

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

**FRANCINY CAMPOS SCHMIDT**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO INTEGRADO DE  
COZIMENTO E RESFRIAMENTO A VÁCUO APLICADO A  
CORTES DE PEITO DE FRANGO**

Tese de Doutorado submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Alimentos. Área de concentração: Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos.

*Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo*

Florianópolis, dezembro de 2010.

*“De tudo ficam três coisas:  
A certeza de estarmos sempre começando  
A certeza de que é preciso continuar  
E a certeza de que podemos ser  
interrompidos antes de terminarmos.  
Portanto:  
Fazer da interrupção um novo caminho,  
da queda um passo de dança,  
do medo uma escada,  
do sonho uma ponte,  
Da procura um encontro.”*

*Fernando Sabino*



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. João Borges Laurindo, agradeço por todos os ensinamentos, pela confiança e por todas as oportunidades que me proporcionou em todos esses anos de trabalho em conjunto.

A todos do projeto PHB, pessoas especiais com quem eu tive o prazer de conviver e trabalhar no primeiro ano de doutorado. Agradeço especialmente à Prof.<sup>a</sup> Gláucia, ao Prof. Willibaldo e à amiga Jaciane, pelos ensinamentos e excelente convivência.

Ao Prof. José Manuel Barat Baviera que me abriu as portas da Universidade Politécnica de Valência e me deu a oportunidade de conhecer um mundo novo, o que contribuiu imensamente para o meu crescimento profissional.

À Ana que me acolheu com amizade e carinho na UPV. Sua dedicação e profissionalismo será sempre um exemplo para mim.

Aos membros da banca, por todas as críticas e sugestões que resultaram no aprimoramento do trabalho final.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos por todo o suporte ao longo de todos esses anos. Obrigada Prof.<sup>a</sup> Alcilene e Raquel pela dedicação e por estarem sempre dispostas a ajudar.

A todos os amigos do Laboratório PROFI, pela companhia e por todos os momentos agradáveis no laboratório.

À Darlene, ao Gustavo, à Carol e à Fran, por toda ajuda no trabalho experimental.

À Thacyana, agradeço imensamente pela ajuda na execução deste projeto. Sua dedicação e comprometimento foram fundamentais.

À Ana Cristina que através da empresa Tyson do Brasil possibilitou a doação das amostras.

À Capes e ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todos os amigos que contribuíram com seu apoio e incentivo. Agradeço especialmente à Déia, à Jaci, ao Bruno, à Carmen, à Bi e à Bia por compartilharem comigo cada etapa desta conquista.

À querida amiga Poli que, além do apoio incondicional, teve a generosidade de ler todo o trabalho em busca de cada palavra ou vírgula mal colocada.

Ao Dudu por todo amor, carinho, compreensão e por sempre estar me apoiando. A conclusão desta etapa dedico a você!!!

À minha família por todo amor e incentivo. Muito Obrigada!!!

## RESUMO

A utilização de cortes de carne cozidos para a elaboração de produtos com alto valor agregado deve ser vinculada a processos de fabricação eficientes e seguros. Assim, técnicas para se obter um resfriamento rápido e homogêneo de cortes de carnes submetidos ao processo de cozimento são de grande importância para a indústria. Dentre as novas tecnologias, a técnica de resfriamento a vácuo tem sido apontada como uma interessante alternativa para a redução do tempo de resfriamento de produtos cárneos em comparação com as técnicas tradicionais. Uma importante característica dessa técnica é a possibilidade da sua integração com o processo de cozimento em um mesmo equipamento, o que permite reduzir a manipulação do produto e o consequente risco de contaminação microbiológica. Neste contexto, a primeira etapa deste trabalho constituiu-se no desenvolvimento de um dispositivo que permite tal integração e na avaliação do seu uso para o processamento de cortes de peito de frango. Na segunda etapa do trabalho, comparou-se o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) de filés de peito de frango com o processo de cozimento por imersão seguido de método convencional de resfriamento em câmara fria (CI,RC). Foram avaliadas as influências das etapas RV e RC na taxa de resfriamento e na perda de massa, para processos realizados com diferentes quantidades de amostras. Para as condições estudadas, o tempo para o resfriamento das amostras de aproximadamente 80 °C até 10 °C foi praticamente 3 vezes menor utilizando o RV em comparação com o método RC. Adicionalmente, verificou-se um resfriamento mais homogêneo das amostras submetidas ao RV, independentemente da quantidade de produto ou do seu empilhamento. Por outro lado, a perda de massa das amostras submetidas ao método RV (entre 11,5 e 11,7%, em relação à massa da amostra cozida) foi maior que a perda de massa das amostras submetidas ao método RC (entre 6,8 e 8,4%). Em função dessa maior perda de massa no resfriamento, os filés de peito de frango submetidos ao processo CI-RV apresentaram menores conteúdos de umidade que os submetidos ao processo CI,RC, o que afetou diretamente as propriedades mecânicas dos mesmos (maiores valores de dureza e força máxima de cisalhamento). Desta forma, duas alternativas de processamento para compensar a excessiva perda de massa durante o RV e evitar os efeitos adversos no produto foram avaliadas. A primeira alternativa consistiu-se no processo integrado de cozimento por imersão seguido do resfriamento a vácuo dos filés de frango imersos na água de

cozimento (CI-RVI). As amostras submetidas à etapa RVI apresentaram uma considerável redução na perda de massa durante o resfriamento (valores entre 4,2 e 4,8%) em relação ao RV convencional. Além disso, reduções ainda maiores na perda de massa foram obtidas quando utilizou-se ciclos de variação da pressão (pulsos de vácuo-pressão atmosférica-vácuo) durante a etapa RVI. No entanto, a taxa de resfriamento das amostras através do método RVI foi menor que a taxa de resfriamento durante o RV. Como segunda alternativa, foi proposta a utilização da técnica de impregnação a vácuo (IV) de uma solução de interesse nos cortes de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo. A IV integrada aos processos de cozimento e resfriamento a vácuo (CI-RV-IV) apresentou-se como uma alternativa interessante para a redução da perda de massa global durante o processamento de filés de peito de frango cozido, sem apresentar o maior tempo de resfriamento obtido com o método RVI. Finalizando este trabalho, foi estudada a espectroscopia de impedância como técnica de medida para a predição de parâmetros de interesse durante o processamento de filés de peito de frango como, por exemplo, a temperatura final atingida na etapa de cozimento.

**Palavras chaves:** cozimento, resfriamento, integração, vácuo, carne, impedância.

## ABSTRACT

The use of cooked meat cuts for preparing products with higher added value must be linked to safe and efficient manufacturing processes. Thus, techniques for obtaining a fast and homogeneous cooling of meat cuts subjected to cooking processes are of great importance for the industry. Among the new technologies, the vacuum cooling technique has been considered an interesting alternative for reducing the cooling time of meat products as compared to conventional methods. One important characteristic of such a technique is the possibility of its integration with the cooking process in a single device, which allows reducing the product manipulation and the microbiological contamination risk. In this context, the first part of this work was dedicated to develop a device that permits such a cooking and vacuum cooling integration as well as to evaluate the use of this device for processing chicken breast cuts. In a second part of this work, the integrated cooking and vacuum cooling (IC-VC) process was compared to a process of immersion cooking followed by a conventional cold room cooling (IC,CC). The influence of the vacuum and cold room cooling techniques in the cooling rate and the product weight loss were investigated for processes carried out with different product amounts. For the considered conditions, the cooling time of the samples from 80 oC to 10 oC was nearly three times smaller using vacuum cooling as compared to cold room cooling. Additionally, a more homogeneous cooling of the samples subjected to vacuum cooling was verified, regardless the amount and the stacking of the product. In the other hand, the weight loss of the samples subjected to vacuum cooling (from 11.5% to 11.7% with respect to the weight of the cooked sample) was larger than the weight loss of the samples subjected to cold room cooling (from 6.8 to 8.4%). As a consequence of such a larger weight loss, the chicken breast cuts subjected to the integrated IC-VC process presented smaller moisture contents than the ones subjected to the IC,CC process, which directly affected their mechanical properties (bigger values of hardness and shear force). Aiming to compensate for the excessive weight loss during the vacuum cooling and to avoid the adverse effects on the product, two alternative processing approaches were then considered in this work. The first one consisted of using immersion cooking followed by vacuum cooling with the chicken breast cuts immersed on the cooking water (IC-IVC). The samples subjected to such immersion vacuum cooling (IVC) presented a considerable

reduction in weight loss (from 4.2 to 4.8%) as compared to the ones cooled using standard vacuum cooling. Moreover, further reductions were obtained using cycles of pressure variation (pulses of vacuum, atmospheric pressure and vacuum) during the IVC stage. However, the cooling rates of the samples subjected to IVC were smaller than the one of the samples subjected to standard vacuum cooling. A second integrated processing alternative, consisting of using vacuum impregnation (VI) for promoting a solution intake in chicken breast cuts processed using the IC-VC process, was proposed in this work. Such a IC-VC-VI process permitted to obtain products with reduced weight loss while avoiding the larger cooling times obtained using the IVC technique. At the last part of this work, the impedance spectroscopy technique was studied with the aim of predicting parameters of interest, such as the cooking end-point temperature, during the processing of chicken breast cuts.

Keywords: cooking, cooling, integration, vacuum, meat, impedance.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>I</b>
Objetivos do Trabalho	4
Estrutura do Trabalho	5
<b>1. REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>7</b>
1.1. Carne de Frango	8
1.2. Estrutura e Propriedades Funcionais da Carne	9
1.2.1. Estrutura do músculo	10
1.2.2. Modificações bioquímicas e estruturais durante a transformação do músculo em carne	11
1.2.3. Capacidade de retenção de água da carne e a relação com anomalias PSE e DFD	14
1.2.4. Fatores que minimizam a exsudação durante o processamento de carnes	17
1.3. Processo de Cozimento de Carnes	18
1.3.1. Textura de carnes cozidas	19
1.3.2. Microbiologia de carnes cozidas	21
1.4. Resfriamento a Vácuo	23
1.4.1. Vantagens e desvantagens do resfriamento a vácuo	27
1.4.2. Transferência de calor durante o resfriamento a vácuo	29
1.4.3. Aplicações do resfriamento a vácuo	30
1.4.4. Resfriamento a vácuo de carnes cozidas	33
1.5. Impregnação a Vácuo de Alimentos Porosos	38
1.5.1. Aplicações da impregnação a vácuo (IV)	40
1.6. Espectroscopia de Impedância	41
1.6.1. Espectroscopia de impedância aplicada à indústria de alimentos	44
<b>2. DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO PARA O PROCESSO INTEGRADO DE COZIMENTO-RESFRIAMENTO A VÁCUO</b>	<b>47</b>
2.1. Introdução	48

2.2. Material e Métodos _____	49	3.3.2. Parâmetros do processo, teor de umidade e capacidade de retenção de água dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC _____	87
2.2.1. Dispositivo experimental _____	49	3.3.3. Propriedades mecânicas e coordenadas de cor dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC _____	92
2.2.2. Matéria-prima e preparo das amostras _____	50	3.3.4. Análises microbiológicas dos filés de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC _____	94
2.2.3. Metodologia experimental _____	52	3.4. Considerações Finais _____	96
2.2.4. Parâmetros do processo, determinações analíticas e ensaios mecânicos _____	52		
2.2.5. Análise estatística _____	54		
2.3. Resultados e Discussão _____	55	<b>4. ALTERNATIVAS DE PROCESSAMENTO PARA A REDUÇÃO DA PERDA DE MASSA DURANTE O RESFRIAMENTO A VÁCUO</b> _____	<b>99</b>
2.3.1. Perfis de temperatura durante os processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo de filés de peito de frango. _____	55	4.1. Introdução _____	100
2.3.2. Parâmetros avaliados para os processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo de filés de peito de frango _____	62	4.2. Material e Métodos _____	102
2.4. Considerações Finais _____	65	4.2.1. Dispositivo experimental _____	102
<b>3. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE RESFRIAMENTO A VÁCUO E EM CÂMARA FRIA PARA CORTES DE PEITO DE FRANGO</b> _____	<b>67</b>	4.2.2. Matéria-prima e preparo das amostras _____	102
3.1. Introdução _____	67	4.2.3. Processo integrado de cozimento seguido do resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (CI-RVI) _____	102
3.2. Material e Métodos _____	68	4.2.4. Processo integrado de cozimento, resfriamento a vácuo e impregnação a vácuo de filés de peito de frango (CI-RV-IV) _____	105
3.2.1. Matéria-prima e preparo das amostras _____	68	4.2.5. Parâmetros avaliados para as amostras submetidas aos processos CI-RVI, CI-RVIP e CI-RV-IV _____	108
3.2.2. Metodologia experimental para o cozimento e resfriamento das amostras _____	68	4.2.6. Cinética de impregnação a vácuo de filés de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo _____	109
3.2.3. Parâmetros do processo _____	70	4.3. Resultados e Discussão _____	113
3.2.4. Determinação dos teores de umidade _____	71	4.3.1. Processo integrado de cozimento, seguido do resfriamento a vácuo de filés de peito de frango imersos na água de cozimento (CI-RVI) _____	113
3.2.5. Determinação da capacidade de retenção de água (CRA) das amostras _____	71	4.3.2. Processo integrado de cozimento, resfriamento a vácuo e impregnação a vácuo de filés de peito de frango _____	123
3.2.6. Ensaios mecânicos _____	72	4.4. Considerações Finais _____	130
3.2.7. Determinação da cor das amostras _____	75		
3.2.8. Simulação da perda de massa durante o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango _____	75	<b>5. USO DA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA PARA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COZIMENTO DE CORTES DE PEITO DE FRANGO</b> _____	<b>133</b>
3.2.9. Análise microbiológica _____	77	5.1. Introdução _____	134
3.2.10. Análise estatística _____	78	5.2. Material e Métodos _____	135
3.3. Resultados e Discussão _____	79		
3.3.1. Perfis de temperatura dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC _____	79		



5.2.1. Equipamento eletrônico de medição de impedância	135
5.2.2. Preparação das amostras e metodologia experimental	138
5.2.3. Perda de massa e determinações analíticas	139
5.2.4. Análise dos dados	139
5.3. Resultados e Discussão	140
5.3.1. Avaliação das medidas de impedância em filés de peito de frango cozidos por imersão em água a diferentes temperaturas (60, 70, 80 e 90 °C)	140
5.3.2. Avaliação das medidas de impedância em filés de peito de frango cozidos por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo (5, 15, 25, 35 e 55 minutos)	145
5.4. Considerações Finais	152
<b>6. CONCLUSÕES FINAIS</b>	<b>153</b>
Propostas para trabalhos futuros	155
<b>7. REFERÊNCIAS</b>	<b>157</b>
<b>8. APÊNDICES</b>	<b>171</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Produção e consumo brasileiro anual de carne de frango (Fonte: UBABEF, 2010).	9
Figura 1.2 – Representação esquemática da estrutura muscular (Fonte: Animal Science Computer Labs, disponível em: <a href="http://www.anslab.iastate.edu">http://www.anslab.iastate.edu</a> ).	10
Figura 1.3 – Mudanças estruturais que ocorrem no músculo de bovino após a morte do animal (a) Músculo vivo ou imediatamente após o abate; (b) Músculo de 4 a 6 horas <i>post mortem</i> ; (c) Músculo em estado de <i>rigor mortis</i> (OFFER e COUSIN, 1992).	13
Figura 1.4 – Pressão de vapor de saturação da água em função da temperatura.	24
Figura 1.5 – Sistema típico de resfriamento a vácuo (WANG e SUN, 2001).	25
Figura 1.6 – Curvas de resfriamento de cortes de carne cozidos (4 – 5 kg), resfriados por diferentes métodos (MCDONALD e SUN, 2000).	28
Figura 1.7 – Representação da evolução temporal de sinais de tensão e corrente, com destaque para as diferentes amplitudes ( $A_v$ e $A_i$ ) e a defasagem ( $\Delta T$ ).	43
Figura 1.8 – Diagrama de Bode.	43
Figura 2.1 – Esquema do dispositivo experimental para realização dos processos integrados de cozimento e resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango.	50
Figura 2.2 – Ilustração das amostras de filés de peito de frango (meio peito) utilizadas nos experimentos. Os pontos 1, 2 e 3 indicam as três diferentes posições de inserção dos termopares (inseridos até a metade da espessura de cada seção).	51
Figura 2.3 – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango durante o processo integrado de cozimento com vapor seguido do resfriamento a vácuo (CV-RV).	56
Figura 2.4 – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango durante o processo integrado de cozimento por imersão em água, seguido da drenagem da água de cozimento e posterior resfriamento a vácuo (CI-RV).	57

Figura 2.5 – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango durante o processo integrado de cozimento por imersão em água seguido do resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (CI-RVI). \_\_\_\_\_ 57

Figura 2.6 – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango para todas as repetições de cada processo considerado (CV-RV, CI-RV e CI-RVI). (a) Durante todo o processo integrado de cozimento e resfriamento a vácuo; (b) durante a etapa de resfriamento a vácuo. \_\_\_\_\_ 60

Figura 2.7 – Comparação entre os perfis de temperatura na amostra e a temperatura de saturação da água calculada através da Equação de Antoine a partir dos valores de pressão na câmara. (a) CV-RV; (b) CI-RV e (c) CI-RVI. \_\_\_\_\_ 61

Figura 3.1 – Ilustração da disposição das amostras no cesto para as diferentes quantidades de produto consideradas nos processos de cozimento e resfriamento CI-RV e CI,RC. \_\_\_\_\_ 70

Figura 3.2 – Ilustração das amostras e da lâmina Warner-Bratzler utilizadas nos ensaios mecânicos de corte. \_\_\_\_\_ 73

Figura 3.3 – Ilustração das amostras e da *probe* utilizadas nos ensaios mecânicos de dupla compressão (TPA). \_\_\_\_\_ 74

Figura 3.4 – Curva típica de análise de perfil de textura (TPA) de amostras de peito de frango cozido e resfriado. \_\_\_\_\_ 75

Figura 3.5 – Representação do algoritmo utilizado para estimativa da evolução temporal da massa das amostras de peito de frango cozido durante a etapa de resfriamento a vácuo. \_\_\_\_\_ 77

Figura 3.6 – Comparação entre os perfis de temperatura na metade da seção de maior espessura dos cortes de peito de frango durante a etapa de resfriamento dos processos CI-RV e CI,RC com 1, 2 e 3 kg de amostras. \_\_\_\_\_ 80

Figura 3.7 – Curvas de pressão na câmara durante a etapa de resfriamento a vácuo do processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) com 1, 2 e 3 kg de filés de peito de frango. \_\_\_\_\_ 82

Figura 3.8 – Comparação entre os perfis de temperatura na metade da seção de maior ( $T_1$ ) e de menor espessura ( $T_3$ ) dos cortes de peito de frango durante a etapa de resfriamento dos processos (a) CI-RV e (b) CI,RC realizados com 1, 2 e 3 kg de amostras. \_\_\_\_\_ 84

Figura 3.9 – Comportamento da diferença de temperatura entre a seção de maior e menor espessura dos files de peito de frango durante a etapa

de resfriamento dos processos CI-RV e CI,RC realizados com 1, 2 e 3 kg de amostras. \_\_\_\_\_ 86

Figura 3.10 – Evolução temporal da massa das amostras durante a etapa de resfriamento a vácuo do processo integrado CI-RV realizado com diferentes quantidades de produto. (a) 1 kg, (b) 2 kg e (c) 3 kg. \_\_\_\_\_ 91

Figura 4.1 – Curvas típicas da pressão na câmara durante o resfriamento a vácuo com as amostras imersas na água de cozimento [relação entre a massa de amostras e o volume de água de cozimento de 1:3 (kg:L)] realizado sem (RVI) e com controle na taxa de redução da pressão (RVI\_CP). \_\_\_\_\_ 104

Figura 4.2 – Curvas típicas da pressão na câmara durante o resfriamento a vácuo com as amostras imersas na água de cozimento [relação entre a massa de amostras e o volume de água de cozimento de 1:1 (kg:L)] realizado com ciclos de variação da pressão (vácuo-pressão atmosférica-vácuo). \_\_\_\_\_ 105

Figura 4.3 – Representação esquemática do dispositivo usado para o estudo da cinética de IV e do balanço de forças no sistema haste- porta amostra-amostra. \_\_\_\_\_ 111

