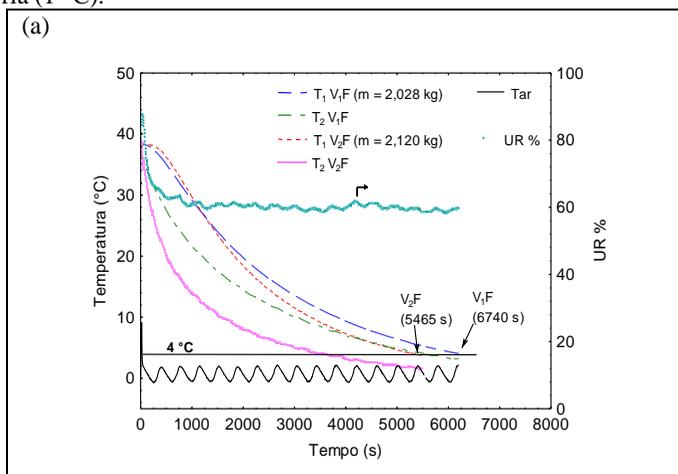
4.2 Resfriamento das carcaças de frango

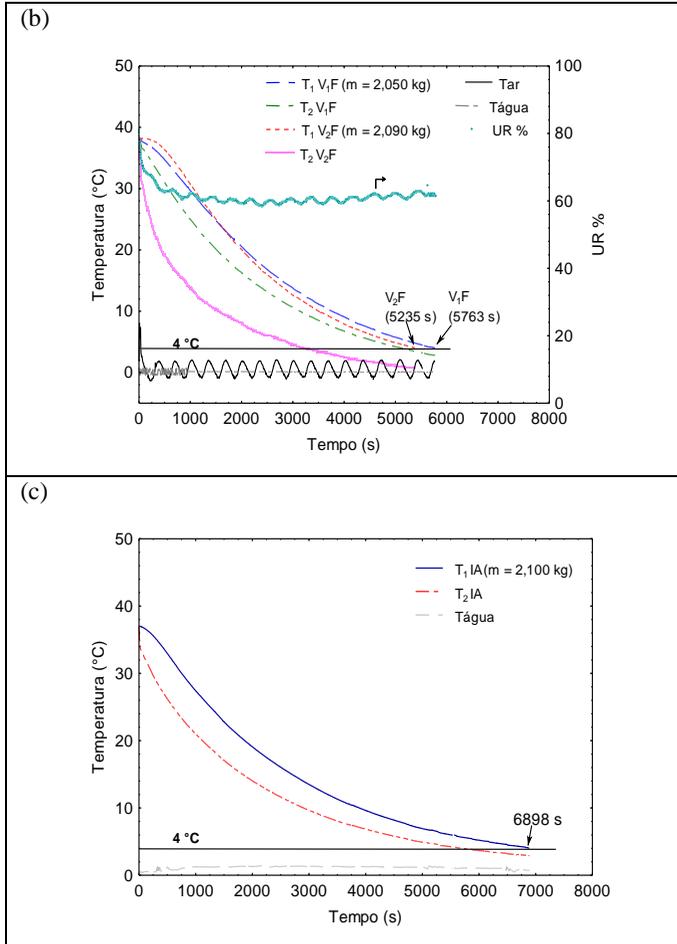
Os resultados obtidos a partir da evolução temporal da temperatura do músculo peitoral, a variação da massa durante o resfriamento, a modelagem matemática do tempo de resfriamento e as análises termográficas de carcaças de frango submetidas aos processos de resfriamento por ar forçado (AF), imersão em água (IA) e pelo método combinado de ar forçado mais imersões em água (CO) são apresentados a seguir.

4.2.1 Evolução temporal da temperatura do músculo peitoral

Os dados da evolução temporal da temperatura do músculo peitoral das carcaças de frango submetidas aos processos de resfriamento AF, CO e IA estão apresentados na Figura 4.4. Estes dados são referentes à evolução temporal dos sensores de temperatura inseridos nas profundidades de 20 mm (T_1) e 10 mm (T_2) da musculatura peitoral das carcaças.

Figura 4.4 - Evolução temporal comparativa das temperaturas T_1 (20 mm de profundidade) e T_2 (10 mm de profundidade) inseridas no músculo peitoral das carcaças de frango durante processo de resfriamento: (a) Ar forçado (1 °C e UR=60 %); (b) Combinando ar forçado (1 °C e UR=60 %) e (c) imersão em água fria (1 °C).





Conforme esperado, observa-se na Figura 4.4a e Figura 4.4b uma redução do tempo de resfriamento em aproximadamente 18 % e 9 %, respectivamente, com o aumento da velocidade do ar. Na Figura 4.4c verifica-se que o tempo de resfriamento do processo IA foi de 9 % a 17 % maior em comparação com o processo AF e de 17 % a 23 % maior em comparação com o processo CO. Este fato está relacionado à falta de agitação e de uma maior renovação da água na cavidade interna da carcaça dentro da cuba de resfriamento.

Nestas figuras verifica-se também a eficiência do controle da UR (60 %) no interior da câmara fria, assim como o controle da temperatura

do ar e da água, e a indicação do limite crítico para a temperatura do músculo peitoral ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante a realização dos processos de resfriamento. O limite crítico é o valor que o músculo peitoral deve atingir para o processo de resfriamento das carcaças atenderem a todas as exigências legais e comerciais.

As reduções temporais de temperaturas do ponto T_2 foram mais acentuadas nos instantes iniciais do resfriamento quando do uso da maior velocidade do ar V_2F na comparação com a velocidade V_1F e também pelo processo IA. A diferença na taxa de redução das temperaturas da musculatura peitoral das carcaças mostra a forma característica de mecanismo difusivo. O aumento da velocidade da redução das temperaturas do ponto T_2 é explicado pela redução da resistência difusiva em pontos próximos à superfície da carcaça, promovida pela movimentação do meio de resfriamento, o que também evidencia um mecanismo de transferência de calor convectivo. Este fato foi observado em todas as evoluções temporais de temperatura de resfriamento. Segundo CARCIOFI (2005), em estudo de resfriamento de carcaças de frango imersas em água, a curva experimental da evolução da temperatura do centro do peito de carcaças de frangos com o tempo, embora apresente uma forma característica de processos difusivos, também depende do mecanismo convectivo, promovido pela movimentação do meio de resfriamento.

Os dados experimentais para os processos de resfriamento utilizando UR de 30 % e 90 % nas duas velocidades do ar estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.3 - Tempo de resfriamento até 4,0 °C e respectivos coeficientes de variação (CV) para os processos AF, CO e IA. Valores médios \pm desvio padrão.

Velocidade do ar (m s ⁻¹)	% UR	Tempo de resfriamento (s)		
		AF	CO	IA
V ₁ F	30	6493 \pm 10 ^a (0,2)	5637 \pm 175 ^a (3,1)	
	60	6740 \pm 321 ^{a,b} (4,7)	5763 \pm 67 ^a (1,2)	
	90	6885 \pm 236 ^b (0,2)	6345 \pm 65 ^c (1,0)	
V ₂ F	30	5216 \pm 340 ^c (4,9)	5137 \pm 292 ^b (5,7)	6898,7 \pm 234 (3,4)
	60	5465 \pm 272 ^c (6,0)	5235 \pm 216 ^b (4,1)	
	90	5962 \pm 75 ^d (3,7)	5803 \pm 112 ^a (1,9)	

V₁F = 4,07 m s⁻¹; V₂F = 5,66 m s⁻¹.

^{a-d}Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa (p<0,05).

Na Tabela 4.3 estão apresentados com maiores detalhes os tempos de resfriamento para as carcaças de frango atingirem 4 °C, para todos os processos investigados neste trabalho. Os resultados dos processos AF e CO mostram uma tendência de redução do tempo de resfriamento, de acordo com o aumento da velocidade do ar e redução da UR no interior da câmara fria. O processo CO foi mais rápido do que o processo AF em todos os experimentos de resfriamento. Isto pode ser explicado pelas sucessivas e rápidas imersões em água realizadas durante o processo CO, ao qual aumenta o resfriamento evaporativo, inerentes aos processos evaporativos aplicados em muitos alimentos (as superfícies das carcaças nunca são completamente secas e perdem água pelo ar frio). Jeong et al. (2011a) também encontrou maiores tempos de resfriamento, para as carcaças atingirem 4 °C, para um processo AF na comparação com um processo evaporativo (sucessivas aspersões de

água sobre as carcaças). O tempo de resfriamento foi aumentado em 29 % quando da mudança de um processo por aspersão de água para um processo AF (conforme verifica-se na Tabela 4.4).