Figura 4.4 – Comparação entre os perfis de temperatura das amostras e da água de cozimento durante a etapa de resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento realizados sem (RVI) e com (RVI\_CP) controle na taxa de redução da pressão na câmara. \_\_\_\_\_ 115

Figura 4.5 – Comparação entre os perfis de temperatura das amostras na seção de maior espessura durante a etapa de resfriamento dos processos CI-RVI 1:3; CI-RVI 1:1; CI-RVIP 1:1; CI-RV e CI,RC. \_\_\_\_\_ 117

Figura 4.6 – Comparação entre as curvas de pressão na câmara durante a etapa de resfriamento dos processos CI-RV; CI-RVI 1:3; CI-RVI 1:1 e CI-RVIP 1:1. \_\_\_\_\_ 119

Figura 4.7 – Ilustração das amostras de peito de frango cozidas e resfriadas a vácuo submetidas à impregnação com solução de azul de metileno 0,1 % em massa. (a) Impregnação a vácuo (IV) e (b) Impregnação à pressão atmosférica (IPatm). \_\_\_\_\_ 126

Figura 4.8 – Evolução temporal dos valores registrados pela célula de carga (razão entre a força resultante sobre o cesto perfurado e a aceleração da gravidade) e da pressão no sistema durante a impregnação a vácuo de filés de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo. \_\_\_\_\_ 129

Figura 5.1 – Interface do *software* de controle do equipamento de medição de impedância. \_\_\_\_\_ 136

Figura 5.2 – Ilustração de um eletrodo tipo agulha. _____	137
Figura 5.3 – Ilustração do eletrodo duplo utilizado para a medição da impedância em filés de peito de frango. _____	137
Figura 5.4 – Ilustração do equipamento utilizado para as medidas de impedância de filés de peito de frango cozidos a diferentes tempos e temperatura. _____	139
Figura 5.5 – Valores de impedância em função da frequência de filés de peito de frango cozidos por imersão a diferentes temperaturas. (a) Valores médios do módulo e (b) valores médios da fase. _____	142
Figura 5.6 – Valores médios dos módulos das impedâncias obtidos nas frequências de 10 kHz a 1 MHz para as amostras de peito de frango cozidas a diferentes temperaturas. _____	143
Figura 5.7 – Valores de temperatura final das amostras (na etapa de cozimento) em função do módulo da impedância em alta frequência. _____	144
Figura 5.8 – Ajuste obtido a partir da modelagem das temperaturas máximas atingidas pelos filés de peito de frango em função do espectro de impedância (módulo e fase) usando o método de regressão linear por PLS. _____	144
Figura 5.9 – Avaliação da capacidade de predição, usando o modelo obtido a partir da regressão linear por PLS, das temperaturas máximas atingidas pelos filés de peito de frango no cozimento. _____	145
Figura 5.10 – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango cozidos por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo e posteriormente resfriados até 10 °C. _____	146
Figura 5.11 – Valores de impedância em função da frequência obtidos a partir das amostras de peito de frango cozidas por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo. (a) Módulo e (b) Fase. _____	148
Figura 5.12 – Valores médios dos módulos das impedâncias obtidos nas frequências de 10 kHz a 1 MHz para as amostras de peito de frango cozidas por imersão a 80 °C por diferentes períodos de tempo. _____	149
Figura 5.13 – Ajuste obtido a partir da modelagem das temperaturas máximas atingidas pelos filés de peito de frango, no cozimento a 80 °C por diferentes períodos de tempo, em função do espectro de impedância usando o método de regressão linear por PLS. _____	150
Figura 5.14 – Avaliação da capacidade de predição, usando o modelo obtido a partir da regressão linear por PLS, das temperaturas máximas atingidas pelos filés de peito de frango durante o cozimento. _____	150

Figura 5.15 – Ajuste obtido a partir da modelagem do teor de umidade final dos filés de peito de frango em função do espectro de impedância usando o método de regressão linear por PLS. _____	151
Figura 5.16 – Avaliação da capacidade de predição, usando o modelo obtido a partir da regressão linear por PLS, do teor de umidade final dos filés de peito de frango submetidas ao cozimento. _____	151

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Propriedades do vapor de água a diferentes pressões. ____	26
Tabela 1.2 - Umidade, calor específico e decréscimo de temperatura por unidade de perda de massa percentual para água pura e alguns alimentos típicos. _____	27
Tabela 2.1 - Parâmetros avaliados para os diferentes processos integrados de cozimento e resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango. Valores médios $\pm$ Desvio Padrão. _____	63
Tabela 3.1 - Parâmetros avaliados para o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) e para o processo de cozimento seguido do resfriamento em câmara fria (CI,RC) com diferentes quantidades de filés de peito de frango (1, 2, 3 kg). Valores médios $\pm$ Desvio padrão. _____	87
Tabela 3.2 - Comparação entre os valores médios da perda de massa após o resfriamento a vácuo obtidos experimentalmente e os valores estimados através do algoritmo da Figura 3.5. Valores médios $\pm$ Desvio padrão. _____	92
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas de dureza (D), coesividade (C), elasticidade (E), gomosidade (G), mastigabilidade (M) e força máxima de corte ( $F_{m\acute{a}x}$ ) dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC. Valores médios $\pm$ Desvio padrão. _____	93
Tabela 3.4 - Coordenadas de cor dos filés de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC. Valores médios $\pm$ Desvio padrão. ____	94
Tabela 3.5 - Contagem total de mesófilos e psicrófilos nas amostras de filés de peito de frango <i>in natura</i> e submetidas aos processos CI-RV e CI,RC após o processamento (t=0) e após 5 e 10 dias de armazenamento a 10 °C (t=5 e t=10). _____	96
Tabela 4.1 - Parâmetros avaliados para os processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo com as amostras imersas na água de cozimento realizados sem (CI-RVI 1:3) e com controle inicial na taxa de redução da pressão (CI-RVI_CP 1:3). Valores médios $\pm$ Desvio Padrão. _____	116
Tabela 4.2 - Parâmetros avaliados para os processos CI-RVI (1:3 e 1:1), CI-RVIP, CI-RV e CI,RC realizados com filés de peito de frango. Valores médios $\pm$ Desvio Padrão. _____	121

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas de dureza (D), coesividade (C), elasticidade (E), gomosidade (G), mastigabilidade (M) e força máxima de corte ( $F_{máx}$ ) dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RVI; CI-RVIP; CI-RV e CI,RC. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão. \_\_\_\_\_ 122

Tabela 4.4 - Parâmetros avaliados para as amostras de filé de peito de frango submetidas aos processos CI-RV-IV (com pressões de 11, 130 e 270 mbar na etapa IV), CI-RV e CI,RC. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão. \_\_\_\_\_ 125

Tabela 4.5 - Propriedades mecânicas de dureza (D), coesividade (C), elasticidade (E), gomosidade (G), mastigabilidade (M) e força máxima de corte ( $F_{máx}$ ) dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV-IV (com pressões de 11, 130 e 270 mbar na etapa IV), CI-RV e CI,RC. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão. \_\_\_\_\_ 127

Tabela 4.6 - Comparação entre o ganho de massa calculado através da massa das amostras antes e após a etapa de IV ( $\Delta m_I$ ) e o ganho de massa calculado através dos valores registrados pela célula de carga no início e no final do processo ( $\Delta m_{IC}$ ). \_\_\_\_\_ 129

Tabela 5.1 - Parâmetros avaliados para os filés de peito de frango cozidos por imersão em água a diferentes temperaturas e posteriormente resfriados até 10 °C. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão. \_\_\_\_\_ 141

Tabela 5.2 – Parâmetros avaliados para os filés de peito de frango cozidos por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo e posteriormente resfriados até 10 °C. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão. \_\_\_\_\_ 146

## LISTA DE ABREVIATURAS

CV-RV	Processo integrado de cozimento por vapor seguido de resfriamento a vácuo
CI-RV	Processo integrado de cozimento por imersão seguido da drenagem da água de cozimento e resfriamento a vácuo
CI-RVI	Processo integrado de cozimento por imersão seguido de resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento
CI,RC	Processo de cozimento por imersão seguido de resfriamento em câmara fria
CI-RVI_CP	Processo integrado de cozimento por imersão seguido de resfriamento a vácuo do produto imerso na água de cozimento com controle na taxa de redução da pressão
CI-RVIP	Processo integrado de cozimento por imersão seguido de resfriamento a vácuo do produto imerso na água de cozimento com ciclos de variação da pressão
CI-RV-IPatm	Processo integrado de cozimento por imersão seguido de resfriamento a vácuo e posterior impregnação à pressão atmosférica
CI-RV-IV	Processo integrado de cozimento por imersão seguido de resfriamento a vácuo e posterior impregnação a vácuo
IV <sub>11</sub>	Etapa de impregnação a vácuo com P <sub>1</sub> =11 mbar
IV <sub>130</sub>	Etapa de impregnação a vácuo com P <sub>1</sub> =130 mbar
IV <sub>270</sub>	Etapa de impregnação a vácuo com P <sub>1</sub> =270 mbar
RVI 1:1	Resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento [relação entre a massa inicial das amostras e o volume de água de cozimento igual a 1:1 (kg:L)]
RVI 1:3	Resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento [relação entre a massa inicial das amostras e o volume de água de cozimento igual a 1:3 (kg:L)]
RVIP 1:1	Resfriamento a vácuo do produto imerso na água de cozimento com ciclos de variação da pressão [relação entre a massa inicial das amostras e o volume de água de cozimento igual a 1:1 (kg:L)]
T <sub>1</sub>	Temperatura na metade da seção de maior espessura do filé de peito de frango

$T_2$	Temperatura na metade da seção de espessura intermediária do filé de peito de frango
$T_3$	Temperatura na metade da seção de menor espessura do filé de peito de frango
$\eta_T$	Variação média de temperatura por percentual de perda de massa
CRA	Capacidade de retenção de água
PLS	Método de regressão por mínimos quadrados parciais ( <i>Partial Least Squares</i> )

## INTRODUÇÃO

## *INTRODUÇÃO*

O processamento térmico ainda é o método mais utilizado para garantir a segurança microbiológica de produtos cárneos, mesmo considerando que novas tecnologias não-térmicas (irradiação, aplicação de campos elétricos de alta intensidade, tratamento a alta pressão) estejam encontrando nichos específicos de aplicação na indústria de alimentos. Os benefícios associados ao tratamento térmico, como o cozimento, vão além da redução da contaminação microbiológica inicial e da extensão da vida útil do produto, incluindo também o desenvolvimento de características sensoriais desejáveis relacionadas com sabor, cor e textura. Tais benefícios, aliados à crescente demanda do consumidor por produtos de conveniência que requeiram uma quantidade mínima de preparação, têm impulsionado o desenvolvimento de uma gama variada de produtos com alto valor agregado, que utilizam cortes de carne cozidos em sua composição. Como exemplo, os cortes de peito de frango cozidos são comumente utilizados em recheios, coberturas para pizzas ou mesmo como ingrediente principal de refeições semi-prontas para o consumo.

Após o processo de cozimento, o manuseio adequado e o rápido resfriamento dos cortes de carne são essenciais para garantir a qualidade microbiológica dos mesmos. Com isso, busca-se reduzir o crescimento microbiano da flora nativa e contaminante, incluindo os microorganismos deteriorantes e patogênicos (DESMOND et al., 2000; MCDONALD, SUN e KENNY, 2000; SUN e WANG, 2000). Neste contexto, normas cada vez mais estritas estão sendo adotadas por países europeus e norte americanos no que diz respeito ao tempo de resfriamento de carnes após o processo de cozimento (MCDONALD e SUN, 2000; ZHENG e SUN, 2004; DRUMMOND et al., 2009). Assim,

o desenvolvimento de novas estratégias operacionais visando obter produtos com menor manipulação e resfriados em menor tempo é de grande importância para a indústria. Cabe mencionar que esse tema é pouco estudado no Brasil, conforme pôde ser verificado através de uma revisão sobre o assunto, e que a legislação brasileira ainda não é específica com relação ao tempo de resfriamento de produtos cárneos após o cozimento.

Entre as técnicas tradicionais de resfriamento utilizadas para cortes de carne e produtos cárneos cozidos encontram-se o resfriamento em câmara fria, por ar forçado e o resfriamento por imersão em água (DESMOND et al., 2000; MCDONALD, SUN e KENNY, 2000; SUN e WANG, 2000). Dentre as novas tecnologias, diversos estudos têm demonstrado que o resfriamento a vácuo pode aumentar consideravelmente a taxa de resfriamento de cortes de carne em comparação com os métodos tradicionais citados anteriormente (BURFOOT et al., 1990; MCDONALD, SUN e KENNY, 2000; DESMOND et al., 2000; DRUMMOND e SUN, 2008; DRUMMOND et al., 2009).

O resfriamento a vácuo é obtido pela evaporação de parte da água do produto (na superfície e no interior dos poros) quando este é submetido a uma baixa pressão em uma câmara de vácuo (MCDONALD e SUN, 2000). Esse método é utilizado comercialmente nos Estados Unidos e em alguns países europeus para o pré-resfriamento de alfaces e outros produtos agrícolas, com o objetivo de remover rapidamente o “calor do campo” e prolongar a vida útil do produto.

Os primeiros estudos que avaliaram a possibilidade da utilização do resfriamento a vácuo para cortes de carnes e produtos cárneos cozidos são do início da década de 90 e essa aplicação ganhou relevância a partir dos trabalhos desenvolvidos por um grupo de pesquisa da Universidade Nacional da Irlanda, em Dublin. Tal grupo apresenta diversos estudos nos quais avaliam tanto as características do processo quanto a qualidade final de cortes de carne bovina, suína e peças de presunto submetidos ao resfriamento a vácuo. No Brasil, dois grupos de pesquisa têm realizado trabalhos na área de resfriamento a vácuo de alimentos, na Universidade Estadual de Campinas (FEA/UNICAMP) com a aplicação da técnica para vegetais folhosos e na Universidade Federal de Santa Catarina (PROFI/EQA/UFSC) para o resfriamento de cogumelos, vegetais cozidos, mariscos e cortes de carnes cozidos.

Uma característica importante do processo de resfriamento a vácuo é a possibilidade da sua integração com o processo de cozimento

em um mesmo equipamento. Assim, evita-se a manipulação excessiva do produto e o uso de água para o resfriamento. O desenvolvimento de um dispositivo que permita tal integração para o processamento de cortes de peito de frango é o objetivo central deste trabalho.

A principal desvantagem do resfriamento a vácuo frente aos métodos tradicionais é a excessiva perda de massa, uma vez que o resfriamento é alcançado através da evaporação da água do próprio produto. Desta forma, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de reduzir essa perda de massa, fator que pode comprometer a qualidade sensorial do produto obtido. Estudos recentes têm demonstrado que o resfriamento a vácuo realizado com peças de presunto e cortes de carne bovina imersos na solução de cozimento pode reduzir significativamente a perda de massa associada ao processo, além de proporcionar um incremento nos parâmetros de qualidade do produto resfriado (HOUSKA et al., 2003; HOUSKA et al., 2005; CHENG e SUN, 2006a, 2006b, 2006c; DRUMMOND e SUN., 2008; DRUMMOND et al., 2009). No entanto, dentre os trabalhos que avaliaram essa técnica, poucos se dedicaram à análise dos fenômenos responsáveis por tal redução na perda de massa, a qual pode ser explicada pela impregnação dos poros da carne com a solução de cozimento ao final do processo (devido aos gradientes de pressão que surgem com restabelecimento da pressão atmosférica). A partir dessa constatação, além da avaliação do método de resfriamento a vácuo dos filés de peito de frango imersos na água de cozimento, uma nova abordagem que adiciona uma etapa de impregnação a vácuo após o resfriamento a vácuo convencional (sem imersão) é proposta neste trabalho.

O processo de impregnação a vácuo (IV) de alimentos porosos consiste na troca do gás e do líquido nativo aprisionados dentro dos poros por um líquido externo. Isso se faz pela ação de gradientes macroscópicos de pressão promovidos pela aplicação de vácuo e posterior restabelecimento da pressão atmosférica em uma câmara contendo o produto imerso em uma solução (FITO, 1994; FITO e PASTOR, 1994; FITO et al., 1996). Desta forma, além de compensar parte da perda de massa inerente ao resfriamento a vácuo, o uso da IV pode possibilitar a impregnação de um soluto ou um fluido de interesse diretamente na estrutura porosa do produto resfriado a vácuo.

Outro aspecto fundamental a ser considerado na industrialização de produtos cárneos é a obtenção de informações confiáveis relativas às características do produto durante o processo de produção, de forma a garantir a qualidade do produto para o consumidor (DAMEZ e

CLERJON, 2008). Desta forma, novas técnicas, rápidas, precisas e não-invasivas para predição de parâmetros de qualidade são desejáveis. Neste contexto, o uso de sensores eletrônicos como as línguas eletrônicas ou sistemas baseados na espectroscopia de impedância tem sido apontado como uma alternativa aos métodos convencionais de análises de alimentos, devido à alta sensibilidade e resposta rápida que esses sistemas proporcionam (MASOT, 2010). A espectroscopia de impedância permite analisar as propriedades de um material ou produto através da aplicação de sinais elétricos de baixa intensidade com diferentes frequências e da medição dos sinais elétricos de saída correspondentes. A partir da relação entre os sinais de entrada e saída, medidas de impedância elétrica são obtidas para cada uma das frequências analisadas. Utilizando tais medidas em conjunto com um método de análise multivariante, torna-se possível estabelecer uma relação entre os valores de impedância e os parâmetros de interesse (propriedades sensoriais e físico-químicas do produto, por exemplo), resultando em um modelo estatístico para a predição das propriedades de novas amostras. Essa técnica tem sido utilizada com objetivos diversos na indústria de carnes, como, por exemplo, para prever o estado de maturação de carne bovina (DAMEZ et al., 2007, 2008), os teores de água e gordura durante o processamento de carne de porco picada enlatada (CHANET, RIVIÈRE e EYNARD, 1999), alguns parâmetros sensoriais de presuntos curados a partir das medidas de impedância realizadas na carne *in natura* (OLIVIER et al., 2001; GUERRERO et al., 2004) e a concentração de sal em carne picada (MASOT et al., 2010). Neste trabalho, foi avaliada a perspectiva do uso da espectroscopia de impedância para a predição de parâmetros de interesse após o processo de cozimento e resfriamento de cortes de peito de frango como, por exemplo, a temperatura atingida durante a etapa de cozimento (parâmetro de extrema importância na qualidade microbiológica do produto).

#### **OBJETIVOS DO TRABALHO**

O objetivo central deste trabalho foi desenvolver e avaliar um processo integrado de cozimento e resfriamento a vácuo aplicado a cortes de peito de frango, reduzindo o tempo de processo e a manipulação excessiva do produto.

Os objetivos específicos foram:

- Desenvolver um dispositivo experimental que permita a integração dos processos de cozimento e resfriamento a vácuo em um mesmo recipiente;
- Comparar o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo com o processo de cozimento seguido do método tradicional de resfriamento em câmara fria, em relação à taxa de resfriamento, à perda de massa e às propriedades físicas, mecânicas e microbiológicas dos produtos obtidos;
- Avaliar alternativas de processamento que visem a redução da perda de massa durante a etapa de resfriamento a vácuo;
- Avaliar a integração dos processos de cozimento, resfriamento a vácuo e impregnação a vácuo em um mesmo recipiente no processamento de cortes de peito de frango;
- Investigar a possível relação entre medidas de espectroscopia de impedância realizadas em peito de frango cozidos e resfriados e parâmetros de interesse como, por exemplo, a temperatura máxima atingida pelas amostras durante o cozimento e o teor de umidade final das amostras [etapa realizada na Universidade Politécnica de Valência (UPV) – Espanha].

#### **ESTRUTURA DO TRABALHO**

Para estruturar os conteúdos e apresentar os temas tratados em uma sequência lógica, este trabalho foi estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 - *Revisão da Literatura*. Neste capítulo é apresentado o *Estado da Arte* que sustenta este trabalho, abordando os diversos aspectos referentes à matéria prima utilizada (carne de frango), ao processo de cozimento de carnes, ao resfriamento a vácuo, à impregnação a vácuo de alimentos e, por último, uma visão rápida da espectroscopia de impedância como técnica de medida empregada na análise do processo de cozimento.

Capítulo 2 - *Desenvolvimento do Dispositivo Experimental para a Integração dos Processos de Cozimento e Resfriamento a Vácuo*. Neste capítulo é descrito o dispositivo experimental desenvolvido neste trabalho e são apresentados os resultados preliminares obtidos a partir da avaliação de diferentes processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo aplicado a cortes de peito de frango, avaliados em



relação à taxa de resfriamento, à perda de massa em cada etapa do processo e às propriedades mecânicas dos produtos obtidos.

Capítulo 3 - *Comparação entre os Métodos de Resfriamento a Vácuo e em Câmara Fria*. Neste capítulo, uma comparação entre as taxas de resfriamento de filés de peito de frango cozidos obtidas através dos dois métodos considerados é apresentada. Adicionalmente, foram avaliadas a perda de massa no resfriamento e as propriedades físicas e mecânicas dos produtos obtidos.

Capítulo 4 - *Alternativas de Processamento Visando a Redução da Perda de Massa Durante o Resfriamento a Vácuo*. Neste capítulo, um estudo detalhado do processo integrado de cozimento seguido do resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento é apresentado. Além disso, os resultados obtidos com a integração dos processos de cozimento, resfriamento a vácuo e impregnação a vácuo, como uma segunda alternativa para compensar parte da perda de água decorrente da evaporação durante a etapa de resfriamento a vácuo, são avaliados.

Capítulo 5 - *Uso da Espectroscopia de Impedância para Análise do Processo de Cozimento de Cortes de Peito de Frango*. Neste capítulo são apresentados os resultados das medidas de espectroscopia de impedância realizadas em filés de peito de frango cozidos e resfriados, bem como as relações identificadas entre essas medidas e a temperatura máxima atingida pelas amostras durante o cozimento e o teor de umidade final das mesmas.

Capítulo 6 - *Conclusões Finais e Propostas para Trabalhos Futuros*.

## CAPÍTULO 1

### ***REVISÃO DA LITERATURA***

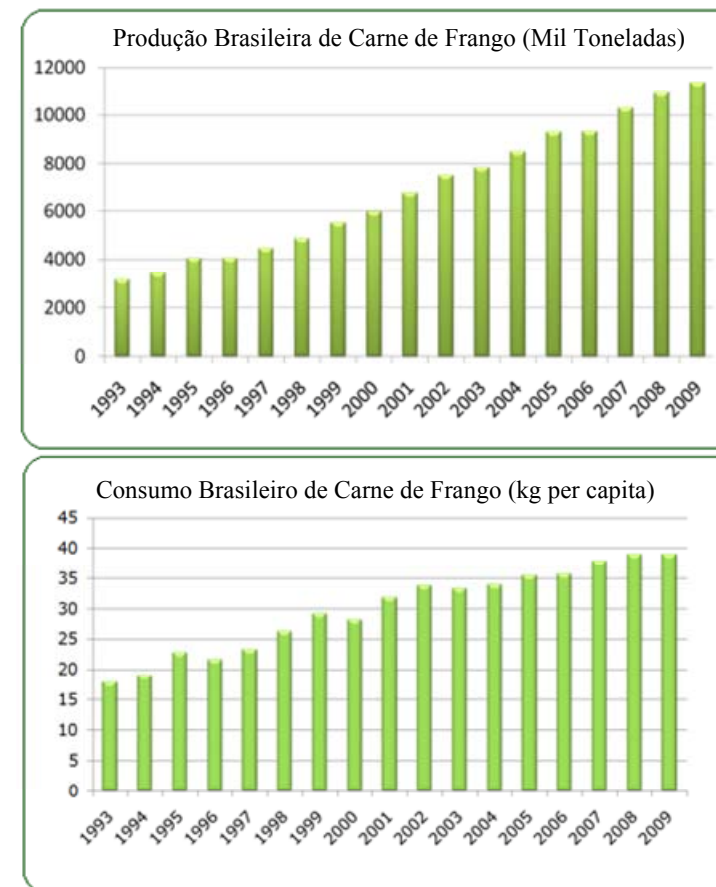
Este capítulo foi dividido em tópicos. Nos primeiros tópicos, apresenta-se uma revisão sobre a carne de frango (matéria-prima utilizada neste trabalho), assim como a estrutura do músculo, as modificações *post mortem* e as propriedades funcionais da carne. O terceiro tópico aborda as características do processo de cozimento de carnes, as modificações do tratamento térmico na textura e a microbiologia do produto cozido. No quarto tópico é apresentada uma revisão do processo de resfriamento a vácuo e suas aplicações. No quinto tópico, apresenta-se a técnica de impregnação a vácuo utilizada com o intuito de compensar parte da perda de água decorrente da evaporação durante o resfriamento a vácuo. Finalizando este capítulo, a espectroscopia de impedância é apresentada com perspectivas de uso para a avaliação de parâmetros do processo de cozimento de cortes de peito de frango.

### 1.1. CARNE DE FRANGO

O consumo de carne de frango tem aumentado notoriamente em todo o mundo em virtude da imagem saudável do produto, associada ao seu baixo teor de gordura e alto teor de proteínas, da disponibilidade crescente de produtos processados e do seu baixo preço (ABEF, 2008). Como pode ser observado na Figura 1.1, em 2009 a produção brasileira atingiu a marca histórica de 10,9 milhões de toneladas de carne de frango. Desse total, 67 % permaneceram no mercado interno e 33 % foram destinados à exportação (UBABEF, 2010). Atualmente, o consumo *per capita* de carne de frango no Brasil é de aproximadamente 39 kg por ano.

O Brasil ocupa uma posição de destaque no mercado internacional de carne de frango, mantendo-se desde 2004 como o maior exportador e o 3º maior produtor mundial, superado somente pelos Estados Unidos e China. Segundo a União Brasileira de Avicultura (UBABEF), em 2009 as exportações atingiram 3,63 milhões de toneladas de carne de frango *in natura* e de produtos processados de frango, gerando uma receita de US\$ 5,8 bilhões. Ainda em 2009, Santa Catarina destacou-se como o principal estado exportador, com uma participação de 27,1 % nas exportações brasileiras seguido pelos estados do Paraná (26,3 %) e Rio Grande do Sul (22,1 %) (UBABEF, 2010).

Um dos fatores que tem contribuído para o constante crescimento do consumo e das exportações de carne de frango é o aumento da comercialização de cortes e na forma de produtos industrializados (MOREIRA, 2005). Neste contexto, as indústrias de carnes passaram a aumentar a diversidade de seus produtos processados, produtos estes que possuem um maior valor agregado. Filés marinados, produtos empanados e produtos completamente cozidos destacam-se como exemplos (MOREIRA, 2005). Assim, o desenvolvimento de tecnologias para a elaboração com maior diversificação, eficiência, qualidade e menores custos são de grande importância para a indústria processadora de carne de frango e para a indústria que utiliza essa matéria-prima na composição de seus produtos industrializados.



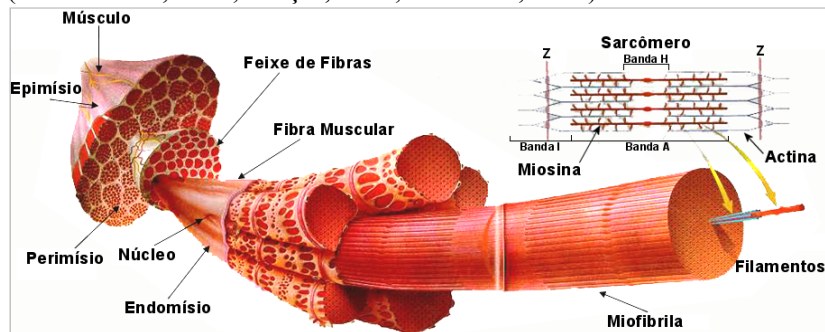
**Figura 1.1** – Produção e consumo brasileiro anual de carne de frango (Fonte: UBABEF, 2010).

### 1.2. ESTRUTURA E PROPRIEDADES FUNCIONAIS DA CARNE

Sob o ponto de vista tecnológico e para o estudo dos processos de cozimento e resfriamento a vácuo de filés de peito de frango (foco principal deste trabalho de pesquisa), é importante conhecer a estrutura do músculo, as mudanças que acontecem nas proteínas que o constituem e suas propriedades funcionais importantes como a capacidade de retenção de água. Sendo assim, esses aspectos, comuns aos diversos tipos de carnes, serão descritos brevemente a seguir.

### 1.2.1. Estrutura do músculo

A representação esquemática da estrutura muscular pode ser observada na Figura 1.2. Circundando o músculo como um todo, existe uma bainha de tecido conjuntivo conhecido como epimísio, de cuja superfície interna partem septos de tecido conjuntivo para dentro do músculo, separando as fibras musculares em feixes. Esses septos constituem o perimísio, que contém os vasos sanguíneos e os nervos. A partir do perimísio forma-se uma fina rede de tecido conjuntivo que envolve cada fibra muscular individualmente, denominada de endomísio (PARDI et al., 1995; ROÇA, 2000; LAWRIE, 2005).



**Figura 1.2** – Representação esquemática da estrutura muscular (Fonte: Animal Science Computer Labs, disponível em: <http://www.anslab.iastate.edu>).

A fibra muscular é a unidade fundamental na estrutura do músculo e constitui de 75 a 92 % do volume muscular total, sendo o restante preenchido por tecido conjuntivo, vasos sanguíneos e líquido extracelular. Ao redor de cada fibra e abaixo do tecido conjuntivo do endomísio encontra-se uma membrana celular dupla, denominada de sarcolema. Os núcleos da célula muscular são encontrados, geralmente, logo abaixo do sarcolema. Cada fibra individualmente é composta de um número de unidades menores, as miofibrilas. Estas últimas são banhadas pelo sarcoplasma (líquido intracelular) e se estendem pelo comprimento total da fibra muscular. Por sua vez, cada miofibrila é composta por um arranjo de filamentos, comumente denominados de filamentos grossos e finos, os quais constituem em moléculas de proteína contráctil: miosina e actina, respectivamente. Cada filamento de miosina é cercado de seis filamentos de actina em um arranjo hexagonal

(LAWRIE, 2005). Como resultado da disposição desses filamentos, denomina-se de banda I, aquela que é formada por filamentos finos não invadidos por filamentos grossos. A banda A é formada principalmente por filamentos grossos, e a banda H somente pelos filamentos grossos. No centro de cada banda I aparece uma linha transversal escura - a linha Z (detalhe na Figura 1.2). A unidade funcional denominada sarcômero, onde ocorrem os eventos de contração e relaxamento muscular, é representada pela porção da miofibrila compreendida entre duas linhas Z adjacentes.

As proteínas do músculo podem ser divididas, de um modo geral, naquelas que são solúveis em água ou em soluções salinas diluídas (proteínas sarcoplasmáticas), aquelas que são solúveis em soluções salinas concentradas (proteínas miofibrilares) e aquelas que são insolúveis em soluções salinas concentradas, pelo menos a baixa temperatura (proteínas do tecido conjuntivo) (LAWRIE, 2005).

As proteínas sarcoplasmáticas representam uma mistura complexa de cerca de 50 componentes, muitos dos quais são enzimas do ciclo glicolítico. A miosina é a mais abundante das proteínas miofibrilares. Devido ao alto conteúdo em ácido glutâmico, ácido aspártico e aminoácidos dibásicos, a miosina é uma proteína altamente carregada. A outra proteína principal da miofibrila é a actina. Esta pode existir sob duas formas, a actina G, que consiste em unidades globulares relativamente pequenas e a actina F, na qual estas unidades globulares estão agregadas pela extremidade para formar uma cadeia dupla. A actina G polimeriza-se em actina F na presença de sais e de pequenas quantidades de ATP. É a actina F que se combina com a miosina para formar a actomiosina contráctil no músculo ativo ou em pré-rigor e a actomiosina inextensível no músculo em *rigor mortis*. Outras proteínas miofibrilares como a tropomiosina, diversas troponinas,  $\alpha$  e  $\beta$ -actinina estão localizadas ao longo da hélice da actina F. Dentre as proteínas do tecido conjuntivo destacam-se em maior proporção o colágeno e a elastina, sendo que o colágeno tem influência significativa na tenderização da carne (LAWRIE, 2005).

### 1.2.2. Modificações bioquímicas e estruturais durante a transformação do músculo em carne

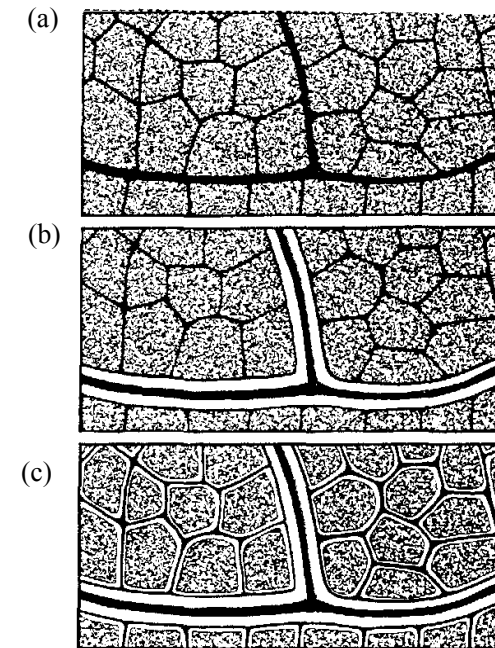
Após a morte do animal, há a interrupção do fluxo sanguíneo e, com isso, é interrompido também o aporte de nutrientes e a excreção de metabólitos. O tecido muscular continua exercendo suas funções

metabólicas, provavelmente na tentativa de manter sua homeostase. Os processos bioquímicos do músculo após o abate são principalmente processos de degradação e ressíntese de ATP. Com a interrupção do aporte de oxigênio, a síntese de ATP se realiza exclusivamente por via anaeróbica. Nessas condições, o ácido pirúvico é reduzido a ácido láctico ao invés de ser metabolizado a acetil coenzima A e entrar na cadeia respiratória como acontece por via aeróbica. Como não há mais fluxo sanguíneo, o ácido láctico produzido se acumula no músculo e consequentemente há um declínio do pH no músculo *post mortem*, essencialmente ligado à quantidade de glicogênio presente no músculo no momento da morte do animal.

À medida que a glicólise *post mortem* ocorre, o músculo torna-se inextensível. Esse é o endurecimento conhecido como *rigor mortis* (LAWRIE, 2005). O fenômeno do *rigor mortis* está relacionado com o desaparecimento do ATP no músculo que, na ausência de ATP, a actina e a miosina se combinam para formar cadeias rígidas de actomiosina.

Currie e Wolf (1980) apud Le Meste Lorient e Simatos (2002) relataram, que durante a instalação do *rigor mortis* no músculo, ocorrem modificações do espaço extracelular (que dependem da velocidade de redução do pH) e diminuição do diâmetro das fibras. Esses autores sugerem que essas modificações ocorrem devido ao rápido aumento da pressão osmótica após a migração de íons para o espaço extracelular. Por outro lado, Honikel et al. (1986) sugerem que esse aumento da pressão osmótica ocorra provavelmente devido ao acúmulo de pequenas moléculas (lactato, fosfato inorgânico) resultantes do metabolismo *post mortem*.

Offer e Cousin (1992) observaram as mudanças estruturais que ocorrem no músculo bovino (*Sterno mandibularis*) a 10°C, após a morte do animal. Essas mudanças estão ilustradas na Figura 1.3.



**Figura 1.3** – Mudanças estruturais que ocorrem no músculo de bovino após a morte do animal (a) Músculo vivo ou imediatamente após o abate; (b) Músculo de 4 a 6 horas *post mortem*; (c) Músculo em estado de *rigor mortis* (OFFER e COUSIN, 1992).

Duas horas *post mortem* (Figura 1.3a) as fibras musculares, como no músculo “vivo”, preenchem completamente a rede endomísia e os feixes de fibras (rede perimisial). Entre 4 e 6 horas *post mortem* (Figura 1.3b), espaços de aproximadamente 20-50µm aparecem entre os feixes de fibras e o perimísio, devido ao afastamento dos feixes de fibras uns dos outros. Após 24 horas da morte do animal (Figura 1.3c), os espaços entre os feixes de fibras continuam presentes, mas pode-se observar também a existência de espaços entre as fibras (OFFER e COUSIN, 1992). Segundo esses autores, existem dois tipos de espaços extracelulares 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.

A velocidade de instalação do *rigor mortis* varia entre as espécies, o tipo de músculo, o estresse *ante mortem*, a temperatura, o teor de glicogênio e o pH muscular no momento do sacrifício do animal.

Em carne de aves, este processo é relativamente rápido. Os músculos do peito de frango podem entrar em *rigor mortis* uma hora após o abate (WARRISS, 2003; OLIVO et al., 2001).

Depois de certo período de tempo, o qual varia com a temperatura e entre as espécies, inicia-se a resolução do *rigor mortis*, conhecido como o processo de maturação (amaciamento) da carne. Esse processo resulta da atividade de enzimas proteolíticas presentes no músculo, levando a fragmentação e ao enfraquecimento da miofibrila, com o consequente amaciamento da carne. As principais enzimas proteolíticas responsáveis pela degradação das proteínas miofibrilares são as calpaínas ( $\mu$ -calpaína e m-calpaína) e as proteases lisossômicas como as catepsinas D, B,H e L (SHIMOKOMAKI et al., 2006).

### 1.2.3. Capacidade de retenção de água da carne e a relação com anomalias PSE e DFD

A capacidade de retenção de água (CRA) é considerada um atributo de grande importância, por afetar a aparência da carne antes do cozimento, seu comportamento durante o cozimento e a suculência durante a mastigação (LAWRIE, 2005). A CRA é definida como a capacidade da carne em reter sua umidade ou a água contida dentro de sua estrutura (LAWRIE, 2005; OLIVO e SHIMOKOMAKI, 2006)

A maior parte de água no músculo está presente nas miofibrilas, nos espaços entre os filamentos grossos de miosina e os filamentos finos de actina/tropomiosina. Foi observado que o espaço interfilamento varia entre 320 Å a 570 Å em relação ao pH, comprimento do sarcômero, força iônica, pressão osmótica e se o músculo está em pré ou *post rigor* (OFFER e TRINICK, 1983). Isso corresponde a uma mudança de volume três vezes maior no conteúdo de água no espaço interfilamento em relação ao que pode ser atribuído à capacidade das proteínas em se ligarem à água. De fato, Hamm (1960) apud Lawrie (2005) destacou que não mais que 5 % do total de água no músculo está diretamente ligada aos grupos hidrofílicos das proteínas. A liberação gradual da água pela carne mediante a aplicação de diferentes temperaturas indicou que a água é ligada pelas proteínas em diferentes camadas. A complexidade do sistema também foi demonstrada por estudos com ressonância magnética nuclear (RMN). A água existe em pelo menos dois compartimentos no músculo e, em cada um deles, uma proporção está “ligada” ou “livre”. Durante o início do *rigor mortis*, existe pouca mudança na água “ligada”, mas a proporção da conhecida água “livre”

na região extracelular aumenta à custa da água intracelular “livre” (LAWRIE, 2005).

Offer e Trinick (1983) apresentaram evidências em suporte à sua visão de que a maior parte da água no músculo é mantida por forças capilares entre os filamentos grossos e finos. A baixa importância da ligação da água à superfície das proteínas foi demonstrada pelo fato de que a máxima retenção de água pelas miofibrilas ocorreu sob condições em que uma quantidade considerável da banda A foi solubilizada.

Após a morte do animal é inevitável uma redução na capacidade de retenção de água. As proteínas sarcoplasmáticas, às quais se deve alguma parte da capacidade de retenção de água, são especialmente afetadas pela queda *post mortem* do pH. Além disso, o esgotamento do ATP e a consequente formação da actomiosina à medida que os músculos entram em *rigor mortis* causam a redução na capacidade de retenção de água em qualquer valor de pH. Isso ocorre, pois a capacidade de retenção de água da actomiosina é menor do que as da actina e da miosina, das quais ela se origina (MILMMAN, 1981 apud LAWRIE, 2005), e também porque o nível mais baixo de ATP inicia a desnaturação das proteínas cuja sua integridade, *in vivo*, é particularmente dependente da provisão de energia (LAWRIE, 2005).