Não foram encontradas diferenças significativas nos tempos totais de processo, na comparação entre os experimentos de resfriamento realizados nas UR de 30 e 60 % em ambas as velocidades do ar nos processos AF e CO. Portanto, o uso de uma UR muito baixa (30 %) não foi eficaz na redução do tempo de resfriamento das amostras.

Os tempos de resfriamento variaram entre 6900 s (IA) e 5100 s (CO em V₂F e 30 % UR). O processo IA apresentou o maior tempo de resfriamento quando comparado com os outros processos. Apesar da temperatura da água de resfriamento não ultrapassar 2 °C, a falta de agitação da água dentro da cuba de resfriamento aumentou a resistência à transferência de calor convectiva e dificultou uma maior renovação de água na cavidade interna da carcaça, influenciando no resultado obtido. A importância da agitação da água durante um resfriamento em imersão foi apontado por Carciofi e Laurindo (2010), que relatam que a agitação da água reduz o tempo de resfriamento, enquanto aumenta o ganho de massa das carcaças. Adicionalmente, neste mesmo estudo, os autores observaram que após 60 minutos de processo por IA sem agitação, a temperatura do músculo peitoral das carcaças de frango (variando entre 1,605 e 2,094 kg) ficou entre 7 e 8 °C, enquanto que, no presente trabalho, após o mesmo tempo de processo IA, o valor da temperatura da mesma região das carcaças ficou próxima a 11 °C (Figura 4.4c). Essa diferença pode estar relacionada com as distintas temperaturas das amostras no início do resfriamento, aos diferentes fatores de processo (por exemplo, posicionamento do sensor de temperatura inserido na carcaça e a temperatura da água) e as diferentes dimensões e massas das amostras.

Em uma escala industrial, nos *chillers* de resfriamento, a água está sob agitação e as carcaças em movimento contínuo. Assim, o tempo de resfriamento, para o músculo peitoral das carcaças atingirem 4 °C, é menor do que o observado neste trabalho, conforme verifica-se na Tabela 4.4, onde estão apresentados os resultados da variação da massa, tempo de resfriamento e variação da temperatura do presente estudo e de estudos que apresentam comparações entre dois ou três métodos de resfriamento de carcaças de frango. Os resultados de Huezo et al. (2007b), Jeong et al. (2011a) e Perumalla et al. (2011) mostram que no processo de imersão os tempos médios para redução da temperatura da musculatura peitoral de carcaças de frango para 4,0 °C ou 4,4 °C foram de 2100 s, 3300 s, e 5400 s, respectivamente.

Observa-se na Tabela 4.4 que os resultados dos tempos de resfriamento das carcaças de frango observados no presente estudo, em todas as condições experimentais, ficaram próximos dos valores encontrados na literatura para os processos AF ou CO. Cabe salientar que as diferenças nas ordens de grandeza, entre os resultados observados neste trabalho e os encontrados na literatura, podem estar relacionadas com fatores como a heterogeneidade do tamanho e das massas iniciais das carcaças, as espessuras das camadas de gordura subcutâneas, as temperaturas iniciais, o posicionamento do sensor de temperatura na região da musculatura peitoral das carcaças, velocidade do ar, condições de pendura e a temperatura e a UR do ar na sala de resfriamento.

Tabela 4.4 – Variação da massa, tempo de resfriamento e a variação da temperatura de estudos comparativos de processos de resfriamento de carcaças de frango.

Método de resfriamento	Detalhes	m_i (kg)	Δm (g a cada 100 g iniciais da carcaça)	Tempo de resfriamento (s)	T_i (°C)	T_f (°C)	Referência
AF	Ar a 1,0 °C em 4,07 e 5,66 m s ⁻¹ e UR controlada de 90 %, 60 % e 30 %.	1,8 – 2,5	Entre - 2,8 e - 3,8	Entre 5100 e 6900	38,0– 39,0	4,0	[1]
	Ar a 3,6 m s ⁻¹ , 0 °C e UR de 72 %.	-	- 1,1	7200	-	-	[2]
	Ar a 1,0 m s ⁻¹ , 1,7 °C e 88 % UR.	1,824	-1,5	9300	39,9	4,0	[3]
	Ar a 0,5 m s ⁻¹ e UR média de 97,6 %	0,9 – 1,0	- 1,4 e - 2,8	3000	33,2	5,4	[4]
	Ar de 3,5 m s ⁻¹ e -1,1 °C	-	- 2,5	5400	32,8.	4,4	[5]
IA	Água a 1,0 ° sem agitação.	1,8 – 2,5	+ 1,5	6900	38,0– 39,0	4,0	[1]
	Água a 0,5 – 1,1 °C, com agitação.	-	+ 6,5	4800	-	-	[2]
	1º estágio 12 °C e 2º estágio 1 a 2 °C, com agitação da água.	2,0 – 2,1	+ 3,9	5400	-	4,0	[6]
	Lama de gelo a 0,2 °C, com 30 s de agitação a cada 5 min.	1,824	+ 4,6	3300	39,9	4,0	[3]
	Mistura água-gelo a 0,6 °C	-	+ 9,3	2100	32,8	4,4	[5]

Continuação Tabela 4.4.

Método de resfriamento	Detalhes	m_i (kg)	Δm (g a cada 100 g iniciais da carcaça)	Tempo de resfriamento (s)	T_i (°C)	T_f (°C)	Referência
Aspersão com água	Ar a $1,0 \text{ m s}^{-1}$, $1,7 \text{ °C}$ e 88 % UR, com aspersão a cada 5 min.	-	+ 1,0	7200	39,9	4,0	[3]
	Ar: em 3 °C e 92 – 95 % de UR, com 6 aspersões cada 45 min.	2,0 – 2,1	- 2,0	9000	-	4,0	[6]
	Ar a $0,5 \text{ m s}^{-1}$ e UR média de 97,6 %, com 4 aspersões.	0,9 – 1,0	+ 0,2	4800	34,9	5,0	[4]
CO	Ar a $1,0 \text{ °C}$ em $4,07$ e $5,66 \text{ m s}^{-1}$ e UR controlada de 90 %, 60 % e 30 %, e imersões de 5 s cada 15 min.	1,8 – 2,5	Entre - 1,1 e - 2,1	Entre 5100 e 6400	38,0– 39,0	4,0	[1]
	4 imersões em tanques de água entre $0,5$ e $1,1 \text{ °C}$. Depois ar a $3,6 \text{ m s}^{-1}$, 0 °C e UR de 72 %	-	+ 1,9	5400	-	-	[2]

[1] Presente trabalho; [2] Demirok et al. (2013); [3] Jeong et al. (2011a); [4] Mielnik et al. (1999); [5] Huezo et al. (2007b); e [6] Perumalla et al. (2011).

4.2.2 Variação da massa das carcaças de frango durante o resfriamento

Na Tabela 4.5 estão apresentados os resultados experimentais da variação média de massa e os valores dos coeficientes de variação (CV) encontrados para os processos de resfriamento de carcaças de frango. Verifica-se nessa tabela, como esperado, um aumento na perda de massa das carcaças com a redução da UR nos processos AF e CO, nas duas velocidades do ar. A condição experimental de maior velocidade e UR do ar ($V_2F-90\%$) reduziu em 26 % e 7 % a perda de massa das carcaças, na comparação com a condição de menor velocidade e UR do ar ($V_1F-30\%$) nos processos AF e CO, respectivamente.

Em uma mesma UR, o aumento da velocidade do ar foi significativo ($p < 0,05$) apenas para as variações de massa das carcaças resfriadas pelo processo CO nas UR de 60 % e 30 %.

Tabela 4.5 - Variação da massa e respectivos coeficientes de variação (CV) para os processos AF, CO e IA. Valores médios \pm desvio padrão.

Velocidade do ar ($m\ s^{-1}$)	% UR	Variação da massa (g a cada 100 g iniciais) (CV %)		
		AF	CO	IA
V_1F	30	- 3,8 \pm 0,2 ^a (6,0)	- 1,5 \pm 0,1 ^a (6,3)	
	60	-3,4 \pm 0,2 ^{a,b,c} (5,2)	- 1,2 \pm 0,1 ^c (4,0)	
	90	- 3,0 \pm 0,1 ^{b,d} (3,8)	- 1,1 \pm 0,1 ^c (6,4)	
V_2F	30	- 3,5 \pm 0,2 ^{a,c} (5,3)	- 2,1 \pm 0,2 ^b (7,7)	+ 1,5 \pm 0,2 (11,3)
	60	- 3,4 \pm 0,2 ^{b,c} (5,1)	- 1,8 \pm 0,2 ^d (11,4)	
	90	- 2,8 \pm 0,4 ^d (13,5)	- 1,4 \pm 0,2 ^{a,c} (12,1)	

$V_1F = 4,07\ m\ s^{-1}$; $V_2F = 5,66\ m\ s^{-1}$.