A velocidade de queda do pH *post mortem* também é um importante determinante da capacidade de retenção de água do músculo. Conforme apresentado anteriormente, durante o estabelecimento do *rigor mortis* ocorre a redução do pH devido à glicólise anaeróbia com a produção de ácido láctico. O teor de glicogênio presente no músculo, no momento da morte do animal, irá determinar a velocidade de instalação do *rigor mortis* e o pH final da carne (medido 24 horas *post mortem*).

A queda brusca do pH imediatamente após o abate, gera pH muscular ácido quando a temperatura corporal ainda está elevada. Isso provoca a desnaturação das proteínas musculares, reduzindo a sua capacidade de retenção de água, conferindo, assim, pobres características de processamento, com redução dos rendimentos dos produtos e consequentes perdas econômicas (OLIVO e SHIMOKOMAKI, 2006). Esse fenômeno está associado, principalmente, a fatores de estresse *ante mortem* e é conhecido por provocar a ocorrência de carnes com a aparência pálida, mole e exudativa - chamada carne PSE (termo originário das iniciais das palavras da língua inglesa *pale*, *soft* e *exudative*). O pH indicativo de carne PSE é de 5,7 no tempo *post mortem* de 45 minutos para suínos e de 15 minutos para aves (OLIVO e SHIMOKOMAKI, 2006). A palidez da carne está diretamente associada com a desnaturação protéica

causada pelo baixo pH. A cor observada na superfície das carnes é o resultado da absorção seletiva da mioglobina, provocada pela distribuição da luz que emerge da carne. Com a diminuição do pH, ocorre um aumento da birrefringência com menos luz sendo transmitida através das fibras e mais luz sendo dispersa (OLIVO e SHIMOKOMAKI, 2006).

Em suínos, a carne PSE tem sido estudada há cinco décadas, enquanto que em aves a preocupação com o PSE ganhou relevância somente na década de 90, justificada pelo aumento da produção de industrializados de aves (BARBUT, 1998; OLIVO e SHIMOKOMAKI, 2002, BARBUT et al., 2008). Neste contexto, diversas pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de elucidar os mecanismos fisiológicos, bioquímicos e genéticos envolvidos na ocorrência dessa anomalia em aves e de como controlá-los (BARBUT 1998; OLIVO e SHIMOKOMAKI, 2006; OLIVO et al., 2001; SOARES et al., 2003; GUARNIERI et al., 2004).

Por outro lado, o declínio lento do pH durante o estabelecimento do *rigor mortis* pode implicar carnes com a aparência seca, firme e escura, chamada carne DFD (do inglês *dry, firm e dark*). Esse fenômeno é verificado em animais que tenham sofrido estresse prolongado, como a exaustão durante o transporte, a falta de alimentação (dieta hídrica prolongada), comportamento agressivo ou medo, apresentando maior depleção do glicogênio. A falta de glicogênio, no momento da morte do animal, impedirá a formação quantitativa proporcional de ácido láctico. Deste modo, o declínio do pH e a velocidade do *rigor mortis* ocorrem de forma mais lenta que o normal implicando um valor de pH final alto, em geral, maior do que 6,2 (LAWRIE, 2005). Devido a este valor elevado de pH, a desnaturação das proteínas é relativamente pequena e a carne DFD apresenta uma estrutura fechada e translúcida, absorvendo mais luz que o normal e apresentando, como consequência, uma aparência mais escura. A característica firme desse tipo de carne deve-se ao intumescimento das fibras pelos fluidos sarcoplasmáticos, enquanto que a característica seca deve-se à forte união da água às proteínas não a deixando fluir para a superfície. No entanto, o aspecto seco da carne DFD é uma impressão enganosa, uma vez que esse tipo de carne apresenta maior conteúdo de umidade que o normal (OLIVO, 2006). As carnes de peito de frango que apresentam características DFD tendem a possuir melhores qualidades funcionais, com melhor capacidade de absorção e retenção de água e menores perdas durante o cozimento, quando comparadas com carnes normais e do tipo PSE (SCHNEIDER et

al., 2006). No entanto, as carnes DFD são mais suscetíveis à ação microbiana devido ao seu elevado pH (OLIVO, 2006).

De acordo com Olivo e Shimokomaki (2006), as principais características para predizer a qualidade funcional da carne de ave em uma linha de produção são as análises de cor e pH por se tratarem de técnicas rápidas e não destrutivas. É de consenso que amostras de peito de frango com valor de  $L^*$  (luminosidade) maior do que 53 (sistema de análise de cor objetiva CIE  $L^* a^* b^*$ ) são cortes tipicamente PSE.

#### **1.2.4. Fatores que minimizam a exsudação durante o processamento de carnes**

Processos como a injeção de salmoura ou a imersão de cortes de carnes em soluções pouco concentradas de sais podem aumentar consideravelmente a capacidade de retenção de água pelo músculo (SCHMIDT, CARCIOFI e LAURINDO, 2008a) e reduzir as perdas de água durante o cozimento (VOLPATO et al., 2008).

Offer e Trinick (1983), em um estudo detalhado das miofibrilas isoladas de coelhos quando imersas em soluções salinas, reportaram que o diâmetro e a estrutura das mesmas mudaram pouco quando irrigadas com soluções de NaCl de 0,1M (0,55 % em massa) até 0,5 M (2,8 % em massa). No entanto, a 0,6M (3,3 % em massa) as miofibrilas incharam consideravelmente e o centro da banda A foi parcialmente solubilizado. O inchamento máximo ocorreu na faixa de 0,8M (4,4 % em massa) a 1M (5,5 % em massa), onde quase toda banda A foi solubilizada. Para concentrações maiores de NaCl o volume do músculo tende a diminuir.

As mudanças na estrutura das miofibrilas podem ser explicadas pelo efeito do NaCl na interação entre a miosina e a actina. O papel dos íons  $Cl^-$  na variação do volume foi estudado por Hamm (1960) apud Le Meste, Lorient e Simatos (2002). Usando soluções de acetato de sódio e cloreto de sódio, esse autor mostrou que somente soluções de NaCl promovem aumento da retenção de água pelo tecido muscular. Offer e Trinick (1983) sugeriram que uma parte dos íons cloretos se liga aos filamentos de actina e miosina, aumentando as cargas negativas destes últimos. Isso provoca o aumento das forças de repulsão entre esses filamentos e induzem um inchamento da miofibrila, provocando uma maior captação de água. No entanto, concentrações elevadas de sal levam à despolimerização dos filamentos grossos de miosina. A dissolução desses filamentos diminui a carga total e leva à diminuição das forças de repulsão eletrostática entre eles. Nessas condições, ocorre uma retração do volume e a consequente perda de água. A microscopia

eletrônica de varredura (MEV) permite a visualização do inchamento/retração das miofibrilas em função da concentração de NaCl na solução (OFFER e TRINICK, 1983).

### **1.3. PROCESSO DE COZIMENTO DE CARNES**

O tratamento térmico de carnes e produtos cárneos, como o cozimento, constitui-se no método mais apropriado para melhorar as características sensoriais, para reduzir a contaminação microbiológica inicial e para prolongar a vida útil do produto. Durante o cozimento, a redução da população contaminante depende da magnitude do tempo e da temperatura utilizados no processo de cocção. Geralmente, quando o objetivo principal é desenvolver características sensoriais específicas (cor, sabor, textura), a temperatura utilizada é inferior a 100 °C e o cozimento equivale a um tratamento térmico brando, como na pasteurização. Deste modo, o produto não é esterilizado e o efeito do calor permite apenas o prolongamento da sua vida útil. Após o cozimento, o manuseio adequado e o rápido resfriamento são essenciais na prevenção da recontaminação e para retardar o crescimento de micro-organismos sobreviventes no produto (ROÇA, 2000).

Os processos de transferência de calor e massa durante o cozimento de carnes e produtos cárneos são fenômenos bastante complexos. Nesses produtos, modificações como o derretimento da gordura, a desnaturação protéica e a diminuição da capacidade de retenção de água alteram suas propriedades térmicas, físicas e sensoriais (LAWRIE, 2005). As mudanças mais significativas, como a perda de massa e o encolhimento, são causados pela desnaturação das proteínas musculares, a qual é definida como a mudança na conformação que ocorre nas estruturas secundárias e terciárias das proteínas sem que haja modificação química dos aminoácidos (TORNBERG, 2005). Essa desnaturação resulta em alterações na estrutura da carne, tais como a destruição das membranas celulares, o encolhimento transversal e longitudinal das fibras, a agregação e formação do gel das proteínas sarcoplasmáticas e o encolhimento e a solubilização do tecido conjuntivo (TORNBERG, 2005). Essas mudanças físicas são influenciadas pelas propriedades do produto, taxas de transferência de calor e massa bem como as condições de cozimento (tempo-temperatura).

Bendall e Restall (1983) concluíram que o comportamento de um corte de carne bovina quando cozido por imersão em água poderia ser

explicado em quatro estágios. Primeiramente ocorre perda lenta de fluido das miofibrilas para dentro dos espaços extracelulares à medida que as proteínas sarcoplasmáticas e miofibrilares desnaturam entre 40 a 53 °C, não ocorrendo encurtamento concomitante. Em segundo lugar, ocorre rápida perda de fluido pelas miofibrilas à medida que a temperatura aumenta para 60 °C, enquanto o colágeno da membrana basal encolhe pelo calor. Em terceiro lugar, ocorre o encolhimento, pelo calor, das outras frações do colágeno, entre 64 a 90 °C. Nesta etapa, há um grande encolhimento, diminuição do diâmetro das miofibrilas e aumento das perdas por cozimento. Finalmente, durante o aquecimento prolongado ocorre a conversão do colágeno em gelatina, com o consequente amaciamento da carne.

As características PSE e DFD, citadas anteriormente, influenciam na perda de suco durante o cozimento. Pode-se mencionar que a indução de um pH final alto no músculo diminui a porção de perda por aquecimento que é devida à exsudação da umidade. Entretanto, a queda rápida do pH aumenta a perda de suco no cozimento (LAWRIE, 2005). De fato, Barbut, Zhang e Marcone (2005) verificaram que filés de peito de frango marinados com características PSE ( $L^*=57,70$  e  $pH=5,72$ ) apresentaram maiores perdas de massa durante o cozimento (14,59 %) do que os filés com características normais ( $L^*=49,71$  e  $pH=6,02$ ) e DFD ( $L^*=44,88$  e  $pH=6,27$ ), nos quais as perdas foram de 11,25 % e 11,01 %, respectivamente.

O processo de cozimento de carnes pode ser realizado em fornos de injeção direta ou indireta de vapor, por radiação na faixa de espectro do infra-vermelho, por microondas ou por imersão em água. A seleção do tipo de processamento depende das características desejadas no produto final. Além disso, a compreensão dos mecanismos de atuação de calor sobre o produto é de extrema importância para a seleção do melhor método de cozimento, o qual deve atender as condições de segurança alimentar e ao mesmo tempo proporcionar um rendimento satisfatório para a indústria. Neste trabalho, os métodos de cozimento por imersão em água e utilizando vapor foram considerados.

#### **1.3.1. Textura de carnes cozidas**

A textura dos alimentos possui como atributos primários a maciez, a coesividade, a viscosidade e a elasticidade, e como atributos secundários a gomosidade, a mastigabilidade, a suculência, a fraturabilidade e a adesividade. Dentre todos os atributos da qualidade

sensorial, a maciez, a suculência e a mastigabilidade são consideradas como os mais importantes para a avaliação da textura de carnes (ROÇA, 2000).

Os parâmetros de textura podem ser avaliados sensorialmente ou através de métodos instrumentais. O método empírico da lâmina Warner-Bratzler têm sido amplamente utilizado, sendo esta a técnica instrumental que apresenta a melhor correlação com as determinações subjetivas de um painel sensorial para a dureza da carne (TORNBERG, 2005). Os valores obtidos utilizando tal técnica são uma medida da força física necessária para cortar uma peça padrão de carne, denominada força de cisalhamento.

O efeito do tratamento térmico sobre a maciez da carne é um reflexo da ação de temperaturas elevadas sobre as diferentes proteínas musculares (proteínas sarcoplasmáticas, miofibrilares e proteínas do tecido conjuntivo). O fato de o cozimento causar o aumento ou a diminuição da maciez depende de uma variedade de fatores, incluindo a temperatura atingida pela carne, o tempo de aquecimento e o tipo de músculo que está sendo considerado. Em geral, enquanto o cozimento torna o tecido conjuntivo mais macio pela conversão do colágeno em gelatina, ele coagula e tende a endurecer as proteínas das miofibrilas. Tais efeitos dependem do tempo e da temperatura, sendo o primeiro mais importante para o amaciamento do colágeno e o último, mais crítico para o endurecimento miofibrilar (LAWRIE, 2005).

A desnaturação das proteínas musculares ocorre em distintas temperaturas durante o processo de cozimento. As proteínas solúveis (sarcoplasmáticas) e a miosina são termolábeis e sua desnaturação começa entre 40 a 50°C. As proteínas do tecido conjuntivo desnaturam entre 60 e 70°C, dependendo do grau de ligações cruzadas do colágeno. Conforme mencionado anteriormente, a força de cisalhamento é geralmente utilizada para avaliar a maciez da carne, sendo que valores maiores para essa força indicam uma maior dureza do produto. Davey e Gilbert (1974) apud Lawrie (2005), em seu estudo sobre o músculo bovino *sternomandibularis*, observaram que o aumento da temperatura de cozimento produziu duas fases separadas de dureza da carne. A primeira ocorreu entre 40°C e 50°C e foi aparentemente devido à desnaturação e à insolubilização das proteínas contráteis. A segunda ocorreu entre 65 °C e 75 °C e foi devido ao encolhimento das fibras à medida que o colágeno desnaturou. Acima de 75 °C e com o aumento do tempo de cozimento, a dureza da carne diminuiu à medida que o colágeno sofreu degradação. Se o colágeno predominante em um músculo tem ligações cruzadas termolábeis, então o aquecimento irá

provocar aumento da solubilidade e diminuirá a força de cisalhamento. Se o colágeno possui ligações cruzadas termoestáveis, estas irão resultar em aumento de tensão e dureza sob efeito do cozimento (LAWRIE, 2005).

### 1.3.2. Microbiologia de carnes cozidas

O cozimento da carne e produtos cárneos até uma temperatura interna não inferior a 71,1 °C (de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos USDA-FISIS) seguido do rápido resfriamento constitui o método mais indicado para destruição de micro-organismos patogênicos e deteriorantes presentes nos tecidos crus. A microbiota resultante é constituída sobretudo por enterococos, micrococos e lactobacilos. A presença de psicrófilos e psicrotróficos é de grande importância nestes produtos, uma vez que podem se desenvolver mesmo que o armazenamento seja realizado sob temperaturas apropriadas de refrigeração. Esses micro-organismos são responsáveis pela deterioração, determinando, assim, a vida de prateleira do produto. Existe ainda uma preocupação crescente quanto à multiplicação de patógenos psicrotróficos em produtos cárneos refrigerados, tais como *Listeria monocytogenes* e *Yersinia enterocolitica* (BROMBERG e MIYAGUSKU, 2008)

A maioria dos produtos cárneos é submetida a um cozimento completo, no qual apenas os esporos sobrevivem. Os níveis de micro-organismos nos produtos cárneos cozidos são dependentes das concentrações e tipos de micro-organismos presentes antes e após o tratamento térmico e dos subsequentes parâmetros de tempo-temperatura de manutenção do produto. Em geral, esses produtos apresentam contagens de  $10^2$  a  $10^3$  UFC/g. Concentrações de micro-organismos mais elevadas refletem as más condições de tempo e temperatura a que os produtos foram submetidos durante o armazenamento. Sob condições apropriadas de refrigeração, tais produtos não oferecem condições para o crescimento de patógenos mesófilos (BORCH, KANT-MUERMANS e BIXT, 1996).

Durante o resfriamento, o manuseio e o acondicionamento dos produtos cárneos cozidos há a possibilidade de recontaminação proveniente, sobretudo, de equipamentos e de manipuladores de alimentos. Essa recontaminação pode introduzir níveis de coliformes em concentrações de aproximadamente  $10^1$  UFC/g na superfície do produto. A presença de *Escherichia coli* nestes produtos indica condições não sanitárias no processamento. O contato dos manipuladores com os



produtos cárneos cozidos pode levar à contaminação por *Staphylococcus aureus*, em concentrações de  $10^1$  ou  $10^2$  UFC/g de amostra. *S.aureus* não se desenvolve bem anaerobicamente (no caso de produtos embalados a vácuo) e em presença de nitrito. Além disso, esses micro-organismos não crescem em temperaturas inferiores a  $6,7\text{ }^\circ\text{C}$  e são maus competidores em especial contra as bactérias lácticas, as quais são dominantes em produtos cárneos curados e cozidos. Os níveis citados não apresentam perigo potencial, mas oferecem inóculo suficiente para o crescimento até concentrações alarmantes caso ocorram condições de abuso de tempo-temperatura. Desta forma, a refrigeração de produtos cárneos prontos para o consumo é essencial para a prevenção do crescimento de *S. aureus* e produção de enterotoxina (BROMBERG e MIYAGUSKU, 2008).

O processo térmico destrói *Salmonella* sp. e outros patógenos não formadores de esporos. No entanto, caso estes produtos sejam contaminados com *Salmonella* sp. após o tratamento térmico e caso as temperaturas sejam favoráveis, esses micro-organismos podem se multiplicar.

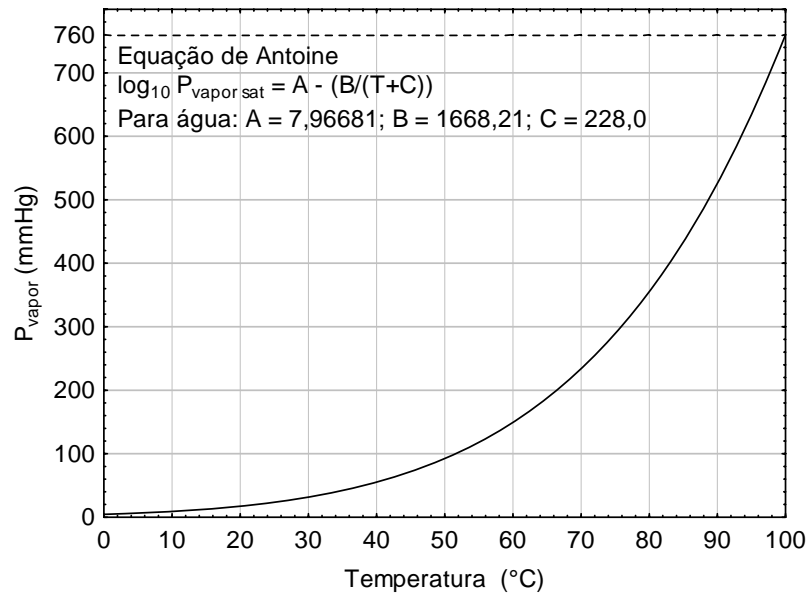
Independentemente do método de cozimento utilizado, o rápido resfriamento dos produtos cárneos é essencial para a qualidade microbiológica dos mesmos. Durante o resfriamento, o período em que o produto permanece entre  $50\text{ }^\circ\text{C}$  e  $12\text{ }^\circ\text{C}$  deve ser o mais curto possível, para evitar a germinação e o crescimento de bactérias formadoras de esporos, como *Clostridium perfringens* (DRUMMOND e SUN, 2008). O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) tem recomendado que produtos cárneos não curados sejam resfriados de  $54,4\text{ }^\circ\text{C}$  para  $26,6\text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura interna) em no máximo 1,5 horas e devem alcançar  $4\text{ }^\circ\text{C}$  em um adicional de 5 horas (USDA, 1999 apud DRUMMOND e SUN, 2008).

Deste modo, técnicas de resfriamento rápido vêm sendo propostas em substituição às convencionais como o resfriamento através de câmaras com circulação de ar forçado, de túneis de resfriamento e de imersão em água (SUN e WANG, 2000). Nos últimos anos, investigações sobre o resfriamento a vácuo têm mostrado que esse método pode oferecer à indústria uma alternativa rápida e segura para o resfriamento de carnes e produtos cárneos.

#### ***1.4. RESFRIAMENTO A VÁCUO***

O resfriamento a vácuo é um método de resfriamento evaporativo, o qual pode ser aplicado a produtos porosos que contenham água livre. O resfriamento é obtido através da evaporação da água da superfície do produto e dos poros conectados a ela, sob condição de vácuo (MCDONALD e SUN, 2000; DESMOND et al., 2000; WANG e SUN, 2001).

A temperatura de ebulição da água varia em função da sua pressão de vapor, como pode ser observado na Figura 1.4. Neste contexto, o processo de resfriamento a vácuo pode ser dividido em duas etapas: (i) antes da pressão de saturação ser atingida, onde a ação da bomba de vácuo serve apenas para evacuar o ar do interior da câmara (resfriamento praticamente inexistente) (MCDONALD e SUN, 2000) e (ii) quando a pressão dentro da câmara é reduzida à pressão de saturação, correspondente à temperatura inicial do produto, ocasionando a evaporação da água. O calor latente requerido para evaporação é fornecido pelo próprio produto. Desta forma, o calor sensível do produto é reduzido e o resfriamento é obtido (MCDONALD e SUN, 2000; WANG e SUN, 2001; ZHENG e SUN, 2004). A pressão na câmara é reduzida até que o produto tenha alcançado a temperatura desejada ou até a temperatura decair ao ponto onde não exista mais água livre para evaporação (MCDONALD e SUN, 2000).



**Figura 1.4** – Pressão de vapor de saturação da água em função da temperatura.

Um sistema típico de resfriamento a vácuo é ilustrado na Figura 1.5, constituindo-se basicamente de dois componentes: uma câmara de vácuo e um sistema de bombeamento (MCDONALD e SUN, 2000; WANG e SUN, 2001). Durante o resfriamento, a porta da câmara deve estar hermeticamente fechada, evitando a entrada de ar no sistema, visto que qualquer tipo de vazamento pode comprometer a eficiência da técnica. O sistema de bombeamento deve possuir dois elementos: a bomba de vácuo e o condensador de vapor de água. A bomba de vácuo deve ser projetada para reduzir rapidamente a pressão da câmara, da pressão atmosférica até o ponto *flash*, ou seja, até a pressão de saturação da água na temperatura inicial do produto. As bombas rotativas com óleo são as mais utilizadas para o resfriamento a vácuo. A vazão de bombeamento requerida para aplicação da técnica pode ser obtida através de um balanço de massa em regime transiente na câmara de vácuo, representado pela Equação 1.1 (WANG e SUN, 2001).

$$-Q\rho_{ar} = \frac{dm}{dt} \quad (1.1)$$

onde  $Q$  é a vazão de bombeamento ( $m^3/h$ ),  $\rho_{ar}$  é a densidade do ar ( $m^3/kg$ ), e  $dm/dt$  é a variação da massa de ar no interior da câmara ( $kg/h$ ).

Considerando o ar da câmara um gás ideal, sua densidade pode ser obtida pela Equação 1.2.

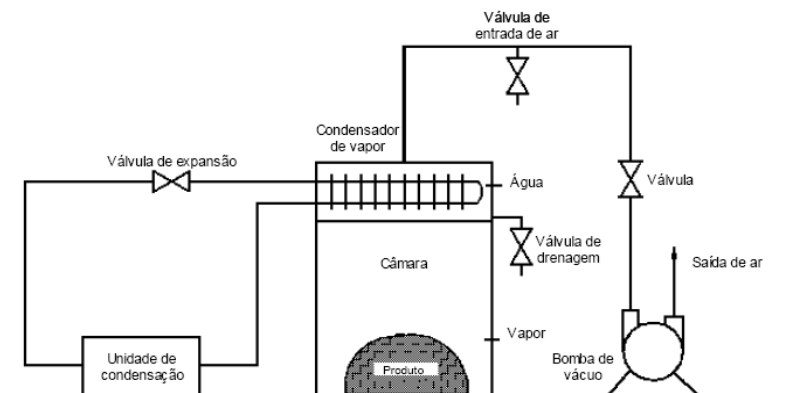
$$\rho_{ar} = \frac{PM}{RT} \quad (1.2)$$

onde  $P$  é a pressão na câmara,  $M$  é a massa molar média do ar,  $T$  é a temperatura e  $R$  é a constante dos gases ideais.

Substituindo a Equação 1.2 na Equação 1.1 e integrando a expressão resultante entre os tempos inicial e final e entre as pressões inicial (atmosférica) e final, obtém-se a Equação 1.3.

$$Q = \frac{V}{t} \ln \frac{P_o}{P_f} \quad (1.3)$$

onde  $V$  é o volume livre da câmara de vácuo ( $m^3$ ),  $t$  é o tempo de bombeamento (h),  $P_o$  é a pressão inicial (pressão atmosférica) e  $P_f$  é a pressão no ponto *flash*. Para atingir maiores taxas de bombeamento, associações de bombas de vácuo em paralelo podem ser utilizadas (MCDONALD e SUN, 2000; AFONSO, 2005).



**Figura 1.5** – Sistema típico de resfriamento a vácuo (WANG e SUN, 2001).

O vapor de água, gerado a partir da evaporação, deve ser removido para aliviar o sistema de vácuo devido ao seu elevado volume específico a baixas pressões (como as utilizadas no resfriamento a vácuo), conforme mostrado na Tabela 1.1. Portanto, faz-se necessária a utilização de um sistema auxiliar de refrigeração para condensar e drenar esse vapor. Caso este não fosse removido, com o auxílio do condensador, vazões de bombeamento muito elevadas seriam necessárias para removê-lo (MCDONALD e SUN, 2000).

**Tabela 1.1** - Propriedades do vapor de água a diferentes pressões.

Pressão de vapor (mbar)	Temperatura de ebulição (°C)	Entalpia de vaporização (kJ/kg)	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)
1013,0	100	2257,06	1,67
473,3	80	2308,79	3,41
123,5	50	2382,77	12,03
31,7	25	2442,31	43,36
9,4	6	2487,20	137,70
6,1	0,010	2501,40	206,10

Fonte: GEANKOPLIS, 1993

A perda de massa é inevitável durante o resfriamento a vácuo, uma vez que o resfriamento é obtido através da evaporação da água do produto. A Equação 1.4 pode ser utilizada para estimar essa perda durante o processo (WANG e SUN, 2001).

$$\Delta m_w = \frac{m_p \cdot c_p \cdot \Delta T}{\Delta \hat{H}_v} \quad (1.4)$$

onde  $\Delta m_w$  é a perda de massa (kg),  $c_p$  é o calor específico médio do produto no intervalo de temperatura de trabalho (kJ/kg°C),  $m_p$  é a massa do produto antes do resfriamento,  $\Delta T$  é a variação de temperatura do produto durante o processo (°C) e  $\Delta \hat{H}_v$  é a entalpia específica de vaporização da água na pressão final de trabalho (kJ/kg).

O decréscimo da temperatura causado por unidade de perda de massa percentual pode ser determinado pela Equação 1.5. O calor

específico do alimento determina este decréscimo de temperatura. Na Tabela 1.2 são apresentados o calor específico e o valor calculado do decréscimo da temperatura causado por unidade de perda de massa percentual para água e alguns tipos de alimentos. Para carne cozida pode ser obtido um decréscimo de temperatura e 7 °C para cada 1 % de perda de massa.

$$\eta_T = \frac{\Delta T}{\Delta m_w / m_p} = \frac{\Delta \hat{H}_v}{c_p} \quad (1.5)$$

**Tabela 1.2** - Umidade, calor específico e decréscimo de temperatura por unidade de perda de massa percentual para água pura e alguns alimentos típicos.

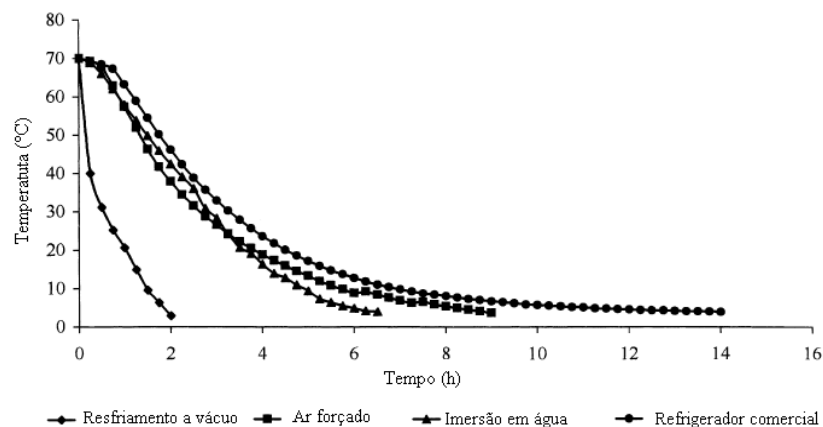
	Umidade (%)	C (kJ/kg°C)	$\eta_T$ (°C/1% de perda de massa)
Água	100	4,2	6,0
Vegetais folhosos	90	3,9	6,5
Carne Cozida	74	3,5	7,0
Alimentos assados	35	2,6	9,5

Fonte: WANG e SUN, 2001

#### 1.4.1. Vantagens e desvantagens do resfriamento a vácuo

A maior vantagem do resfriamento a vácuo é que muitos produtos podem ser resfriados em um intervalo de tempo extremamente curto em comparação com técnicas convencionais de resfriamento (MCDONALD e SUN, 2000; WANG e SUN, 2001). Devido a isto, o resfriamento a vácuo pode fornecer benefícios à indústria de processamento de alimentos como, por exemplo, aumentar a produção, reduzir o consumo de energia e minimizar o desenvolvimento de micro-organismos em alimentos cozidos (ZHENG e SUN, 2004). Diversos estudos têm demonstrado uma maior taxa de resfriamento de produtos cárneos utilizando a técnica a vácuo em comparação com métodos tradicionais de resfriamento tais como ar forçado, imersão em água e refrigerador comercial (câmaras frias) (MCDONALD e SUN, 2000; DESMOND et al., 2000; DRUMMOND et al., 2008). McDonald e Sun (2000) apresentaram uma comparação entre diferentes métodos de resfriamento para carne cozida com massa entre 4 e 5 kg, como ilustrado na Figura 1.6. O tempo de resfriamento desse produto foi reduzido em

aproximadamente 70 % utilizando a técnica de resfriamento a vácuo quando comparado com o tempo de resfriamento utilizando ar forçado.



**Figura 1.6** – Curvas de resfriamento de cortes de carne cozidos (4 – 5 kg), resfriados por diferentes métodos (MCDONALD e SUN, 2000).

Os produtos resfriados a vácuo também apresentam uma distribuição mais uniforme de temperatura quando comparados com os resfriados pelos métodos tradicionais. Além disso, a taxa de resfriamento não é diretamente afetada pelo tamanho da amostra, sendo um método vantajoso para produtos de grandes dimensões. O controle preciso da temperatura final do produto também é possível no resfriamento a vácuo, pelo simples controle da pressão absoluta na câmara de resfriamento (MCDONALD e SUN, 2000; ZHENG e SUN, 2004).

Dentre outras vantagens do resfriamento a vácuo, destaca-se um menor consumo de energia quando comparado com outros métodos de resfriamento (MCDONALD e SUN, 2000, WANG e SUN, 2001; AFONSO, 2005). A relação entre o calor removido do produto e a energia elétrica requerida é de 2,65 para o resfriamento a vácuo, contra 0,52 para os sistemas de resfriamento com ar e de 1,20 para o resfriamento por imersão em água (MCDONALD e SUN, 2000, WANG e SUN, 2001). Em contrapartida, o processo de resfriamento a vácuo apresenta como desvantagem uma excessiva perda de massa, decorrente da evaporação de água do produto. Essa perda é uma inevitável consequência dessa técnica e está diretamente relacionada com a

redução de temperatura e com o calor específico do produto, conforme a Equação 1.4 (MCDONALD e SUN, 2000).

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de reduzir essa perda de massa, fator que pode comprometer a qualidade sensorial do produto resfriado (DESMOND et al. 2000, WANG e SUN, 2001). A aspersão de água antes do resfriamento tem sido avaliada por diversos autores (AFONSO, 2000; APATI, FURLAN e LAURINDO, 2006; ZHANG e SUN, 2006). A umidificação do produto antes do resfriamento deve ser realizada de forma uniforme em toda superfície, para que não haja locais preferenciais de evaporação e riscos de manchas localizadas no produto. Afonso (2000) avaliou a perda de massa durante o resfriamento a vácuo de alfaces com e sem pré-umidificação e verificou uma perda de massa média de 4,5 % para alfaces sem pré-umidificação e 1,7 % para as pré-umidificadas. Brosnan e Sun (2001) conseguiram reduzir a perda de massa de 5,4 % para até 0,0 % ao utilizar a aspersão de água em lírios antes do resfriamento a vácuo. Apati, Furlan e Laurindo (2006) relataram que o processo de aspersão de água em cogumelos promoveu uma maior homogeneidade no resfriamento e compensou a perda de massa efetiva associada ao processo.

#### 1.4.2. Transferência de calor durante o resfriamento a vácuo

As diferenças entre as taxas de resfriamento obtidas com os métodos tradicionais e o resfriamento a vácuo são essencialmente causadas pelos diferentes mecanismos de transferência de calor envolvidos. Para os métodos tradicionais (resfriamento em câmara fria, por ar forçado e por imersão em água), o resfriamento é obtido basicamente pela transferência de calor por convecção entre a superfície e o meio de resfriamento e por condução do núcleo do produto à superfície. Em alimentos como carne cozida, devido a sua baixa condutividade térmica, a etapa condutiva controla o tempo do processo e, conseqüentemente, a taxa de resfriamento convencional depende do tamanho da amostra (SUN e WANG, 2000). Ao contrário dos métodos tradicionais, o resfriamento a vácuo ocorre através da evaporação da água livre do produto sob condição de vácuo, removendo uma grande quantidade de calor latente instantaneamente.

O processo de transferência de massa (evaporação), o qual ocorre simultaneamente à transferência de calor durante o resfriamento a vácuo, pode ser caracterizado por duas etapas: (i) pela evaporação da água na superfície e no interior dos poros do produto devido à diferença

entre a pressão de saturação da água nas paredes dos poros e a pressão no poro e (ii) pelo escoamento do vapor através dos poros para a superfície e, subsequentemente, para a atmosfera (WANG e SUN, 2002b). O fluxo de vapor através dos poros deve ser descrito pelo mecanismo hidrodinâmico, uma vez que é causado por gradientes de pressão. Portanto, para a modelagem do processo de resfriamento a vácuo, a geração de vapor devido à evaporação e o calor latente de vaporização devem ser incluídos nas equações de transferência de massa e calor, respectivamente (ZHENG e SUN, 2004).

### 1.4.3. Aplicações do resfriamento a vácuo

McDonald e Sun (2000), Wang e Sun (2001) e Zheng e Sun (2004) apresentaram uma vasta revisão sobre as aplicações da técnica de resfriamento a vácuo em alimentos. A seguir, serão apresentadas algumas aplicações tradicionais da técnica e estudos recentes. Por se tratar do foco deste trabalho, o resfriamento a vácuo de carnes cozidas será apresentado separadamente no próximo item, juntamente com as características do processo para este tipo de produto.

#### 1.4.3.1. Resfriamento a vácuo de frutas, vegetais e flores

A maior aplicação da técnica de resfriamento a vácuo é para vegetais, como hortaliças folhosas, legumes e frutas. Quanto mais rapidamente a temperatura destes produtos for reduzida até a temperatura de armazenamento, maior será a vida pós-colheita dos mesmos (MCDONALD e SUN, 2000). Estima-se que a cada 10 °C na redução da temperatura haja uma redução de duas a quatro vezes na atividade respiratória (CORTEZ, NEVES FILHO e CARDOSO, 2000). A aplicação do resfriamento a vácuo para a rápida remoção do “calor de campo” de produtos agrícolas perecíveis ocorre antes que estes sejam transportados por longas distâncias ou armazenados sob refrigeração. O método é indicado para produtos que tenham alta relação de área superficial por volume, sendo as hortaliças folhosas perfeitamente adequadas a este tipo de processo (HAAS e GUR, 1987; RENNIE et al., 2001; AFONSO, 2000; AFONSO, 2005).

A primeira aplicação comercial do resfriamento a vácuo foi realizada em 1948 na Califórnia (EUA) para o resfriamento de 34 vagões de alface. Atualmente, este é o método comercial padrão utilizado para o pré-resfriamento de alfaces nos Estados Unidos e em muitos países europeus (MCDONALD e SUN, 2000). Utilizando o

processo a vácuo, as alfaces podem ser resfriadas de 25 °C (temperatura ambiente) até 1 °C em menos de 30 minutos, e posteriormente estocadas a esta temperatura podem ter sua vida útil (de 3 a 5 dias) aumentada para 14 dias (MCDONALD e SUN, 2000; RENNIE et al., 2001). Os efeitos do resfriamento a vácuo e das embalagens no aumento da vida de prateleira e na perda de massa de alfaces têm sido extensivamente estudados (HAAS e GUR, 1987; ARTÉS e MARTÍNEZ, 1996; MARTÍNEZ e ARTÉS, 1999; RENNIE et al., 2001; AFONSO, 2000; AFONSO, 2005).

A técnica de resfriamento a vácuo também vem sendo adotada comercialmente nos Estados Unidos e em países europeus para o pré-resfriamento de cogumelos (MCDONALD e SUN, 2000). O fato desse tipo de produto possuir cerca de 90 % de água e estrutura porosa, o torna adequado à técnica de resfriamento a vácuo (APATI, FURLAN e LAURINDO, 2006). Burton et al. (1987) avaliaram o resfriamento de cogumelos da espécie *Agaricus bisporus* pelo uso de ar frio e pela aplicação de vácuo. Os resultados de microscopia eletrônica de varredura não indicaram diferenças na estrutura dos cogumelos resfriados pelos dois métodos avaliados. Após 102 horas de armazenamento a 5 °C, os cogumelos resfriados a vácuo apresentaram um escurecimento menor do que os resfriados convencionalmente. Esses autores também relataram que os cogumelos resfriados pela aplicação de vácuo apresentaram uma perda de massa ligeiramente superior quando comparados com os resfriados por ar frio.

McDonald e Sun (2000) e Wang e Sun (2001) relatam também a aplicação do resfriamento a vácuo para o pré-resfriamento de morango, groselha, couve, espinafre, brócolis, pimentão, nabo, pepino e cenoura. Estas pesquisas têm demonstrado que frutas e vegetais, com alto teor de umidade como os mencionados, quando resfriados da temperatura ambiente de 25 °C para 1 °C perdem cerca de 4 % de massa. No entanto, a aspersão de água antes do resfriamento pode reduzir significativamente a perda de umidade durante o resfriamento.

Além das aplicações mencionadas, a técnica a vácuo tem sido utilizada para o resfriamento de flores e folhagens logo após a colheita, aumentando significativamente a vida útil desses produtos. De acordo com Sun e Brosnan (1999), a vida útil de narcisos resfriados a vácuo imediatamente após a colheita e mantidos sob refrigeração a 2 °C foi aumentada em até 200 %. O tempo médio de resfriamento foi de 65 segundos para reduzir a temperatura até 2 °C. Os autores também observaram uma redução na perda de massa (de 3 % para 1,5 %) utilizando aspersão de água nas flores antes do resfriamento a vácuo.

#### 1.4.3.2. Resfriamento a vácuo de produtos assados

Dentre a utilização do resfriamento a vácuo para produtos assados, destaca-se uma gama de produtos da indústria de panificação, como panetones, tortas salgadas, biscoitos e algumas variedades de pães (WANG e SUN, 2001). Por exemplo, produtos delicados como panetones podem ser resfriados em 4 minutos sob vácuo, em comparação com 24 horas com ar (MCDONALD e SUN, 2000).

Devido às alterações estruturais decorrentes de uma acumulação de pressão de vapor no produto em áreas de baixa permeabilidade ao vapor, como a crosta de pães, técnicas especializadas para a utilização do vácuo são necessárias. O uso do resfriamento a vácuo modulado (RVM), onde a pressão é modulada durante o resfriamento, permite que os produtos de panificação sejam resfriados rapidamente sem efeitos adversos sobre o volume e a textura (MCDONALD e SUN, 2000). Estes produtos são geralmente resfriados de 98 °C até 30 °C, resultando em uma perda de massa de aproximadamente 1 % a cada 10 °C na redução da temperatura. Deste modo, a perda de massa é de aproximadamente 6,8 %, dependendo do calor específico de cada produto. O resfriamento convencional com ar forçado resulta em uma perda de massa entre 3 a 5 %, dependendo da velocidade do ar. Entretanto, a diferença entre a perda de massa nos dois processos é pequena e pode ser compensada pela redução no tempo de forneamento (aumento da umidade no produto) ou pela aspersão de água estéril após os produtos saírem do forno, sendo rapidamente absorvida pela estrutura porosa deste tipo de produto antes do resfriamento a vácuo (MCDONALD e SUN, 2000).