^{a-d}Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ($p < 0,05$).

O método CO apresentou uma redução de aproximadamente 50 % no valor da variação da massa na comparação com o método AF. Os coeficientes de variação (CV) relativos às variações de massa médias encontradas para os experimentos foram baixos ($CV < 10\%$), com exceção de quatro casos, indicando que os processos de resfriamento foram reprodutíveis.

Para o processo IA, o baixo ganho de massa obtido pelas carcaças de frango, conforme mencionado anteriormente, pode ser explicado pela ausência de agitação da água na cuba de resfriamento. O valor médio do ganho de massa de 1,5 g a cada 100 g iniciais de carcaça encontrado neste trabalho foi muito próximo ao ganho de massa de 1,6 g por 100 g iniciais da carcaça apresentado por Carciofi e Laurindo (2007) (processo IA sem agitação da água por 60 min). Neste mesmo trabalho os autores mostram que qualquer procedimento de agitação aumenta a quantidade de água absorvida pelas carcaças e que mais de 50 % da água absorvida ocorre durante os primeiros 10 minutos após a imersão das carcaças, para todas as condições experimentais investigadas. Após este período, os resultados indicam uma redução nas taxas de absorção de água. No Brasil, a absorção de água nas carcaças é controlada nas indústrias pelo Ministério da Agricultura. Este controle é realizado diretamente nas unidades industriais, nos tanques de IA (*chillers*), onde a lei brasileira permite que o máximo de absorção de água das carcaças seja de 8 g a cada 100 g iniciais de carcaça (BRASIL, 1998).

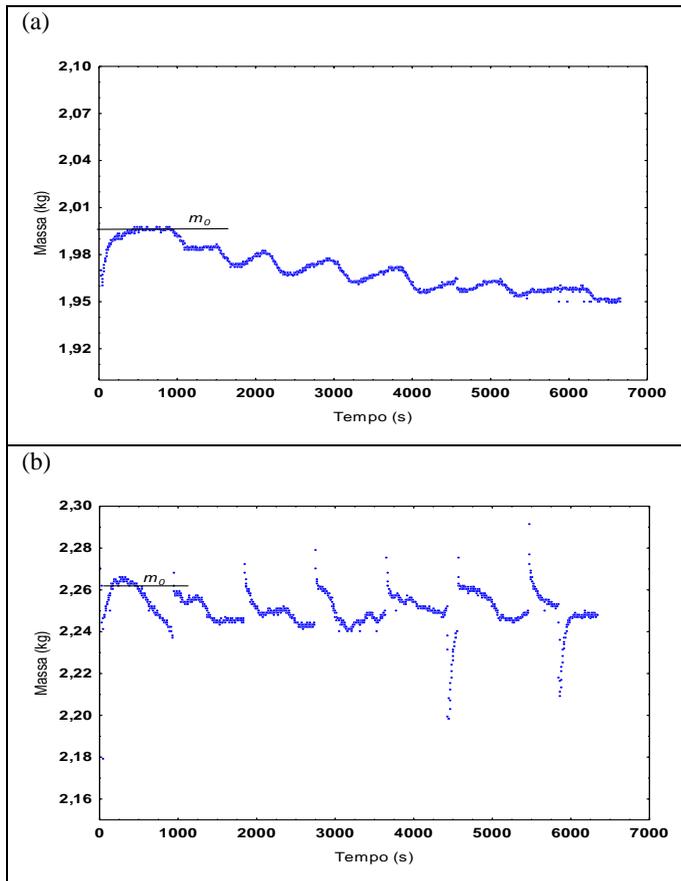
Os resultados das variações da massa das carcaças de frango observados no presente estudo para os processos AF e CO ficaram próximos dos valores encontrados na literatura, conforme se verifica na Tabela 4.4. Cabe destacar que, embora tenham sido encontrados estudos comparando o resfriamento de carcaças pelos processos IA, AF e até mesmo um combinado (CO), nenhum estudo prévio encontrou utilizou, como no presente trabalho, um dispositivo experimental de resfriamento com o controle da UR do ambiente refrigerado e o registro da evolução temporal da massa das amostras durante todo o processo.

Na Figura 4.5 estão apresentadas, como exemplos ilustrativos, as evoluções temporais da massa das carcaças de frango (registradas com a célula de carga instalada no interior da câmara fria) submetidas aos processos AF e CO, ambas na condição experimental de V_1F e $UR = 90\%$.

Verifica-se nessa figura uma pequena oscilação durante a queda gradual da massa da carcaça ao longo dos processos AF e CO. Essa oscilação da massa foi provocada pela pressão do ar sobre as carcaças, originado do ventilador e do sistema evaporador da câmara fria. Na

Figura 4.5b também visualiza-se claramente as sucessivas e rápidas imersões em água das carcaças ao longo de todo o processo CO. A leitura aproximada da massa inicial (m_0) das amostras está indicada na Figura 4.5a e Figura 4.5b.

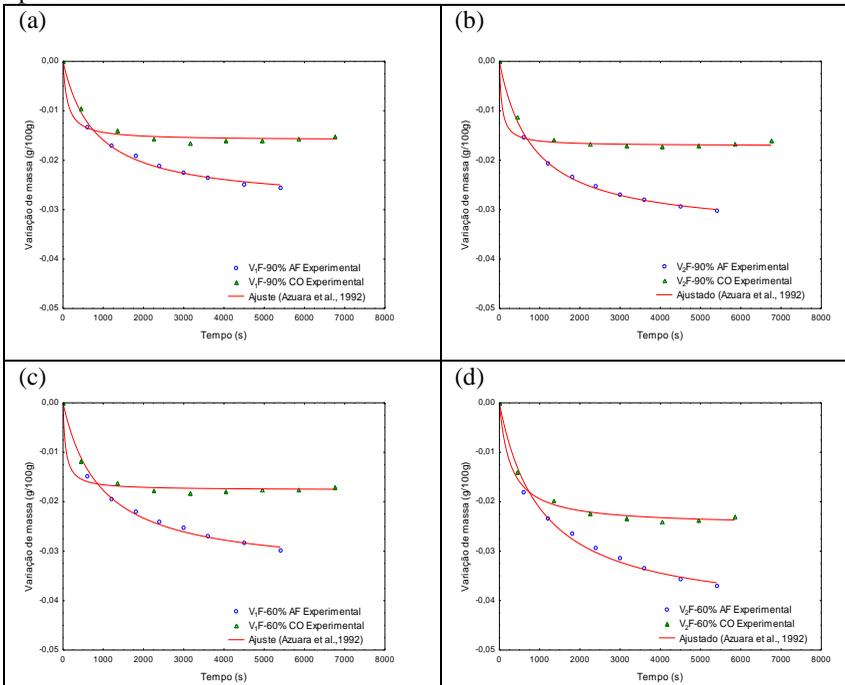
Figura 4.5 – Exemplos ilustrativos da evolução temporal da massa de carcaças de frango submetidas aos processos de resfriamento (UR = 90 % e velocidade de escoamento V_1F): (a) Resfriamento por ar forçado; (b) Resfriamento combinado.

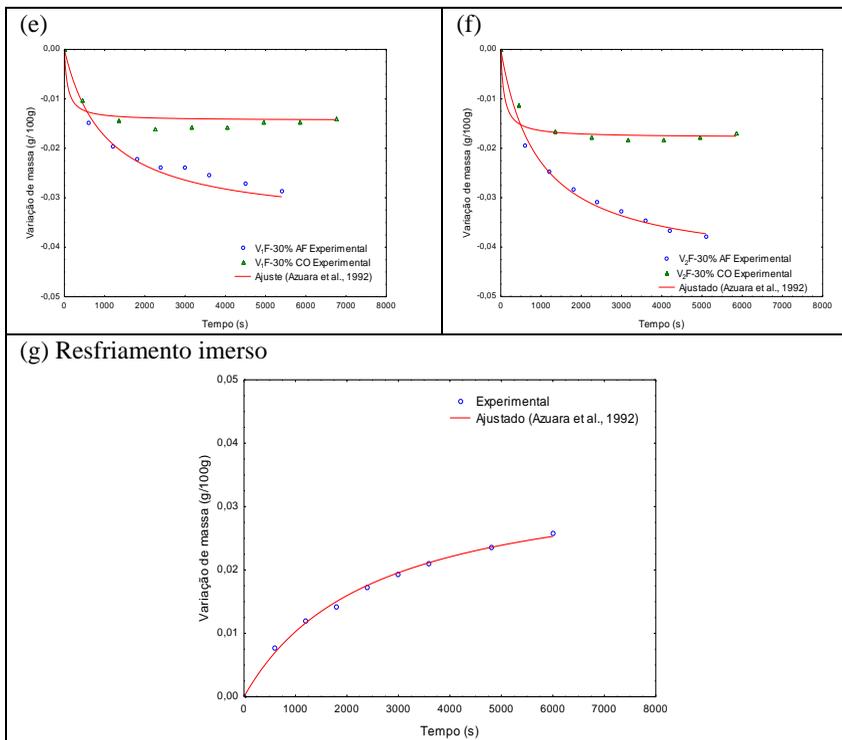


Na Figura 4.6 são apresentados os valores experimentais e o ajuste da variação da massa de carcaças de frango resfriadas, proposta por Azuara et al. (1992), pelos processos AF, CO e IA. As sucessivas

imersões em água das carcaças em água fria (processo CO) reduziram a perda de massa das carcaças, quando comparado com a perda pelo processo AF.