#### 1.4.3.3. Resfriamento a vácuo de refeições prontas

Nos últimos anos, o mercado de refeições prontas refrigeradas tem crescido substancialmente devido à sua conveniência e praticidade, o que aumenta a preocupação com a segurança alimentar. Embora o cozimento recomendado a 70 °C por não menos que 2 minutos no centro do alimento possa resultar em uma redução de 10<sup>6</sup> UFC/g na contagem de *L. monocytogenes*, ainda existe a possibilidade de algum tipo de patógeno psicrotófico sobreviver a este processo e se multiplicar, caso a temperatura do alimento não for rapidamente reduzida para um nível inferior a 7 °C (WANG e SUN, 2001; ZHENG e SUN, 2004). Devido à alta taxa de resfriamento, a técnica a vácuo tem sido estudada para o resfriamento de componentes de refeições prontas, como cenoura (ZHANG e SUN, 2003; RODRIGUES, 2009), batata (DECKER, 1990

apud HUBER 2004; RODRIGUES, 2009), arroz (ZHANG e SUN, 2006), molhos (MCDONALD e SUN, 2000) e carnes (DESMOND et al., 2000; MCDONALD e SUN, 2001a, 2001b; DESMOND, KENNY e WARD, 2002; MCDONALD, SUN, e KENNY, 2001; SUN e WANG, 2000, 2003).

Decker (1990 apud HUBER, 2004) avaliou o uso do vácuo para o resfriamento de batatas cozidas e fatiadas, e verificou um aumento na qualidade do produto final em comparação com o sistema de resfriamento com água gelada. O autor concluiu que com o sistema de vácuo não houve perda de sabor, o que ocorre com o sistema de imersão em água devido à remoção da película de amido do produto.

Zhang e Sun (2003) avaliaram o resfriamento a vácuo de cenouras cozidas e verificaram que as perdas de massa de cenouras fatiadas foram muito superiores às de cenouras similares inteiras. Para este tipo de produto, foi verificado que a evaporação de água durante o resfriamento a vácuo ocorreu preferencialmente na superfície externa e não no interior dos poros.

Zhang e Sun (2006) compararam diferentes métodos para o resfriamento de arroz cozido. Os resultados obtidos para o tempo de resfriamento de 1,1 kg de produto de 80 °C até 4 °C pelos métodos com vácuo, ar forçado, câmara fria e resfriador a placas foram de aproximadamente 4, 62, 181 e 90 minutos, respectivamente, indicando a alta eficiência da técnica a vácuo. Por outro lado, os autores verificaram uma maior perda de massa utilizando o resfriamento a vácuo. Entretanto, essa perda foi compensada quando utilizada a aspersão de água no produto durante o processo.

#### 1.4.4. Resfriamento a vácuo de carnes cozidas

O estudo mais antigo de resfriamento a vácuo de carnes cozidas foi provavelmente conduzido por Burfoot et al. (1990) que observaram que o resfriamento a vácuo aumentou consideravelmente a taxa de resfriamento de peças de presunto cozidas, em comparação com o resfriamento convencional em câmara fria. Posteriormente, James (1990) mostrou que o tempo para o resfriamento a vácuo de peças grandes de presunto (6,8-7,3 kg) de 70 °C a 10 °C foi de apenas 0,5 horas, em comparação com 10 horas utilizando ar forçado.

#### 1.4.4.1. Características do processo de resfriamento a vácuo de carnes cozidas

A taxa de resfriamento a vácuo de peças grandes de carne cozidas tem sido extensamente investigada (DESMOND et al., 2000; MCDONALD e SUN, 2001a, 2001b; DESMOND, KENNY e WARD, 2002; MCDONALD, SUN, e KENNY, 2001; SUN e WANG, 2000, 2003). De maneira geral, os resultados demonstram que o resfriamento a vácuo aumenta significativamente a taxa de resfriamento em comparação com métodos tradicionais de resfriamento. Sun e Wang (2000) avaliaram diferentes métodos para o resfriamento de carne de porco cozida. Os resultados demonstraram que as amostras, com aproximadamente 7 kg, apresentaram uma redução na temperatura central de 70 °C para 10 °C em apenas 75 minutos quando resfriadas a vácuo. Os tempos obtidos para o resfriamento com ar frio, por imersão em água e por ar forçado foram de 570, 465 e 415 minutos, respectivamente. Os autores ainda mencionaram que o resfriamento a vácuo foi o único método de resfriamento capaz de atender à legislação da Irlanda e de outros países europeus, a qual exige que peças de carnes sejam resfriadas de 74 a 10 °C dentro de 2,5 horas após o cozimento. As diferentes taxas de resfriamento entre o resfriamento a vácuo e os métodos convencionais são causadas principalmente pelas diferenças essenciais dos mecanismos de resfriamento, conforme descrito no item 1.4.2.

A estrutura porosa das amostras, como o tamanho, a forma e a distribuição dos poros, possui influência significativa na taxa da evaporação da água e conseqüentemente na taxa de resfriamento. McDonald e Sun (2001a) demonstraram que há uma relação direta entre a porosidade e a taxa de resfriamento a vácuo. Esses autores observaram que a carne bovina moída, com porosidade entre 9,8 e 11,8 após o cozimento, foi resfriada a vácuo de 72 °C até 4 °C entre 15 e 21 minutos, enquanto que para o músculo inteiro cozido, com porosidade entre 1,44 e 2,6 %, o tempo requerido para o resfriamento foi entre 100 a 154 minutos. Por outro lado, nenhuma medida experimental e nenhuma análise teórica indicaram que a taxa de resfriamento a vácuo é diretamente afetada pelo tamanho da amostra, o que torna esse método bastante favorável para o resfriamento de peças grandes de carnes (BURFOOT, et al., 1990; SUN e WANG, 2003; WANG e SUN, 2003).

A perda de massa de cortes de carnes cozidos durante o resfriamento a vácuo também tem sido foco de diversas pesquisas (DESMOND et al., 2000, 2002; MCDONALD e SUN, 2001a, 2001b;

MCDONALD, SUN e KENNY, 2001; SUN e WANG, 2000, 2003; WANG e SUN, 2003; HUBER e LAURINDO, 2005). Em geral, para carnes cozidas, essa perda é de aproximadamente 10 % da massa original, para uma variação de temperatura de 72°C a 4°C (SUN e WANG, 2000; DESMOND et al., 2000; McDONALD et al., 2001). Por outro lado, a perda de massa durante o resfriamento em câmara fria, por ar forçado e por imersão em água (para a mesma variação de temperatura) é de aproximadamente 5 %, 6 % e 2 %, respectivamente. Sun e Wang (2003) concluíram que cada 6,0-6,5 °C na redução da temperatura, durante o resfriamento a vácuo, provoca uma perda de 1 % na massa inicial da carne cozida.

Esforços para tornar o resfriamento a vácuo de carnes um processo mais atrativo, não comprometendo a qualidade sensorial deste tipo de produto, têm sido foco de estudos recentes. O objetivo principal é encontrar alternativas para reduzir ou mesmo compensar a perda de massa decorrente da evaporação da água do produto durante o resfriamento a vácuo (DESMOND et al., 2000, WANG e SUN, 2001; HUBER e LAURINDO, 2005; DRUMMOND e SUN, 2008; DRUMMOND et al., 2009).

O controle das condições de operação do processo de resfriamento a vácuo, como o controle na taxa de evacuação da câmara, pode reduzir a perda de massa do produto. Huber e Laurindo (2005) avaliaram a perda de massa de cortes de peito de frango cozido durante o resfriamento a vácuo com diferentes taxas de redução de pressão. Esses autores observaram, para uma variação de 72 °C na temperatura da amostra, uma redução de 1,1 % na perda de massa quando utilizaram uma menor taxa de evacuação na câmara de resfriamento. McDonald e Sun (2001b) também observaram uma menor perda de massa para carne bovina cozida utilizando esse tipo de controle. Para o resfriamento das amostras de 72 °C até 4 °C, os autores observaram uma perda de massa de 10,7 % quando utilizaram uma taxa de redução de 1,56 mbar.s<sup>-1</sup>, enquanto que a perda de massa para a maior taxa de evacuação (9,35 mbar s<sup>-1</sup>) foi de 12,4 %. No entanto, a redução na taxa de evacuação da câmara provocou um incremento no tempo de resfriamento de até 50 minutos, para obter-se a mesma variação de temperatura. Por outro lado, os resultados do estudo conduzido por Sun e Wang (2003) não mostraram uma relação direta entre o controle na taxa de redução da pressão e a perda de massa de cortes de carne bovina durante o resfriamento a vácuo.

A injeção de salmoura também pode aumentar significativamente a qualidade de cortes cozidos de carne bovina e suína resfriados a vácuo

(DESMOND, KENNY e WARD, 2002; MCDONALD e SUN, 2001a; MCDONALD, SUN e KENNY, 2001). Este procedimento é comumente utilizado em carnes cruas, com os objetivos principais de geração de características sensoriais específicas e aumento da capacidade de retenção de água (LE MESTE et al., 2002). McDonald, Sun e Kenny (2001) avaliaram o efeito do nível de injeção de salmoura na qualidade de carne bovina resfriada a vácuo. Os resultados indicaram que um nível de injeção entre 30 e 35 % da massa inicial pode melhorar significativamente a qualidade da carne resfriada a vácuo (sabor, cor e textura), comparável com a qualidade do produto resfriado por imersão em água. No entanto, existe um limite para a quantidade de salmoura que pode ser injetada, para evitar efeitos adversos nos atributos sensoriais do produto. Além disso, a injeção de salmoura não é aplicável a todos os produtos a base de carne (WANG e SUN, 2001). Para cortes de peito de frango temperados, a legislação brasileira estabelece um limite para o nível de injeção de salmoura de no máximo 20 % da massa inicial do produto (BRASIL, 2003).

Estudos recentes têm demonstrado que o resfriamento a vácuo realizado com peças de presunto e cortes de carne bovina imersas na solução de cozimento (*immersion vacuum cooling*) pode reduzir significativamente a perda de massa associada ao processo, além de proporcionar um incremento nos parâmetros de qualidade do produto resfriado (HOUSKA et al., 2003; HOUSKA et al., 2005; CHENG e SUN, 2006a, 2006b, 2006c; DRUMMOND e SUN., 2008; DRUMMOND et al., 2009). No entanto, dentre os trabalhos que avaliaram essa técnica, poucos se dedicaram à análise dos fenômenos responsáveis por tal redução na perda de massa, a qual pode ser explicada pela impregnação dos poros da carne com a solução de cozimento ao final do processo (devido aos gradientes de pressão que surgem com restabelecimento da pressão atmosférica). A partir dessa constatação, além da avaliação do método de resfriamento a vácuo dos filés de peito de frango imersos na água de cozimento, uma nova abordagem que adiciona uma etapa de impregnação a vácuo ao resfriamento a vácuo convencional (sem imersão) é proposta neste trabalho. Neste contexto, o processo de impregnação a vácuo de alimentos porosos é brevemente descrito no item 1.5.

#### 1.4.4.2. Características de carnes cozidas resfriadas a vácuo

A qualidade de carnes cozidas resfriadas a vácuo, com relação à cor, sabor, textura e aceitabilidade em geral, foi estudada por diferentes

autores e comparada àquelas resfriadas utilizando métodos convencionais (DESMOND et al., 2000, 2002; MCDONALD SUN e KENNY, 2000, 2001). A análise sensorial conduzida por Desmond et al. (2000) revelou que peças de carne de porco (5-6 kg) resfriadas a vácuo são menos macias e suculentas do que àquelas resfriadas em câmara fria e por ar forçado, uma vez que as resfriadas a vácuo possuem menor conteúdo de umidade devido à maior quantidade de água evaporada durante o resfriamento. Entretanto, McDonald, Sun e Kenny (2000) verificaram que os participantes da análise sensorial não detectaram uma influência significativa dos métodos de resfriamento na maciez e na suculência de cortes de carne bovina.

Com relação às propriedades mecânicas de cortes de carnes, diversos estudos mostraram que os produtos resfriados a vácuo apresentaram valores maiores para força de cisalhamento e dureza comparados com aqueles resfriados utilizando outros métodos (DESMOND et al., 2000; MCDONALD SUN e KENNY, 2000; DRUMMOND et al., 2009).

McDonald, Sun e Kenny (2000) também relataram que os produtos resfriados a vácuo apresentaram uma melhor qualidade microbiológica, uma vez que o nível de crescimento microbiano durante o armazenamento foi menor. Os resultados mostraram que após sete dias de estocagem, a contagem média de mesófilos foi de  $3,6 \cdot 10^1$  UFC/g de amostra resfriada a vácuo em comparação com o valor de  $9,8 \cdot 10^2$  UFC/g de amostra resfriada por imersão em água. A contagem de psicotróficos foi de  $6,0 \cdot 10^4$  UFC/g para as amostras resfriadas a vácuo e de  $8,0 \cdot 10^5$  UFC/g para as amostras resfriadas por imersão em água. A presença de *Salmonella* sp., *Clostridium perfringens* e *Echerichia coli* não foi detectada em nenhuma amostra.

Os resultados dos estudos conduzidos por McDonald e Sun (2001a) mostraram um aumento significativo da porosidade de cortes de carne bovina durante o resfriamento a vácuo de 72 °C até 4 °C. Adicionalmente, os autores observaram que o desenvolvimento da porosidade durante o resfriamento foi significativamente influenciado pelo tratamento preliminar realizado nas amostras *in natura* (tambleamento a vácuo ou à pressão atmosférica). As amostras que foram submetidas ao tambleamento a vácuo apresentaram valores de porosidade maiores que 2,5 % após o cozimento até 72 °C e a porosidade aumentou para valores superiores a 7% após o resfriamento a vácuo até 4 °C. Esses valores foram significativamente diferentes para as amostras submetidas ao tambleamento à pressão atmosférica, as quais



apresentaram valores de porosidade menores que 1 % após o cozimento e entre 4-4,5% após o resfriamento a vácuo. Jin, Zhu e Xu (2006) utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM) observaram um aumento nos espaços entre as fibras musculares dos cortes de carne suína submetidos ao resfriamento a vácuo em comparação com cortes resfriados em câmara fria, confirmando os resultados previamente apresentados por McDonald e Sun (2001a).

McDonald, Sun e Lyng (2002) compararam as propriedades termofísicas de carne cozida resfriada a vácuo e por métodos tradicionais, como ar forçado e imersão em água. Os autores verificaram que os produtos resfriados a vácuo possuem menor condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico do que os produtos resfriados pelos métodos convencionais, resultado direto da alta perda de umidade. Por outro lado, o aumento da porosidade durante o resfriamento a vácuo também possui um efeito significativo na diminuição da condutividade térmica e na menor amplitude da difusividade térmica. Ainda, foi verificado nesse estudo que o decréscimo da densidade aparente durante o resfriamento a vácuo teve um efeito significativo na redução da condutividade térmica.

### **1.5. IMPREGNAÇÃO A VÁCUO DE ALIMENTOS POROSOS**

O processo de impregnação a vácuo (IV) de alimentos porosos consiste na troca do gás e do líquido nativo aprisionados dentro dos poros por um líquido externo. Isso se faz pela ação de gradientes macroscópicos de pressão promovidos pela aplicação de vácuo e posterior restabelecimento da pressão atmosférica em uma câmara contendo o produto imerso em uma solução (FITO, 1994; FITO e PASTOR, 1994; FITO et al., 1996).

No primeiro passo do processo de IV, submete-se o sistema a uma pressão subatmosférica ( $p_1$ ) por um dado período de tempo ( $t_1$ ), onde o gás ocluído nos poros se expande, até o equilíbrio com a pressão imposta ao sistema, saindo do produto e levando parte do líquido nativo presente no interior dos poros. Uma vez alcançado o equilíbrio das pressões do sistema, uma quantidade de líquido penetra nos poros devido à ação das forças capilares. Após este período, a pressão atmosférica ( $p_2$ ) é restabelecida e o produto é mantido imerso na solução por um tempo  $t_2$ . Nesta segunda etapa, o gás residual na amostra se comprime, conduzindo à impregnação dos poros do produto pela solução externa (FITO, 1994; FITO et al., 1996; FITO et al., 2001a).

As mudanças promovidas na amostra durante o processo de impregnação a vácuo são resultado tanto do preenchimento dos poros pela solução externa quanto pela deformação do volume da amostra, provocada pela variação da pressão sobre o sistema. Este preenchimento dos poros implica em: (i) um aumento da área de contato entre as células e a solução impregnante; (ii) uma abrupta mudança na força motriz do processo de transferência de massa, já que a composição total da amostra se modifica com a impregnação da solução e (iii) um aumento da área disponível para transferência de massa por difusão (FITO et al., 2001a; SCHMIDT, CARCIOFI e LAURINDO, 2008b; CARCIOFI, 2009).

A impregnação a vácuo de alimentos permite a introdução de substâncias dissolvidas ou dispersas em uma fase líquida diretamente na estrutura porosa do alimento de forma rápida e controlada, permitindo mudanças na composição e estrutura dos alimentos. Desta forma, a IV pode aumentar a impregnação de um componente em muitos processos nos quais as operações sólido-líquido estão presentes: salga, desidratação osmótica de frutas, acidificação, adição de preservativos, adição de probióticos, entre outros (CHIRALT et al., 2001; MARTÍNEZ-MONZÓ et al., 1998; MÚJICA-PAZ et al., 2003; BETORET et al., 2003; SCHMIDT, CARCIOFI e LAURINDO, 2008b).

Pesquisadores da Universidade Politécnica de Valência têm contribuído com avanços no entendimento dos mecanismos de transporte de massa que ocorrem durante a impregnação a vácuo (FITO, 1994; FITO e PASTOR, 1994; FITO et al., 1996). Estes autores demonstraram que o mecanismo hidrodinâmico (HDM) de transporte de água e solutos, controlado por gradientes macroscópicos de pressão, é o principal mecanismo de transferência na impregnação a vácuo de alimentos porosos.

Para produtos porosos com características viscoelásticas as mudanças de pressão durante a IV causam, além dos fluxos de gás e líquido, o fenômeno de deformação-relaxação da matriz sólida (DRP). Durante o primeiro passo da impregnação a vácuo, o volume do produto tende a aumentar (inchar), sendo esse fenômeno associado à expansão do gás dentro dos poros. Isto ocorre até que a pressão interna se iguale à pressão externa. A amostra então relaxa e ocorre uma entrada capilar de líquido. Durante esta etapa ocorre ainda a saída de líquido nativo presente nos poros, carregado pelo gás que deixa a amostra. No segundo passo a compressão pode ocasionar a deformação do volume da amostra e a subsequente relaxação, juntamente com a penetração do líquido nos poros, pela ação do Mecanismo Hidrodinâmico. As propriedades

mecânicas da matriz sólida e as propriedades de escoamento do líquido que penetra os poros irão definir os tempos característicos de penetração e de deformação-relaxação, responsáveis pela impregnação final e deformação das amostras no equilíbrio (FITO et al., 1996; FITO e CHIRALT, 2000).

### 1.5.1. Aplicações da impregnação a vácuo (IV)

A impregnação a vácuo (IV) tem sido aplicada como uma alternativa aos processos osmótico-difusivos. Vários trabalhos têm relatado a aplicação de vácuo em processos de desidratação osmótica de frutas, como alternativa para melhorar a impregnação de um soluto e diminuir o tempo de contato necessário entre as fases líquida e sólida (MARTÍNEZ-MONZO et al., 1998; MÚJICA-PAZ et al., 2003; PAES, STRINGARI e LAURINDO, 2006).

A utilização da IV para obtenção de alimentos funcionais ou com componentes fisiologicamente ativos (PAC) também tem sido foco de estudos recentes. Neste caso, pode-se aplicar a IV para o enriquecimento de frutas e vegetais com minerais, vitaminas e outros componentes fisiologicamente ativos (FITO et al., 2001b; BETORET et al., 2003).