Figura 4.6 - Valores experimentais da evolução temporal da variação da massa de carcaças de frango e o ajuste a equação de Azuara et al. para os diferentes processos de resfriamento.





Quando se utiliza somente o processo AF, a massa das carcaças apresenta uma perda de massa aproximada entre 2,5 g a cada 100 g iniciais de carcaça ($V_1F-90\%$) e 3,6 g a cada 100 g iniciais de carcaça ($V_2F-30\%$) após 3600 s de resfriamento. Após este tempo, as carcaças apresentam um pequeno aumento da perda de massa até o final do processo de resfriamento (até a musculatura peitoral das carcaças atingir $4\text{ }^\circ\text{C}$). Por outro lado, as carcaças resfriadas pelo processo CO apresentaram perdas de água entre aproximadamente 1,5 g a cada 100 g iniciais da carcaça e 2,3 g a cada 100g iniciais da carcaça após 3600 s de processo, sendo que após este tempo as massas das carcaças não apresentam grandes variações até o final do resfriamento.

Os valores de ganho de massa durante o processo IA estão apresentados na Figura 4.7g, aos quais foram bem representados pelo modelo de Azuara et al. (1992). Esta evolução temporal de ganho de massa de carcaças apresenta tendência similar ao comportamento de ganho de massa de carcaças de frango relatado por Carciofi e Laurindo

(2007) em estudo do processo de resfriamento de carcaças em imersão em *chiller* com água fria sem agitação.

Os valores dos parâmetros de ajuste do modelo de Azuara et al. (1992) (Equação (3.17)), para os diferentes processos e condições investigadas, estão presentes na Tabela 4.6. Verifica-se que o modelo foi bem ajustado aos dados experimentais para todas as 13 condições avaliadas, uma vez que os valores de R^2 das regressões estão entre 0,934 e 0,998.

Tabela 4.6 - Valores dos parâmetros estimados para a função empírica proposta por Azuara et al. (1992) e os parâmetros estatísticos do ajuste da função aos dados experimental de perda de massa ou ganho para diferentes processos de resfriamento de carcaças de frango.

Velocidade do ar (m s ⁻¹)	%	AF			CO			IA		
		Parâmetros da função		R ²	Parâmetros da função		R ²	Parâmetros da função		R ²
		Δm_{∞}	S		Δm_{∞}	S		Δm_{∞}	S	
		(10 ⁻³ g/100g)	(10 ⁻³ s ⁻¹)	(10 ⁻³ g/100g)	(10 ⁻³ s ⁻¹)	(10 ⁻³ g/100)	(10 ⁻³ s ⁻¹)			
	90	-28,7	-1,2	0,995	-15,9	-9,1	0,944			
V ₁ F	60	-34,2	-1,0	0,994	-17,6	-15,9	0,948			
	30	-35,4	-0,9	0,991	-14,3	-12,5	0,945			
V ₂ F	90	-35,5	-1,2	0,998	-17,0	-16,3	0,934	+35,7	+0,40	0,948
	60	-43,4	-0,9	0,992	-24,8	-3,2	0,992			
	30	-44,4	-0,1	0,993	-17,8	-11,9	0,942			

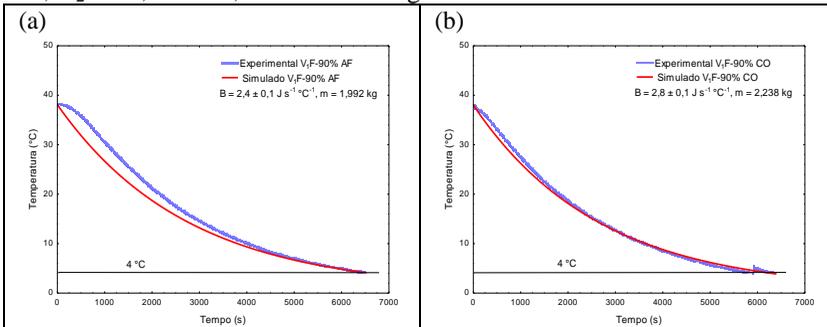
V₁F = 4,07 m s⁻¹, V₂F = 5,66 m s⁻¹.

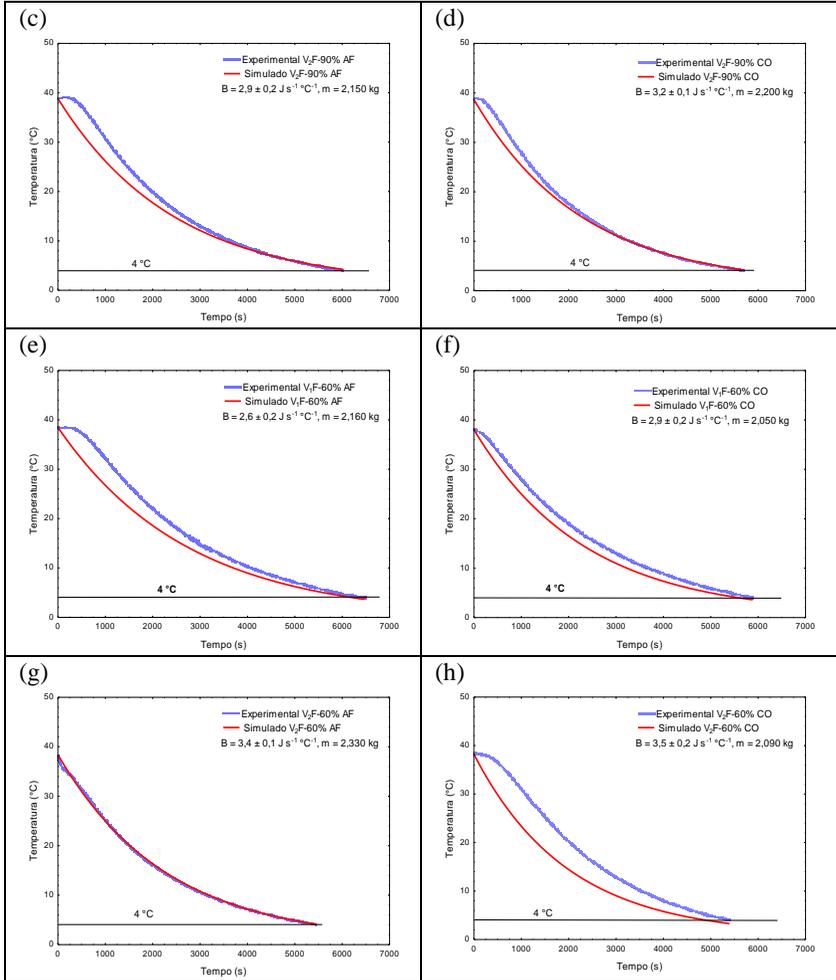
4.2.3 Modelagem matemática do tempo de resfriamento

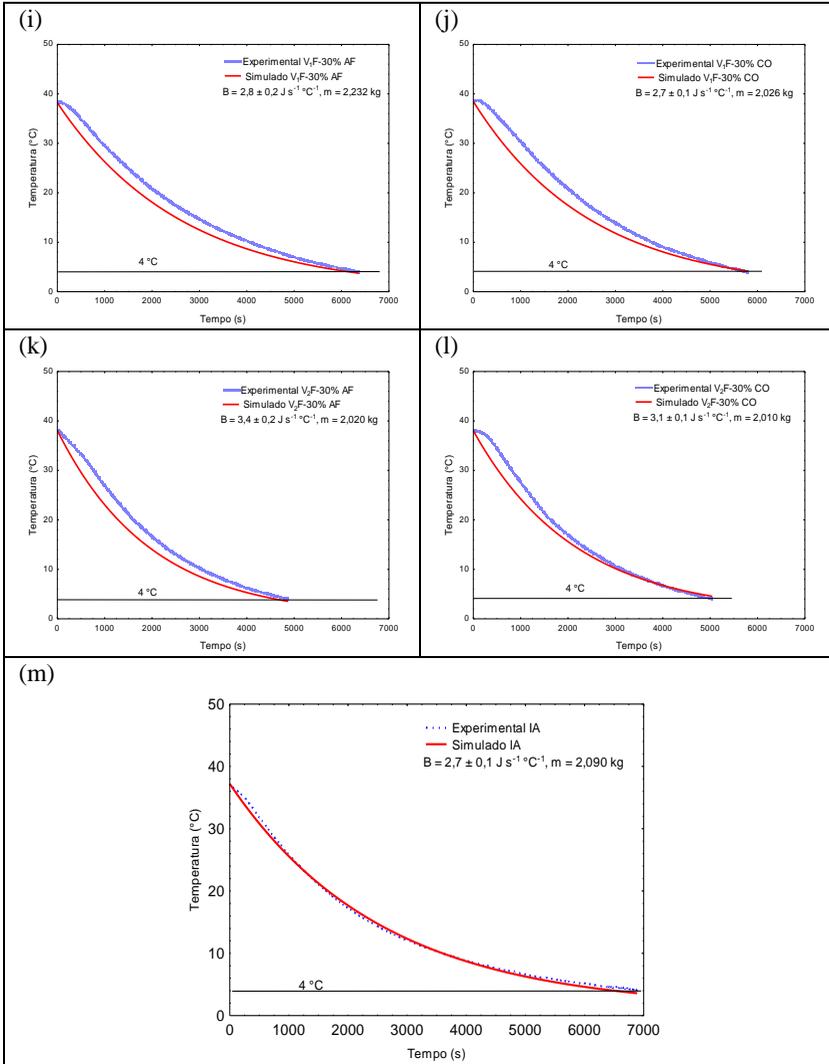
Na Figura 4.7 estão apresentados os valores do parâmetro B estimados para as condições experimentais observadas em diferentes processos de resfriamento de carcaças de frango. O modelo matemático de Carciofi e Laurindo (2007), apresentado na Equação (3.17), representou bem os valores experimentais das evoluções de tempo-temperatura de carcaças submetidas ao resfriamento, uma vez que os valores de R^2 estão entre 0,969 e 0,998. Verifica-se na Figura 4.7, que os maiores valores médios do parâmetro B foram encontrados para as todas as condições na maior velocidade do ar em ambos os processos AF e CO. Este fato está relacionado com o aumento da taxa de resfriamento à medida que a velocidade do ar aumenta, possibilitando uma maior transferência de calor convectiva entre as carcaças e o fluido refrigerado, uma vez que o parâmetro B depende diretamente dos valores do coeficiente de transferência de calor convectivo (h).

As diferenças entre as evoluções temporais das temperaturas experimentais e simuladas podem ser explicadas pela diferença entre o formato do modelo exponencial utilizado e a evolução dos dados experimentais (que apresenta características difusivas) que não exhibe esse mesmo formato exponencial. Este modelo também não leva em consideração as influências dos efeitos de condução de calor e a quantidade de gordura da região peitoral das carcaças de frango.

Figura 4.7 - Evolução temporal das temperaturas experimentais e simuladas (a partir do uso do parâmetro B) da musculatura central de carcaças de frango submetidas ao resfriamento por ar forçado e combinado. Processos: Ar forçado e combinado, UR de 90, 60 e 30 % e velocidades $V_1F = 4,07 \text{ m s}^{-1}$, $V_2F = 5,66 \text{ m s}^{-1}$, e imersão em água.







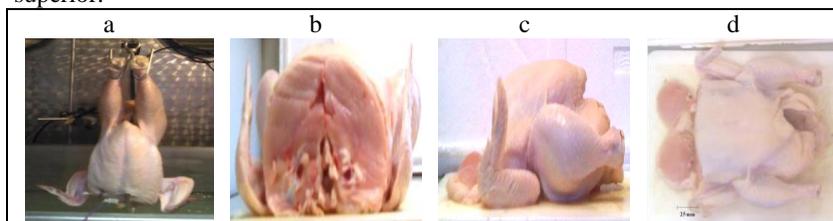
Os resultados das simulações obtidas nesta etapa do trabalho, para o processo IA corroboram com os resultados do estudo de Carciofi e Laurindo (2010), os quais relataram as taxas de resfriamento de carcaças de frango imersas em água. Na análise destes resultados os autores demonstraram quantitativamente a importância da intensidade da agitação da água de resfriamento para a garantia de um processo de resfriamento mais rápido. Além disso, concluíram que, mesmo sendo a

taxa de resfriamento dependente da difusão de calor internamente na carcaça, a resistência à transferência de calor convectiva não pode ser desprezada.

4.2.4 Análises termográficas

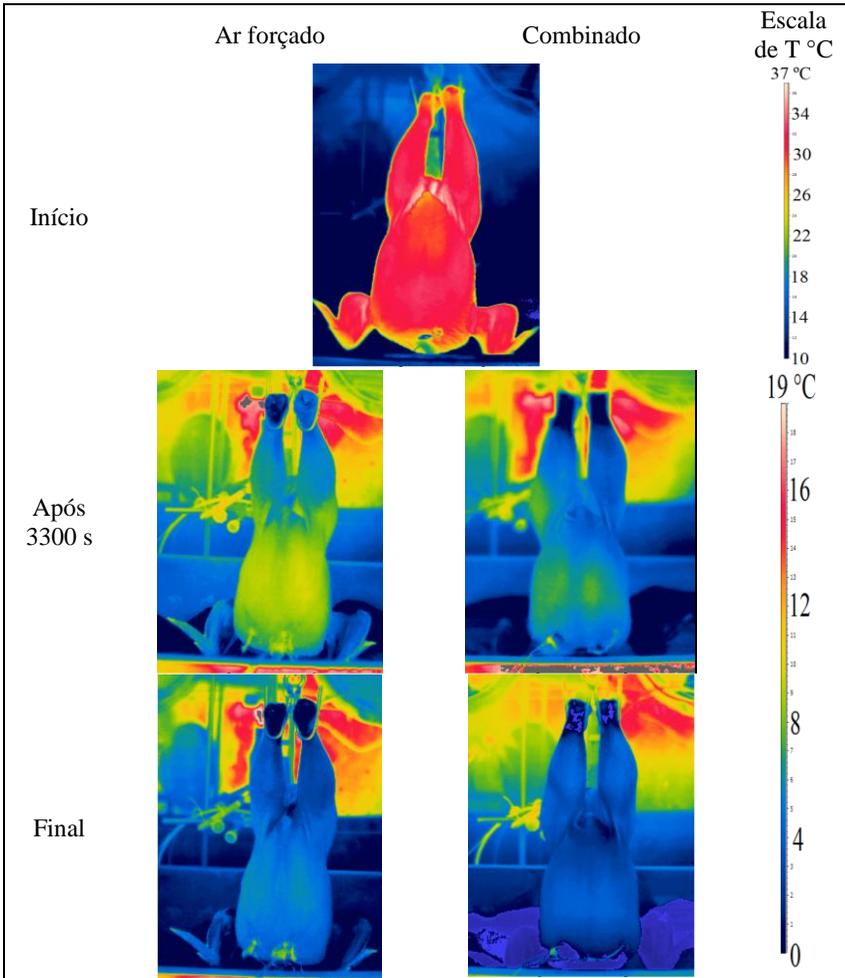
Na Figura 4.8 estão apresentadas quatro imagens registradas de carcaças de frango: (a) carcaça inteira, alocada no interior da câmara fria; (b) em corte com vista frontal; (c) em corte com vista lateral e (d) em corte com vista superior.

Figura 4.8 - Imagens de luz visível de carcaças de frango em diferentes condições: (a) Carcaça inteira, alocada no interior da câmara fria; (b) Em corte com vista frontal; (c) Em corte com vista lateral e (d) Em corte com vista superior.