A utilização de vácuo também tem sido estudada para reduzir o tempo dos processos de salga aplicados a queijos (HOFMEISTER, SOUZA e LAURINDO, 2005), presunto (BARAT et al., 2005), peixe (CHIRALT et al., 2001b; BARAT et al., 2003) e carne de ave (DEUMIER et al., 2003; SCHMIDT, CARCIOFI e LAURINDO, 2008b). Na salga a vácuo, o ganho de sal é acelerado pela combinação do Mecanismo Hidrodinâmico (HDM) com os fenômenos difusivos promovidos pelos gradientes de concentração entre o produto e a solução.

Hofmeister, Souza e Laurindo (2005) realizaram um estudo comparativo entre a salga convencional e a salga a vácuo de queijo tipo Minas, utilizando soluções de salmoura a 22 % em massa de NaCl coloridas com azul de metileno. Após os processos de salga os queijos foram seccionados e fotografados para observação e registro do avanço do processo de penetração da solução salina, evidenciado pelo corante. Os autores relataram que o processo de salga a vácuo foi muito mais eficaz para a impregnação da solução salina colorida que o processo convencional.

Schmidt, Carciofi e Laurindo (2008b) avaliaram a influência da aplicação de um pulso inicial de vácuo no processo de salga de cortes de peito de frango. As amostras foram imersas em solução salina com 10 %

em massa de NaCl e foram avaliados dois processos: (a) inteiramente à pressão atmosférica (IPA) por 6 horas e (b) com aplicação de vácuo ( $P_1 = 10$  mmHg) por 15 minutos seguido de 5,75 horas a pressão atmosférica (IV). Após 6 horas de imersão, os autores verificaram que os cortes de peito de frango submetidos ao processo de IV apresentaram um incremento significativo de 78 % no ganho de água e de 25 % no ganho de sal, em relação aos ganhos de água e sal verificados para o processo inteiramente à pressão atmosférica. Deste modo, os autores destacam que a IV pode ser considerada como uma alternativa de processo para a salga de cortes de carne de frango. No entanto, deve-se estar atento para que os ganhos de água e sal sejam compatíveis com as exigências legais.

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho a técnica de IV é explorada para compensar parte da perda de massa que ocorre durante o resfriamento a vácuo de filés de peito de frango.

### 1.6. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA

Para um melhor entendimento das medidas de espectroscopia de impedância, utilizada neste trabalho para a possível predição de parâmetros de interesse durante o processamento de cortes de peito de frango, uma breve descrição dos conceitos de resistência e impedância elétrica é apresentada a seguir.

A resistência elétrica é uma propriedade bastante conhecida dos materiais e é definida como a oposição do material à circulação de corrente elétrica ou ainda, de acordo com a lei de ohm, como a razão entre o valor de uma tensão constante aplicada ao material e o valor da corrente constante que o percorre como consequência de tal aplicação de tensão. No entanto, por considerar apenas valores constantes de tensão e corrente, a medida de resistência elétrica é limitada em descrever as propriedades elétricas de um material. Isso se deve ao fato dos materiais frequentemente apresentarem não somente oposição à circulação de corrente elétrica, mas também oposição à variação do valor da corrente circulante em função da variação da tensão aplicada. Com isso, as propriedades elétricas de um material podem ser caracterizadas de forma mais completa se tensões variáveis forem também consideradas e relacionadas com as correntes variáveis resultantes. À grandeza que dimensiona tal relação, dá-se o nome de impedância elétrica (MACDONALD e BARSOUKOV, 2005).

A impedância é uma medida da oposição de circulação de correntes variáveis à aplicação de tensões também variáveis em um determinado material, sendo assim uma grandeza definida no domínio da frequência. Para facilitar o entendimento do conceito de impedância, considera-se primeiramente um sinal sinusoidal de tensão  $V(t)$  definido como:

$$V(t) = A_v \sin(2\pi ft) \quad (1.6)$$

onde  $A_v$  é a amplitude do sinal,  $f$  é a sua frequência e  $t$  a variável de tempo. Considerando a aplicação de tal sinal de tensão em um material definido como um sistema linear, o sinal de corrente que irá percorrer tal material pode ser descrito da seguinte forma (MACDONALD e BARSOUKOV, 2005; MASOT, 2010):

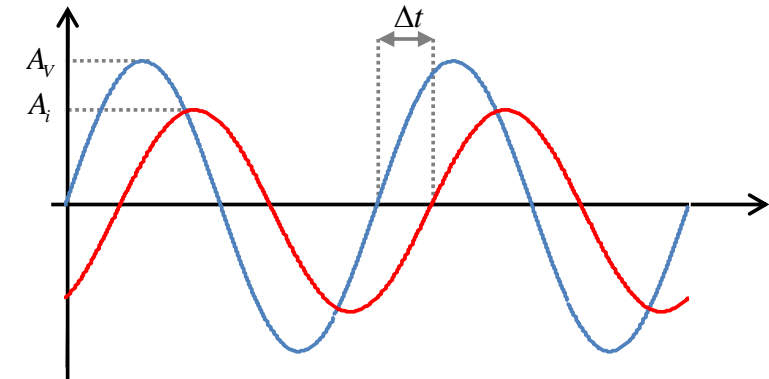
$$i(t) = A_i \sin(2\pi ft + \Delta t) \quad (1.7)$$

onde  $A_i$  é a amplitude do sinal de corrente e  $\Delta t$  uma defasagem temporal entre os sinais. Para facilitar a visualização, esboços dos sinais  $V(t)$  e  $i(t)$  estão apresentados na Figura 1.7. A relação entre o sinal de tensão  $V(t)$  e o sinal de corrente  $i(t)$ , tanto com respeito à amplitude quanto à defasagem, é descrita pela impedância. Como consequência, a impedância ( $Z$ ) é uma grandeza complexa que pode ser escrita na forma polar como (MASOT, 2010):

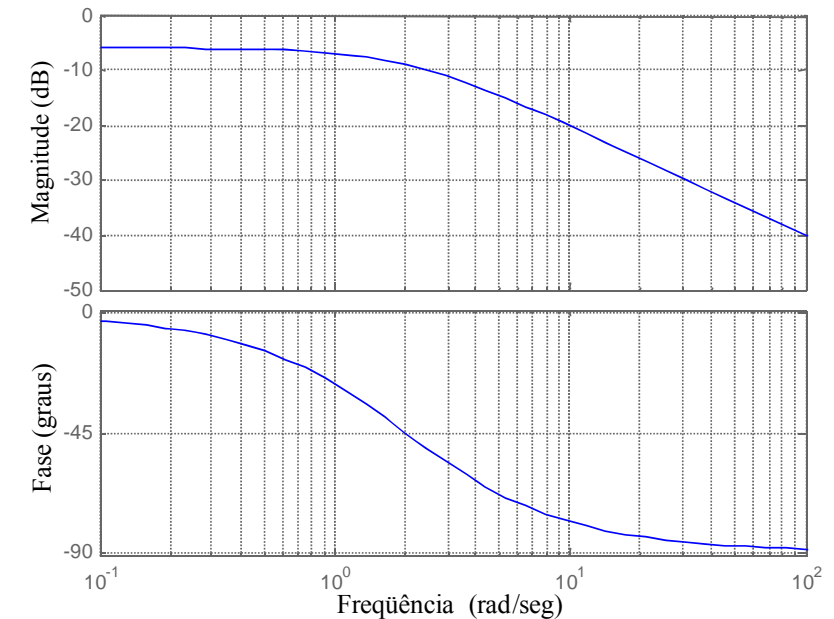
$$Z = |Z| e^{j\phi} \begin{cases} |Z| = \frac{A_v}{A_i} \text{ (magnitude)} \\ \phi = 2\pi f \Delta t \text{ (fase)} \end{cases} \quad (1.8)$$

onde  $|Z|$  é o módulo ou magnitude da impedância,  $\phi$  a fase definida em graus ou radianos e  $j$  a variável imaginária ( $j = \sqrt{-1}$ ).

Para cada valor de frequência, diferentes valores de magnitude (módulo) e fase da impedância podem ou não ser obtidos. Como consequência, a impedância é geralmente representada na forma de um diagrama de Bode, onde tanto o módulo quanto a fase são representados em função da frequência. Na Figura 1.8 é apresentado um exemplo de diagrama de Bode com a módulo representada em dB ( $20 \log_{10} |Z|$ ) e a fase em graus (MASOT, 2010).



**Figura 1.7** – Representação da evolução temporal de sinais de tensão e corrente, com destaque para as diferentes amplitudes ( $A_v$  e  $A_i$ ) e a defasagem ( $\Delta T$ ).



**Figura 1.8** – Diagrama de Bode.

A espectroscopia de impedância baseia-se na realização de medidas da impedância de um material em uma faixa (espectro) de frequências para posteriormente relacionar esse espectro com características de interesse do material. Por exemplo, a medição de impedância da água destilada irá resultar em impedâncias maiores do que as observadas para uma salmoura uma vez que nessa última a condução de corrente elétrica é facilitada pela presença de íons livres. Nesse caso é possível então relacionar o espectro de impedâncias com a concentração de sal presente na salmoura, considerando que maiores concentrações irão implicar na maior facilidade de circulação de corrente. O espectro de impedâncias pode ser relacionado com diversas outras características de um material, sendo as relações estabelecidas simples, como as variações de resistência e impedância observadas em função da concentração de sal em soluções salinas, ou mesmo propriedades mais complexas como variações de conteúdo de sal em carne suína picada (MASOT et al., 2010). Assim, em alguns casos as relações entre as medidas de impedância e as variáveis de interesse são diretas, enquanto que em outros casos métodos de regressão linear com múltiplas variáveis podem ser requeridos para estabelecer tal relação. O objetivo principal da análise multivariante é extrair a informação relevante de todo o conjunto, minimizando ou eliminando o ruído que possa existir, para a obtenção da resposta desejada (MASOT, 2010). Neste trabalho, visando estabelecer relações entre as medidas de impedância e os parâmetros de interesse dos cortes de peito de frango cozidos e resfriados (como a temperatura atingida pelas amostras durante o cozimento) o método de regressão por mínimos quadrados parciais (*partial least square* - PLS) foi utilizado. Esse método é brevemente descrito no Apêndice C.

### **1.6.1. Espectroscopia de impedância aplicada à indústria de alimentos**

No que diz respeito à indústria de alimentos, a espectroscopia de impedância tem demonstrado ser uma técnica de controle e análise com diversas aplicações. Mediante a interpretação correta do espectro de impedância pode-se caracterizar um processo complexo, determinar propriedades físico-químicas e sensoriais e até mesmo estabelecer procedimentos para garantir a qualidade dos alimentos através do monitoramento em tempo real de toda a produção (MASOT, 2010).

Damez et al. (2008) afirmaram que a medição de bioimpedância pode ser considerada um parâmetro válido para estimar o estado de maturação da carne bovina. A maturação da carne induz mudanças

estruturais que provocam uma diminuição das propriedades isolantes das membranas celulares. A mistura de eletrólitos intra e extracelular provoca uma variação das propriedades elétricas que podem ser determinadas com sucesso através da espectroscopia de impedância.

Chanet, Rivière e Eynard (1999) utilizaram a técnica de espectroscopia de impedância para estimar o teor de água e lipídeos durante o processamento de carne suína picada enlatada e verificaram uma excelente relação entre esses parâmetros e as medidas de impedância. Dessa forma, os autores destacam que essa técnica pode ser utilizada para estabelecer medidas prévias corretivas antes de enlatar o alimento, em caso de se detectar desvios significativos nos teores pré-estabelecidos de umidade e lipídeos.

Guerrero et al. (2004) avaliaram se a espectroscopia de impedância, medida em cortes de carne suína não curados (depois de 36 horas *post mortem*), poderia determinar algumas propriedades sensoriais do presunto curado. Os resultados obtidos mostraram uma relação entre certos parâmetros elétricos e atributos relacionados à textura que poderia levar ao estabelecimento de critérios para a seleção da matéria-prima. Da mesma forma, Oliver et al. (2001) demonstraram a correlação existente entre a impedância elétrica e a aptidão tecnológica da carne para submeter-se a um processo de cura. Sugeriram, assim, um critério para a seleção de peças de carne para a produção de presunto curado.

Niu e Lee (2000) avaliaram as alterações produzidas em vários parâmetros dielétricos de diferentes tipos de peixes durante o armazenamento com o objetivo de se estabelecer seu grau de frescura. Os resultados obtidos foram capaz de prever o início da decomposição.

Lizhi, Toyoda e Ihara (2010) examinaram a capacidade da espectroscopia de impedância para identificar a adulteração de azeite de oliva com outros óleos vegetais. Os resultados mostraram que essa técnica pode ser usada com sucesso para detectar adulterações, inclusive para índices de adulterantes inferiores a 5%.

Kitamura Toyoda e Park (2000) avaliaram o uso da espectroscopia de impedância na predição de parâmetros de interesse durante a produção de iogurte. Esses autores observaram uma excelente relação entre as medidas de impedância e parâmetros do processo como acidez e consistência. Desta forma, os autores destacam as vantagens desse método, como resposta rápida e caráter não-destrutivo, podendo ser utilizado para monitoramento *on-line* durante o processamento.

***DESENVOLVIMENTO DO  
DISPOSITIVO PARA O PROCESSO  
INTEGRADO DE COZIMENTO-  
RESFRIAMENTO A VÁCUO***

Neste capítulo é apresentado em detalhes o dispositivo experimental desenvolvido neste trabalho, o qual permite que os processos de cozimento e resfriamento a vácuo sejam realizados em um mesmo equipamento, bem como os resultados preliminares que mostram a viabilidade técnica da integração desses processos no processamento de filés de peito de frango. Esses resultados originaram uma publicação intitulada *Integrated cooking and vacuum cooling of chicken breast cuts in a single vessel* no periódico *Journal of Food Engineering* (v. 100 (2), p. 219-224, 2010).

## 2.1. INTRODUÇÃO

A utilização de cortes de carne para a elaboração de produtos com alto valor agregado (refeições prontas refrigeradas, por exemplo) ou como um ingrediente em produtos a base de carne deve ser vinculada a processos de fabricação eficientes e seguros. Assim, técnicas para obter um resfriamento rápido e homogêneo de cortes de carnes submetidos ao processo de cozimento são de grande importância para a indústria. Neste contexto, o resfriamento a vácuo tem ganhado destaque frente aos métodos tradicionais de resfriamento. Entretanto, a excessiva perda de massa decorrente da evaporação da água do produto durante o resfriamento a vácuo ainda representa um problema significativo para a aplicação desta técnica na indústria.

Esforços para tornar o resfriamento a vácuo de carnes um processo mais atrativo, não comprometendo a qualidade sensorial deste tipo de produto, têm sido foco de estudos recentes. O objetivo principal é encontrar alternativas para reduzir ou compensar a perda de massa decorrente da evaporação da água do produto durante o resfriamento a vácuo. Alguns trabalhos de pesquisa têm demonstrado que o resfriamento a vácuo realizado com peças de presunto e carne bovina imersas na solução de cozimento (*immersion vacuum cooling*) pode reduzir significativamente a perda de massa associada ao processo, além de proporcionar um incremento nos parâmetros de qualidade do produto resfriado (HOUSKA et al., 2003, 2005; CHENG e SUN, 2006a, 2006b; DRUMMOND e SUN, 2008; DRUMMOND et al., 2009).

Outra importante característica do processo de resfriamento a vácuo é a possibilidade da sua integração com o tratamento térmico. Assim, um mesmo equipamento pode ser utilizado para ambos os processos (cozimento e resfriamento) sem a necessidade da transferência do produto, evitando a manipulação excessiva do mesmo e o consequente risco de contaminação microbiológica. Apesar da possibilidade dessa integração ser citada na literatura (MCDONALD e SUN, 2000; DRUMMOND e SUN, 2008), este tema não tem sido extensivamente estudado. Neste contexto, o objetivo desta etapa do trabalho foi desenvolver um dispositivo para a realização do processo integrado de cozimento e resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango em um mesmo recipiente. Assim, três processos integrados foram comparados com respeito à perda de massa e ao tempo de processamento: (i) cozimento com vapor, seguido do resfriamento a vácuo (CV-RV); (ii) cozimento por imersão em água, seguido da

drenagem da água de cozimento e posterior resfriamento a vácuo (CI-RV); e (iii) cozimento por imersão em água, seguido do resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (CI-RVI).

## 2.2. MATERIAL E MÉTODOS

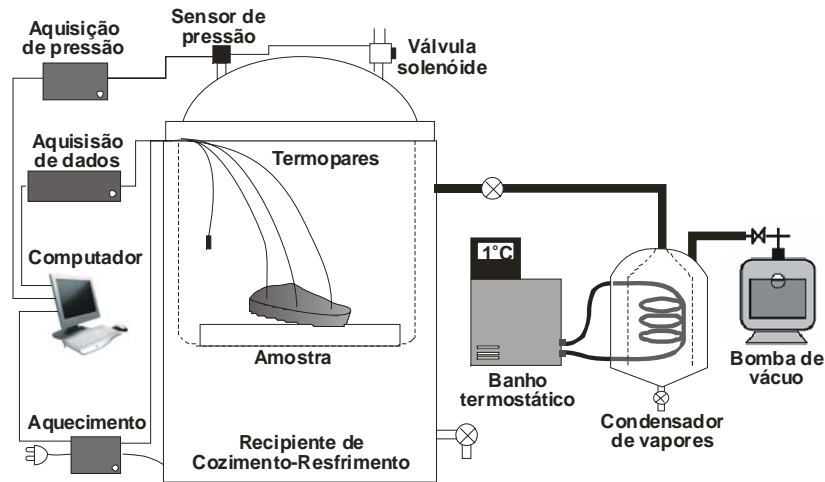
### 2.2.1. Dispositivo experimental

Na primeira etapa deste trabalho de pesquisa, um dispositivo experimental original foi desenvolvido com o objetivo de integrar em um mesmo equipamento (recipiente) os processos de cozimento e resfriamento a vácuo de filés de peito de frango. Tal dispositivo, apresentado na Figura 2.1, consiste de uma autoclave adaptada (volume de 18 L) conectada a um sistema de bombeamento de ar e vapor de água e um sistema de condensação. O bombeamento da mistura ar-vapor de água é realizado por uma bomba de vácuo, com vazão nominal de  $350 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (DVP, modelo LC.305, Itália). O sistema de condensação é constituído por um recipiente hermeticamente fechado (volume de 5 L), o qual contém uma serpentina alimentada com água gelada ( $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) proveniente de um banho termostático (Microquímica, modelo MQBMP-01). Esse sistema é necessário para condensar e drenar os vapores gerados a partir da evaporação da água do produto durante o resfriamento a vácuo. Conforme mencionado no Capítulo 1, esses vapores apresentam um elevado volume específico a baixas pressões (como as utilizadas durante o resfriamento) e, portanto, devem ser removidos para aliviar o sistema de vácuo.

As amostras são alocadas na câmara no interior de um cesto perfurado de aço inoxidável e sobre uma tela suspensa com suportes de borracha. A tela é utilizada para evitar o contato entre a amostra e o metal do cesto, reduzindo, assim, a transferência de calor entre os mesmos durante o processamento.

O monitoramento da temperatura das amostras e do ar no interior da câmara é realizado através de termopares tipo T (IOPE, modelo A-TX-TF-TF-R-30AWG, Brasil) conectados a um sistema de aquisição de dados (Agilent, modelo 34970A, Malásia). Todos os termopares foram calibrados na faixa de temperatura entre 0 e  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  com auxílio de um banho termostático (marca Microquímica, Modelo MQBMP-01, Brasil), utilizando um termômetro de mercúrio aferido como padrão (Incotherm, Porto Alegre, RS, Brasil). As curvas de calibração estão apresentadas no Apêndice A.

A aquisição da pressão na câmara é realizada através de um sensor de pressão (Freescale, modelo MPX2102, EUA) conectado a um sistema de aquisição de dados monitorado por um *software* especialmente desenvolvido para este fim. Esse sistema de aquisição também permite o controle da pressão na câmara através do acionamento de uma válvula solenóide (marca Ascoval, modelo UA261A516V, Brasil) acoplada ao equipamento.