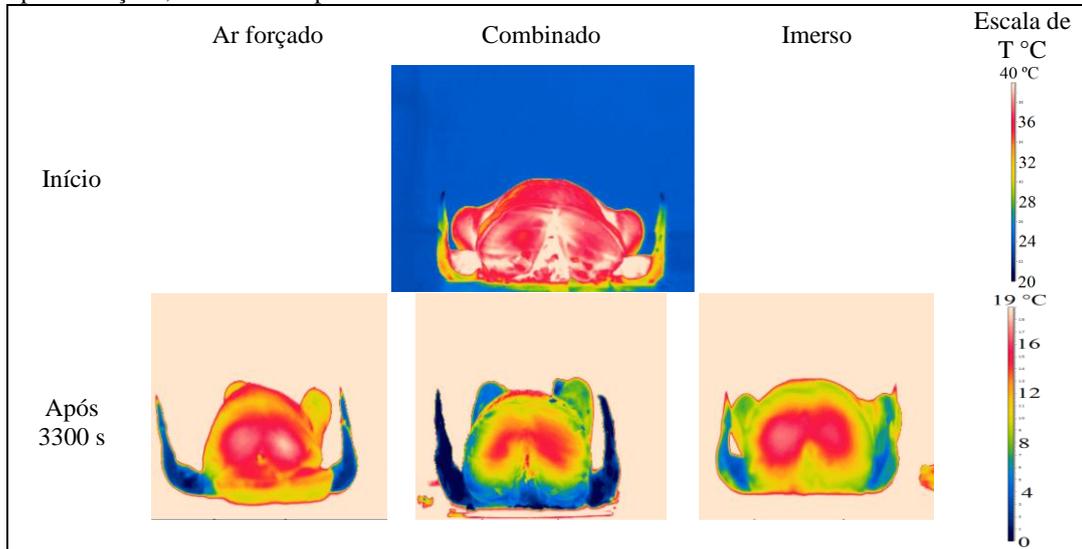
Na Figura 4.9 são apresentadas imagens termográficas de infravermelho das superfícies das carcaças de frango em três diferentes momentos durante os processos AF e CO (inicial, após 3300 s e ao final do processo de resfriamento). Todas as imagens foram registradas com as amostras posicionadas no interior da câmara fria. As imagens mostram diferenças entre 2 °C a 3 °C, aproximadamente, nas temperaturas superficiais das carcaças, quando se comparam os processos AF e CO. As sucessivas imersões em água das carcaças de frango e o resfriamento evaporativo ocasionaram menores valores de temperatura da região da superfície peitoral das amostras resfriadas pelo processo CO quando comparado com um processo AF (Figura 4.9).

Figura 4.9 - Imagens termográficas de infravermelho da superfície de carcaças de frango em três diferentes momentos para o resfriamento por ar forçado e combinado.



Na Figura 4.10 estão apresentadas as imagens termográficas referentes à distribuição de temperaturas do interior da região peitoral de carcaças de frango. Captaram-se imagens termográficas de carcaças de frango, após cortes transversais, para dois diferentes momentos (inicial e após 3300 s de resfriamento) para os processos de resfriamento AF e CO (ambos em V_1F e $UR = 60\%$) e IA.

Figura 4.10 - Imagens termográficas de infravermelho de carcaça de frango em cortes em três diferentes momentos para o resfriamento por ar forçado, combinado e por imersão.



Verifica-se, na Figura 4.10, que as temperaturas da região da musculatura central das amostras diminuem de forma mais lenta do que as temperaturas na região mais próxima a superfície das carcaças, devido à resistência interna de troca de calor com o ambiente refrigerado. Este fato corrobora com os dados da evolução temporal das temperaturas verificadas anteriormente na Figura 4.4, que também indicam diferenças de 2 °C a 4 °C após 3300 s e de 1 °C a 3 °C ao final do resfriamento entre as temperaturas das regiões mais próximas a superfície e das regiões centrais da musculatura peitoral das carcaças de frango.

5 CONCLUSÃO

O método para determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor (h) entre uma esfera metálica coberta por um tecido inicialmente molhado ou seco e o ar de resfriamento é capaz de quantificar a influência das mudanças da UR e da velocidade do ar durante o processo de resfriamento. Os resultados obtidos mostram que nas mesmas condições experimentais de resfriamento, os valores de h entre a esfera metálica e o ar refrigerado aumentaram aproximadamente três vezes quando se cobriu a esfera com o tecido molhado. Além disso, a técnica de resfriamento por ar forçado da esfera coberta pelo tecido molhado permitiu a quantificação da redução do tempo de resfriamento e da perda de água do tecido.

Os resultados obtidos com a esfera de alumínio coberta com um tecido molhado são reproduzidos qualitativamente em um processo de resfriamento de carcaças de frango submetidas aos métodos por ar forçado e combinado de imersão rápida em água e uso de ar frio forçado.

Com relação ao estudo de um processo de resfriamento de carcaças de frango, o aparato experimental especialmente desenvolvido para este trabalho apresenta-se como uma ferramenta útil ao processo de resfriamento de carcaças de frango em diferentes condições experimentais. O método de resfriamento de carcaças de frango combinando o uso de ar frio forçado e rápidas imersões em água fria apresenta-se como uma alternativa ao processo totalmente em imersão em água, que é largamente utilizado em escala industrial. Este método combinado apresenta uma redução da perda de massa e do tempo de processo na comparação com os resultados obtidos pelo sistema de resfriamento utilizando somente ar forçado, nas mesmas condições experimentais de velocidade e UR do ar. A variação da velocidade e da UR do ar avaliados neste trabalho foram apropriados, mostrando que ambos são críticos para descrever as evoluções temporais de temperatura durante resfriamento.

O ajuste da variação da massa e a simulação do tempo de resfriamento são capazes de descrever os resultados experimentais de resfriamento de carcaças de frango por ar forçado, imerso em água e combinado de ar forçado mais imersão em água fria.

As imagens termográficas de infravermelho permitiram a medição da distribuição das temperaturas internas e superficiais das carcaças de frango durante o resfriamento.

Propostas para trabalhos futuros.

- utilização de carcaças de frangos oriundas diretamente de uma unidade processadora, minutos após a etapa de abate e evisceração, para avaliação do processo de resfriamento combinado em escala laboratorial;
- avaliação e comparação dos fatores relacionados à qualidade da carne, como propriedades de textura, cor, pH e de capacidade de retenção de água (CRA), de carcaças de frango abatidas e evisceradas oriundas diretamente de uma unidade processadora para o resfriamento nos diferentes métodos estudados neste trabalho;
- determinação da área média de uma carcaça de frango, para auxílio na determinação do cálculo médio do coeficiente convectivo de transferência de calor entre um fluido refrigerado e a carcaça de frango;
- estudos adicionais sobre a duração, a intensidade dos tempos de imersão em água e agitação da água fria utilizada durante a realização de um processo combinado de resfriamento de carcaças de frango.
- estudo da utilização de lama de gelo como uma tecnologia inovadora presente na avaliação da eficiência do tempo e do ganho de massa durante o resfriamento em imersão de carcaças de frango.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHENBACH, E. Heat transfer from spheres up to $Re = 6 \times 10^6$. Process 6th international heat transfer conference. 5. Hemisphere. Washington, DC. 1978.

AMENDOLA, M.; TERUEL, B. Uso de um esquema implícito e de splines para a simulação numérica do processo de resfriamento de frutas esféricas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 9, 78-82. 2005.

ANUALPEC. Anuário da Pecuária Brasileira. São Paulo: FNP. 2010.

AVISITE. **Em 2020 carne de frango será a mais consumida no mundo.** Disponível em: <<http://www.avisite.com.br/noticias/index.php?codnoticia=14231>> Acesso em: Julho de 2013.

AZUARA, E.; CORTES, R.; GARCIA, H. S.; BERISTAIN, C. I. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law. **International Journal of Food Science and Technology**, 27, p. 409 – 418. 1992.

BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. Heat transfer coefficients for forced-air cooling and freezing of selected foods. **International Journal of Refrigeration**, 27, p. 540–551. 2004.

BELL & EVANS. **Air chilled.** Disponível em: <<http://www.bellandevans.com/content/air-chilled>>. Acesso em: Março de 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regulamento técnico da inspeção tecnológica e sanitária de carnes de aves. Portaria N° 210**, Novembro, 1998.

CARCIOFI, B. A. **Estudo do resfriamento de carcaças de frango em chiller de imersão em água**, Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.

CARCIOFI, B. A.; LAURINDO, J. B. Water uptake by poultry carcasses during cooling by water immersion. **Chemical Engineering and Processing**, 46, p. 444–450. 2007.

CARCIOFI, B. A.; LAURINDO, J. B. Experimental results and modeling of poultry carcass cooling by water immersion. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 30 (2), p. 447 - 453. 2010.

COOK, W. H. SAIR, L. Freezing and frozen storage of poultry, *Process Britain Assoc Refrigeration*, 34 (2), p. 1 13. 1938.

DEMIROK, E.; VELUZ, G.; STUYVENBERG, W.V.; CASTAÑEDA, M.P.; BYRD, A.; ALVARADO, C. Z. Quality and safety of broiler meat in various chilling systems. **Poultry Science**, 92, p. 1117 - 1126. 2013.

DINÇER I. Heat-transfer coefficients in hydrocooling of spherical and cylindrical food products. **Energy**,18(4), p. 335–40. 1993.

DINÇER, I. **Heat Transfer in Food Cooling Applications** (2^a ed.). Washington: Taylor & Francis. 1997.

DOSSAT, R. J. **Princípios de refrigeração**. (1^a ed.). São Paulo : Hemus. 2004.

DUFOUR, E.; RENO, J.-P. Propriétés structurantes de l'eau dans les produits a structure cellulaire. Muscle, viande et produits carnés. **Propriétés de l'eau dans les aliments**, p. 159–188. 2002.

GAZDZIAK, S. The future of air-chill technology: A chill in the air. 2006. Disponível em: <<http://www.allbusiness.com/retail-trade/food-beverage-stores>>. Acesso em: Junho de 2011.

GREER, G. G.; JONES, S. D. Quality and Bacteriological Consequences of Beef Carcass Spray-chilling: Effects of Spray Duration and Boxed Beef Storage Temperature. **Meat Science**, p. 61 - 73. 1997.

HOLMAN, J. P. **Heat Transfer** (7^a ed.). London, UK: McGraw-Hill Book Co. 1992.

HUEZO, R. **Chilling of broiler carcasses: microbiological and quality implications**. Dissertação de Mestrado - University of Georgia, GEORGIA. 2007a.

HUEZO, R.; SMITH, D. P.; NORTHCUTT, J. K.; FLETCHER, D. L. Effect of Immersion or Dry Air Chilling on Broiler Carcass Moisture Retention and Breast Fillet Functionality. **The Journal of Applied Poultry Research**, 16, p. 438 - 447. 2007b.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa** (5ª ed.). Rio de Janeiro: LTC. 2002.

JACKMAN, P.; SUN, D.-W.; ZHENG, L. Effect of combined vacuum cooling and air blast cooling on processing time and cooling loss of large cooked beef joints. **Journal of Food Engineering**, p. 266 - 271. 2007.

JAMES, C.; VINCENT, C.; LIMA, T. I.; JAMES, S. J. The primary chilling of poultry carcasses - a review. **International Journal of Refrigeration**, 29, p. 847 - 862. 2006.

JEONG, J. Y., JANARDHANAN, K. K., BOOREN, A. M., HARTE, J. B., KANG, I. Breast meat quality and consumer sensory properties of broiler carcasses chilled by water, air, or evaporative air. **Poultry Science**, 90, p. 694 - 700. 2011a.

JEONG, J. Y.; JANARDHANAN, K. K.; BOOREN, A. M.; KARCHER, D. M.; KANG, I. Moisture content, processing yield, and surface color of broiler carcasses chilled by water, air, or evaporative air. **Poultry Science**, 90, p. 687 -693. 2011b.

KLASSEN, T. **Uso de redes neurais artificiais para a modelagem da temperatura e da retenção de água no processo de resfriamento de carcaças de frangos por imersão**. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

KLASSEN, T.; MARTINS, T. D.; CARDOZO FILHO, L.; SILVA, E. A. Modelagem do sistema de resfriamento por imersão de carcaças de frangos utilizando redes neurais artificiais. **Acta Scientiarum Technology**, 31 (2), p. 201 - 205. 2009.

LANDFELD, A.; HOUSKA, M. Prediction of heat and mass transfer during passage of the chicken through the chilling tunnel. **Journal of Food Engineering**, 72, p. 108-112. 2006.

LAURINDO, J. B.; CARCIOFI, B. A. M.; SILVA, R. R.; DANNENHAUER, C. E.; HENSE, H. Evaluation of the effects of water agitation by air injection and water recirculation on the heat transfer coefficients in immersion cooling. **Journal of Food Engineering**, 96, p. 59-65. 2010a.

LAURINDO, J. B.; CARCIOFI, B. A. M.; SILVA, R. R.; HENSE, H. On-line monitoring of heat transfer coefficients in a stirred tank from the signatures of the resultant force on a submerged body. **International Journal of Refrigeration**, 33, p. 600 – 606. 2010b.

LUCAS, T.; RAOULT-WACK, A. L. Immersion chilling and freezing in aqueous refrigerating media: review and future trends. **International Journal of Refrigeration**, 21 (6), p. 419 - 429. 1998.

McADAMS, W. H. Heat transmission (3^a ed.). New York: McGraw-Hill. 1954.

MAREL - Marel Stork Poultry Processing Inc. Disponível em <www.marel.com> Acesso em: agosto de 2012.

MARTINS, T. D.; KLASSEN, T.; CANEVESI, R. L. S.; BARELLA, R. A.; CARDOZO FILHO, L.; SILVA, E. A. Modeling the water uptake by chicken carcasses during cooling by immersion. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 31 (3), p. 571 – 576, 2011.

MIELNIK, M. B.; DAINY, R. H.; LUNDBY, F.; MIELNIK, J. The effect of evaporative air chilling and storage temperature on quality and shelf life of fresh chicken carcasses. **Poultry Science**, 78, p. 1065–1073. 1999.

NÄÄS, I. D. A rastreabilidade e suas implicações na avicultura nacional. **Ave Word**, p. 16 - 22. 2003.

NEVES FILHO, L. C. **Estudo de algumas variáveis no resfriamento contínuo por imersão de frango**. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1978.

OFFER, G.; COUSIN, T. The mechanism of drip production – formation of 2 compartments of extracellular-space in muscle postmortem. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 58, p. 107 – 116. 1992.

PAOLAZZI, E. D.; NOREÑA, C. P.; BRANDELLI, A. Water Absorption and Temperature Changes in Poultry Carcasses during Chilling by Immersion. **International Journal of Food Engineering**, 9(1), p. 129–134. 2013.

PEREIRA, S. C. **Gerenciamento de Cadeias de Suprimentos: Análise da avaliação de desempenho de uma cadeia de carne e produtos industrializados de frango no Brasil**. Tese de doutorado - Fundação Getúlio Vargas, São Paulo. 2003.

PERUMALLA, A. V. S.; SAHA, A.; LEE, Y.; MEULLENET, J. F.; OWENS, C. M. Marination properties and sensory evaluation of breast fillets from air-chilled and immersion-chilled broiler carcasses. **Poultry Science**, 90, p. 671 - 679. 2011.

PETRAK, T.; KALODERA, Z.; NOVAKOVIC, P.; KAROLYI, L. G. Bacteriological comparison of parallel and counter flow water chilling of poultry. **Meat Science**, 53, p. 269 - 271. 1999.

RICHETTI, A.; SANTOS, A. C. O sistema integrado de produção de frango de corte em minas gerais. **Revista de Administração da UFLA**, 2, p. 34 - 43. 2000.

RIELLA, H. G.; GERLOFF, J. **DESCARGA ZERO NOS TANQUES DE PRÉ-RESFRIAMENTO DE CARÇAÇA DE AVES**. I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais Tratamento de Dejetos de Animais, p. 543 - 549. Florianópolis. 2009.

SAKAMOTO, F. T.; BORNIA, A. C. Agroindústria de frango brasileira: a importância do desenvolvimento de indicadores de desempenho inseridos no conceito de gestão da cadeia de suprimentos. **Gestão Industrial**, 1 , 26 - 33. 2005.

SAMS, A. R. **Poultry Meat Processing**. Boca Raton: CRC Press. 2001.

SANTOS, C. A.; CARCIOFI, B. A.; DANNENHAUER, C. E.; HENSE, H.; LAURINDO, J. B. Determination of heat transfer coefficient in cooling-freezing tunnels using experimental time–temperature data. **Journal of Food Process Engineering**, 30, p. 717 - 728. 2007.

SAVELL, J. W.; MUELLER, S. L.; BAIRD, B. E. The chilling of carcasses. **Meat Science**, 70, p. 449 - 459. 2005.

SCHMIDT, F. C.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Salting operational diagrams for chicken breast cuts: Hydration-dehydration. **Journal of Food Engineering**, 88, p. 36 – 44. 2008.

SILVA, R. R. **Estudo da transferência de calor em tanque submerso: Influências do modo e da intensidade da agitação da água**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.

STEKETEE, J. Spectral emissivity of skin and pericardium. **Physics in Medicine and Biology**, London, v.18, p.686 - 694, 1973.

STORK. **Chilling**. Disponível em: <<http://www.storkfoodsystems.com/usa/equipment/broiler-processing/chilling/air-chilling-system>>, Acesso em: Agosto de 2011.

TERUEL, B.; CORTEZ, L.; NEVES FILHO, L. Estudo comparativo do resfriamento de laranja valência com ar forçado e com água. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 23 (2), p. 174 - 178. 2003.

THOMSON, J. E.; WHITEHEAD, W. K.; MERCURI, A. J. Chilling poultry meat - a literature review. **Poultry Science**, p. 1268-1281. 1974.

TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. New York, USA: Chapman & Hall, p. 398-436. 1991.

TOPKIP. **Combi In-line air chilling system**. Disponível em: <<http://ww.topkip.com>>, Acesso Dezembro de 2012.

UBABEF - União Brasileira de Avicultura. Disponível em: <<http://www.brazilianchicken.com.br>>. Acesso em: Março de 2013.

USDA – United State Department of Agriculture. Disponível em: <<http://usda01.library.cornell.edu/usda/current/livestock-poultry-ma/livestock-poultry-ma-10-18-2012.pdf>>. Acesso em: Março de 2013.

VISSOTTO, F. Z.; KIECKBUSCH, T. G.; NEVES FILHO, L. C. Pré-resfriamento de Produtos-modelo Utilizando Ar-forçado. **Brazilian Journal Food Technology**, 3, p. 1 - 10. 2000.

WHITAKER, S. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. *AIChE Journal* , 18, 361 - 371. 1972.

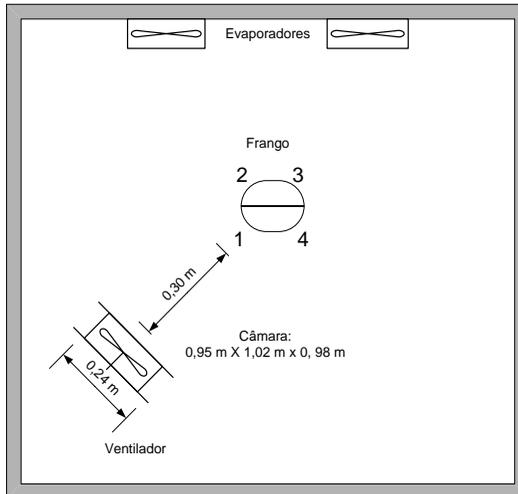
YOUNG, L. L.; SMITH, D. P. Moisture Retention by Water- and Air-Chilled Chicken Broilers During Processing and Cutup Operations. **Poultry Science**, p. 119 - 122. 2004.

ZANUSSO, J. T.; DIONELLO, N. J. Produção avícola alternativa - análise dos fatores qualitativos da carne de frangos de corte tipo caipira. **Revista Brasileira da Agrociência**, 9 (3), p. 191 - 194. 2003.

ZHUANG, H.; SAVAGE, E. M.; SMITH, D. P.; BERRANG, M. E. Effect of dry-air chilling on sensory descriptive profiles of cooked broiler breast meat deboned four hours after the initiation of chilling. **Poultry Science**, p. 1282 - 1291. 2009.

APÊNDICE A

Figura A-1: Pontos de medição das velocidades médias do ar ao redor de uma amostra de carcaça de frango durante um processo experimental de resfriamento. Ponto: 1) $V_1F= 4,07 \text{ m s}^{-1}$, $V_2F = 5,66 \text{ m s}^{-1}$; 2) $V_1F= 3,0 \text{ m s}^{-1}$, $V_2F = 3,65 \text{ m s}^{-1}$; 3) $V_1F= 1,52 \text{ m s}^{-1}$, $V_2F = 2,35 \text{ m s}^{-1}$; 4) $V_1F= 1,87 \text{ m s}^{-1}$, $V_2F = 3,66 \text{ m s}^{-1}$.



APÊNDICE B

Figura B-1. Históricos das temperaturas da esfera durante resfriamento por ar forçado em velocidade V_1E e V_2E e 30 % de UR. Ensaio de resfriamento da esfera: (a) V_1E -30% com tecido; (b) V_2E -30% com tecido; (c) Comparação da temperatura do centro da esfera sem e com tecido molhado em V_1E -30 %; e (d) Comparação da temperatura do centro da esfera sem e com tecido molhado em V_2E -30 %.

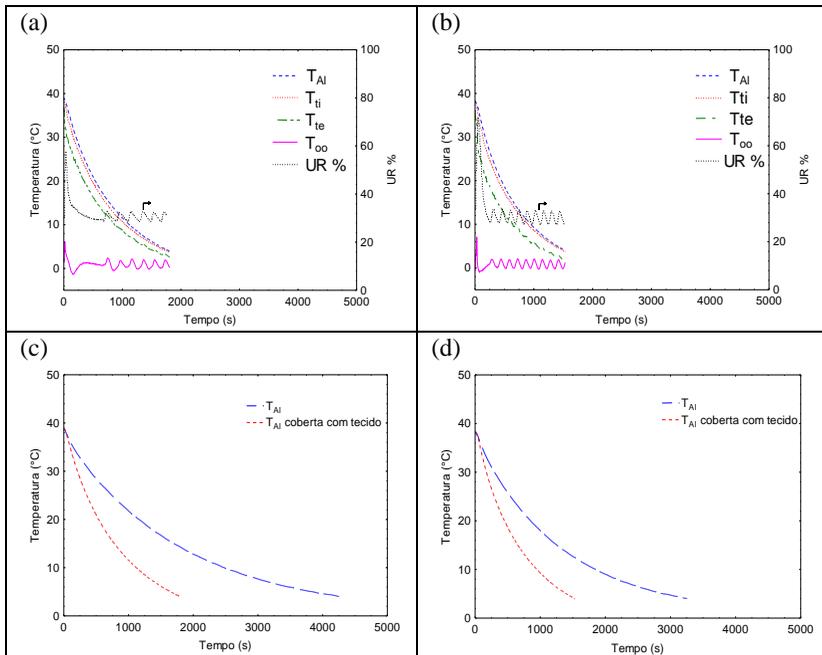
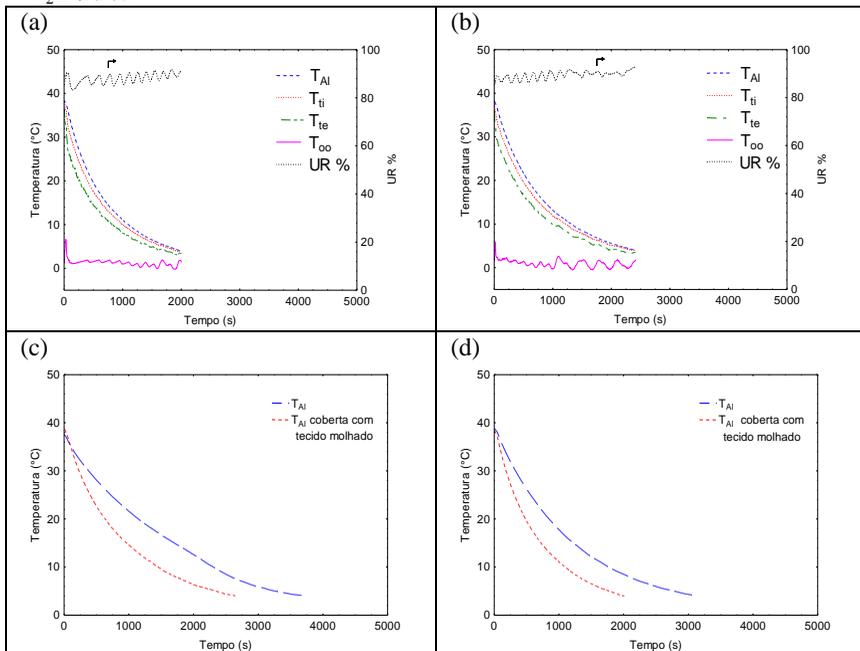


Figura B-2. Históricos das temperaturas da esfera durante resfriamento por ar forçado em velocidade V_1E e V_2E e 90 % de UR. Ensaios de resfriamento da esfera: (a) $V_1E-90\%$ com tecido; (b) $V_2E-90\%$ com tecido; (c) Comparação da temperatura do centro da esfera sem e com tecido molhado em $V_1E-90\%$; e (d) Comparação da temperatura do centro da esfera sem e com tecido molhado em $V_2E-90\%$.



APÊNDICE C

Figura C-1. Históricos comparativos das temperaturas T1 (20 mm de profundidade) e T2 (10 mm de profundidade) inseridas no peito de carcaças de frango durante processo de resfriamento em duas velocidades do ar ($V_1F=4,07\pm 0,08\text{ m s}^{-1}$ e $V_2F=5,66\pm 0,27\text{ m s}^{-1}$) para os processos: (a) Ar forçado em 90 % de UR; (b) Combinado em 90 % de UR; (c) Ar forçado em 30 % de UR; e (d) Combinado em 30 % de UR.