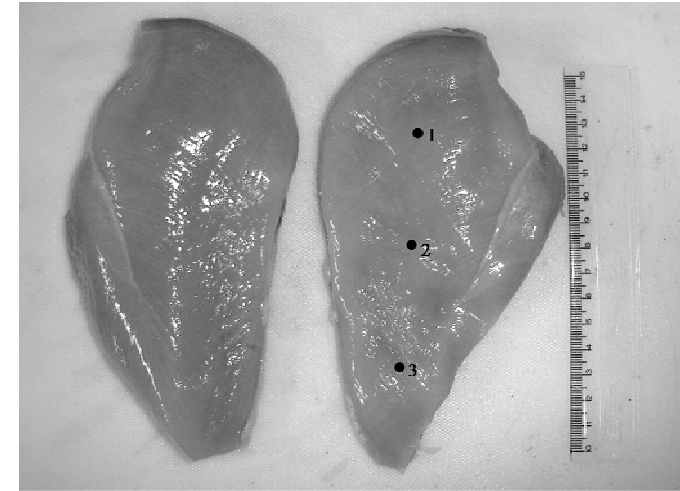


**Figura 2.1** – Esquema do dispositivo experimental para realização dos processos integrados de cozimento e resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango.

### 2.2.2. *Matéria-prima e preparo das amostras*

As amostras utilizadas nos experimentos foram filés de peito de frango sem osso e sem pele de aves abatidas com 42 dias de idade e provenientes de uma mesma unidade produtora (Tyson do Brasil Ltda, São José, SC, Brasil), conforme ilustrado na Figura 2.2.

O pH da carne foi medido em três diferentes pontos através de um potenciômetro digital com eletrodo de penetração (marca Analion, modelo PH-730, Brasil), previamente calibrado com as soluções de pH 7,00 e pH 4,00. Somente amostras com pH entre 5,80 e 6,10 e massa entre 180 e 230 g foram utilizadas nos ensaios, com o objetivo de minimizar as possíveis variações nos resultados devido à heterogeneidade da matéria-prima.



**Figura 2.2** – Ilustração das amostras de filés de peito de frango (meio peito) utilizadas nos experimentos. Os pontos 1, 2 e 3 indicam as três diferentes posições de inserção dos termopares (inseridos até a metade da espessura de cada seção).

O teor de umidade inicial dos filés de peito de frango foi determinado para cada lote avaliado através do método gravimétrico (3 amostras de cada lote, avaliadas em triplicata). Este método consiste na secagem das amostras em estufa a 105 °C por 24 horas (AOAC, 2000). A massa do recipiente (previamente seco em estufa por 24 horas) e a massa do recipiente com a amostra antes e após a secagem foram determinadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g (SHIMADZU, Modelo AY220). A porcentagem de umidade expressa em g de água por 100 g de amostra foi calculada de acordo com a Equação 2.1.

$$\text{teor de umidade (g água/ 100 g de amostra)} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_r)} \cdot 100 \quad (2.1)$$

onde  $m_r$  é a massa do recipiente (g);  $m_1$  é a massa do conjunto amostra-recipiente antes da secagem e  $m_2$  é massa do conjunto amostra-recipiente após a secagem (g).

### 2.2.3. Metodologia experimental

Foram avaliados os seguintes processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo: (i) cozimento com vapor, seguido do resfriamento a vácuo (CV-RV); (ii) cozimento por imersão em água, seguido da drenagem da água de cozimento e posterior resfriamento a vácuo (CI-RV); e (iii) cozimento por imersão em água, seguido do resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (2 L) (CI-RVI). Foram realizadas seis repetições de cada método, com uma amostra de filé de peito de frango por experimento.

O monitoramento da temperatura da amostra durante o processo integrado foi realizado através de termopares inseridos em três diferentes seções no filé de peito de frango (em destaque na Figura 2.2). A espessura média de cada seção foi de: 28 mm no ponto 1; 14 mm no ponto 2; e 6 mm no ponto 3. Os termopares foram inseridos até a metade da espessura de cada seção. Também foram monitoradas as temperaturas da mistura ar-vapor na câmara e da água de imersão, esta última durante os tratamentos (ii) e (iii). A aquisição das temperaturas foi realizada com intervalo de amostragem de 1 segundo.

O início do processo de cozimento foi marcado pela inserção das amostras na câmara pré-aquecida a 100 °C [utilizando vapor para o tratamento (i) e água para os tratamentos (ii) e (iii)]. O cozimento foi realizado à pressão atmosférica e até a temperatura da amostra atingir 80 °C ± 1 °C no ponto correspondente à metade da maior espessura. Antes do acionamento da bomba de vácuo (início do processo de resfriamento), a água utilizada para a produção de vapor na câmara no processo CV-RV e para o cozimento no processo CI-RV foi drenada. O início do processo de resfriamento a vácuo foi marcado pelo fechamento hermético da câmara e o acionamento da bomba de vácuo.

### 2.2.4. Parâmetros do processo, determinações analíticas e ensaios mecânicos

Os parâmetros determinados para cada processo foram: a perda de massa global ( $\Delta m_G$ ), a perda de massa no cozimento ( $\Delta m_C$ ), a perda de massa no resfriamento ( $\Delta m_R$ ) e a redução média de temperatura por percentual de perda de massa ( $\eta_T$ ). O parâmetro  $\Delta m_G$  representa a porcentagem de perda de massa da amostra após o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo, em relação à massa da amostra *in natura* (massa inicial) (Equação 2.2). O parâmetro  $\Delta m_C$  representa a

porcentagem de perda de massa da amostra após o cozimento (também em relação à massa da amostra *in natura*) e foi obtido em experimentos preliminares onde somente a etapa de cozimento foi avaliada (6 repetições para cada método de cozimento estudado) (Equação 2.3). Dessa forma, a abertura da câmara durante o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo foi evitada. O parâmetro  $\Delta m_R$  representa a porcentagem de perda de massa da amostra após o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo, em relação à massa da amostra cozida (Equação 2.4). Neste caso, a massa da amostra cozida foi estimada a partir do valor médio de  $\Delta m_C$  (média das 6 repetições,  $\overline{\Delta m_C}$ ) e da massa da amostra *in natura* para evitar a interrupção do processo integrado. O parâmetro  $\eta_T$  para cada processo integrado avaliado foi calculado através do quociente entre a redução média de temperatura da amostra durante a etapa de resfriamento ( $\Delta T$  no centro da posição 1 - Figura 2.2) e a perda de massa durante esta etapa ( $\Delta m_R$ ), de acordo com a Equação 2.5.

$$\Delta m_G = \frac{m_o - m_R}{m_o} \cdot 100 \quad (2.2)$$

$$\Delta m_C = \frac{m_o - m_C}{m_o} \cdot 100 \quad (2.3)$$

$$\Delta m_R = \frac{m_{Ce} - m_R}{m_{Ce}} \cdot 100 \quad \text{com } m_{Ce} = m_o \cdot \left( 1 - \frac{\overline{\Delta m_C}}{100} \right) \quad (2.4)$$

$$\eta_T = \frac{\Delta T_1}{\Delta m_R} \quad (2.5)$$

onde  $m_o$  é a massa inicial da amostra (*in natura*),  $m_C$  é a massa da amostra após o cozimento,  $m_{Ce}$  é a massa estimada da amostra após o cozimento e  $m_R$  é a massa da amostra após o processo integrado de cozimento-resfriamento. Todos os parâmetros foram expressos como a média dos valores obtidos nas seis repetições de cada processo.

#### 2.2.4.1. Determinação dos teores de umidade

Após a pesagem das amostras submetidas aos diferentes processos integrados (6 repetições de cada processo), três filés foram



totalmente triturados separadamente e tomaram-se alíquotas para a determinação dos seus teores de umidade através do método gravimétrico (AOAC, 2000). Essas determinações foram realizadas em triplicata para cada filé de peito de frango cozido e resfriado analisado.

#### 2.2.4.2. Ensaios mecânicos

As propriedades mecânicas dos filés de peito de frango cozidos e resfriados foram avaliadas através da medida da força física necessária para cortar uma porção da amostra (força de cisalhamento), utilizando uma lâmina Warner-Bratzler acoplada a um texturômetro equipado com uma célula de carga de 250N (marca Stable Micro Systems, modelo TA-TX2, Inglaterra). Paralelepípedos com dimensões de 13 mm × 13 mm × 30 mm foram obtidos do centro de cada amostra (da seção de maior espessura), envoltos com filme plástico e mantidos a 10 °C até a realização do teste. Foram selecionadas as amostras mais homogêneas disponíveis, uma vez que o tamanho e a geometria das mesmas têm um efeito significativo na medida instrumental da textura (VELAND e TORRISEN, 1999). A força de cisalhamento foi medida perpendicularmente à orientação das fibras musculares e com velocidade de corte de 5 mm s<sup>-1</sup>, de acordo com a metodologia apresentada por Barbut, Zhang e Marcone (2005) e Drummond e Sun (2006). A média dos valores de no mínimo nove repetições para cada processo foi considerada para a análise estatística.

#### 2.2.5. Análise estatística

O tratamento estatístico dos dados obtidos foi realizado com o auxílio do *software* STATISTICA® 7.0. Com o objetivo de verificar a existência de diferenças significativas entre os parâmetros avaliados nos diferentes processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo foi realizada análise de variância simples (ANOVA). O teste de Tukey foi utilizado para a comprovação das médias a um nível de significância de 5 %.

### 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 2.3.1. Perfis de temperatura durante os processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo de filés de peito de frango.

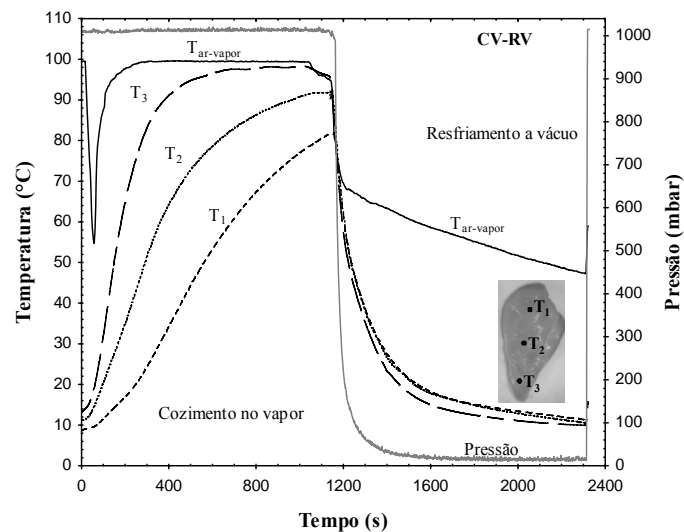
Os perfis de temperatura das amostras submetidas aos diferentes processos integrados de cozimento e resfriamento a vácuo (CV-RV, CI-RV e CI-RVI) são apresentados nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5. As evoluções da temperatura da mistura ar-vapor na câmara ( $T_{\text{ar-vapor}}$ ), da temperatura da água de cozimento ( $T_{\text{água}}$ ) e da pressão na câmara durante o processo também são apresentadas nessas figuras. Conforme mencionado anteriormente, a temperatura nos filés de peito de frango foi monitorada em três posições da amostra com diferentes espessuras, como indicado por  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  em destaque na Figura 2.2. O processo de cozimento foi realizado até a temperatura na metade da maior espessura atingir 80 °C ( $T_1$ ). Por simplicidade e para uma melhor visualização dos dados, somente os resultados de uma repetição são apresentados nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

Observa-se nas Figuras 2.3 a 2.5 que a duração da etapa de cozimento para todos os processos foi de aproximadamente 1100 segundos (~18 minutos), independente do método de cozimento utilizado (vapor ou imersão em água). Após o cozimento, a bomba de vácuo foi acionada e iniciou-se a etapa de resfriamento. Nessa etapa, a redução da pressão na câmara provocou uma rápida redução na temperatura das amostras (ver Figuras 2.3, 2.4 e 2.5). A pressão mínima obtida na câmara durante a etapa de resfriamento dos processos integrados CV-RV e CI-RV foi de aproximadamente 15 mbar, o que proporcionou o resfriamento das amostras até 11 °C ± 1 °C (Figuras 2.3 e 2.4). Para o processo CI-RVI, a taxa de redução da pressão a partir de 200 mbar foi menor do que a taxa obtida nos processos CV-RV e CI-RV. Essa diferença na taxa de redução da pressão pode ser explicada pela maior quantidade de vapor gerado no processo de resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento. A pressão mínima obtida foi de aproximadamente 19 mbar e as amostras foram resfriadas em média até 14 °C ± 1 °C (Figura 2.5).

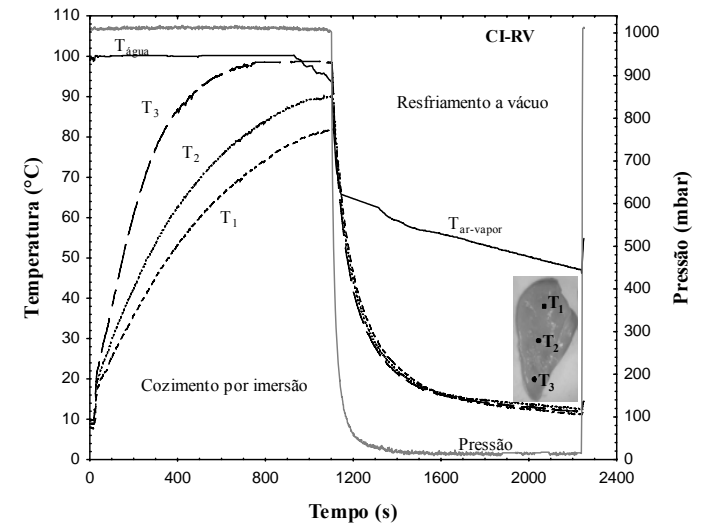
Ainda nas Figuras 2.3 a 2.5, nota-se que o resfriamento das amostras para os três processos avaliados foi bastante homogêneo, mesmo apresentando uma diferença de temperatura de aproximadamente 20 °C (diferença entre  $T_1$  e  $T_3$ ) ao final da etapa de cozimento (início do resfriamento). Isso demonstra que a evaporação da

água durante o resfriamento a vácuo ocorre na superfície da carne e nos poros conectados a ela, promovendo uma distribuição uniforme da temperatura do produto. Sun e Wang (2000) avaliaram o resfriamento a vácuo de carne de porco e também verificaram uma distribuição de temperatura homogênea no produto, nas distâncias entre 20 e 80mm da superfície da amostra. Huber e Laurindo (2006) avaliaram a relação entre o coeficiente de evaporação ( $k$ ) e a superfície para a transferência de massa ( $S$ ) durante o resfriamento a vácuo de carnes pré-cozidas de diferentes dimensões. Para cortes de peito de frango cozido, os autores verificaram uma tendência de relação linear entre o produto  $k.S$  e o volume da amostra, indicando que a evaporação da água também ocorre no interior do tecido da carne (poros).

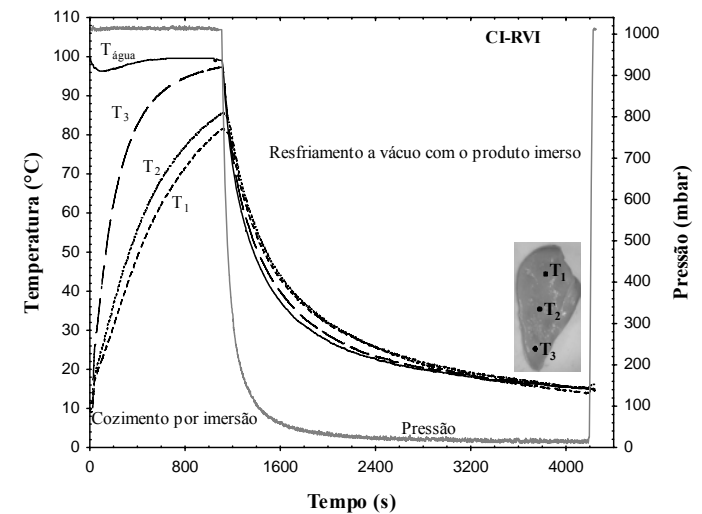
A variação brusca da temperatura da mistura ar-vapor na câmara ( $T_{ar-vapor}$ ) durante os primeiros instantes do processo CV-RV (Figura 2.3) deve-se a abertura da câmara para a inserção das amostras. Durante a etapa de resfriamento dos processos CV-RV e CI-RV (Figuras 2.3 e 2.4), a  $T_{ar-vapor}$  foi gradualmente reduzida a 48 °C. Essa temperatura é uma consequência da temperatura do vapor liberado pela amostra durante o resfriamento a vácuo e da transferência de calor por radiação das paredes da câmara para o sensor.



**Figura 2.3** – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango durante o processo integrado de cozimento com vapor seguido do resfriamento a vácuo (CV-RV).



**Figura 2.4** – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango durante o processo integrado de cozimento por imersão em água, seguido da drenagem da água de cozimento e posterior resfriamento a vácuo (CI-RV).



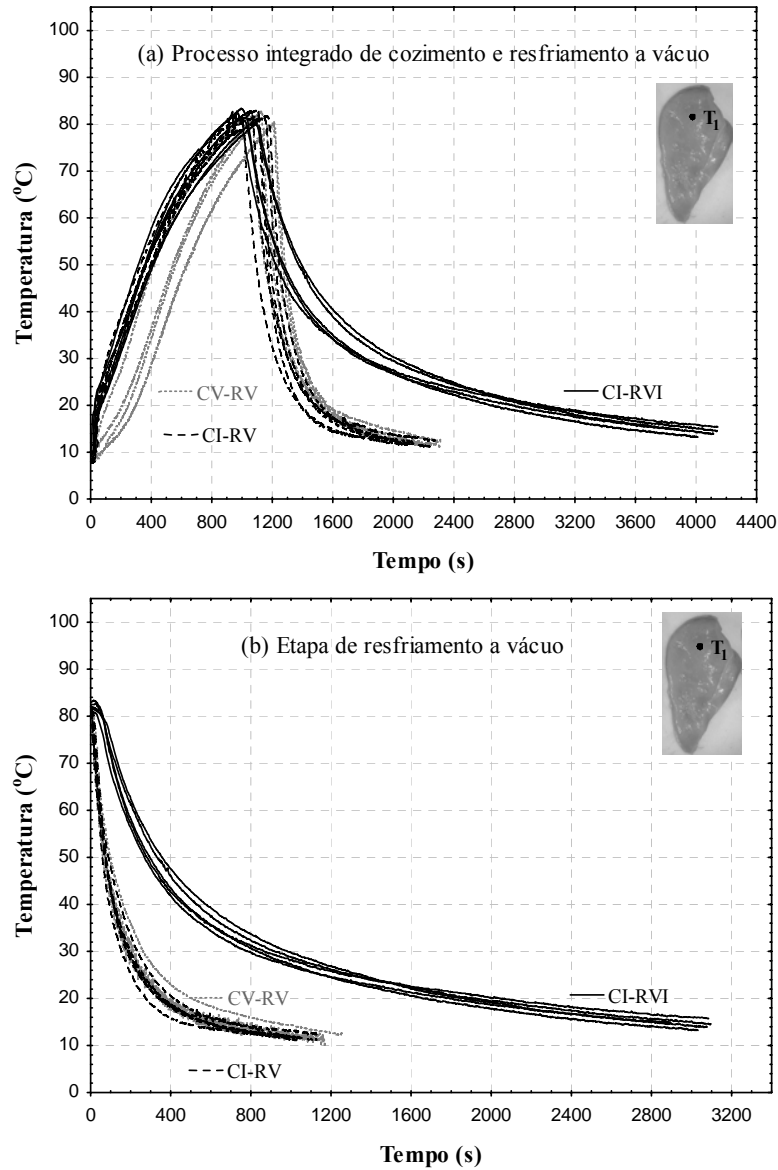
**Figura 2.5** – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango durante o processo integrado de cozimento por imersão em água seguido do resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (CI-RVI).

A comparação entre os perfis de temperatura na amostra obtidos nas diferentes repetições dos processos integrados CV-RV, CI-RV e CI-RVI é apresentada na Figura 2.6. Os perfis de temperatura apresentados nessa figura correspondem à seção de maior espessura das amostras ( $T_1$ ). Nota-se na Figura 2.6a a similaridade nos resultados para cada processo integrado analisado. As pequenas variações nos perfis de temperatura, entre as repetições de cada processo, podem ser atribuídas às diferenças de espessura dos filés de peito de frango e à imprecisão no posicionamento dos termopares na amostra (fatores que afetam o tempo da etapa de cozimento).

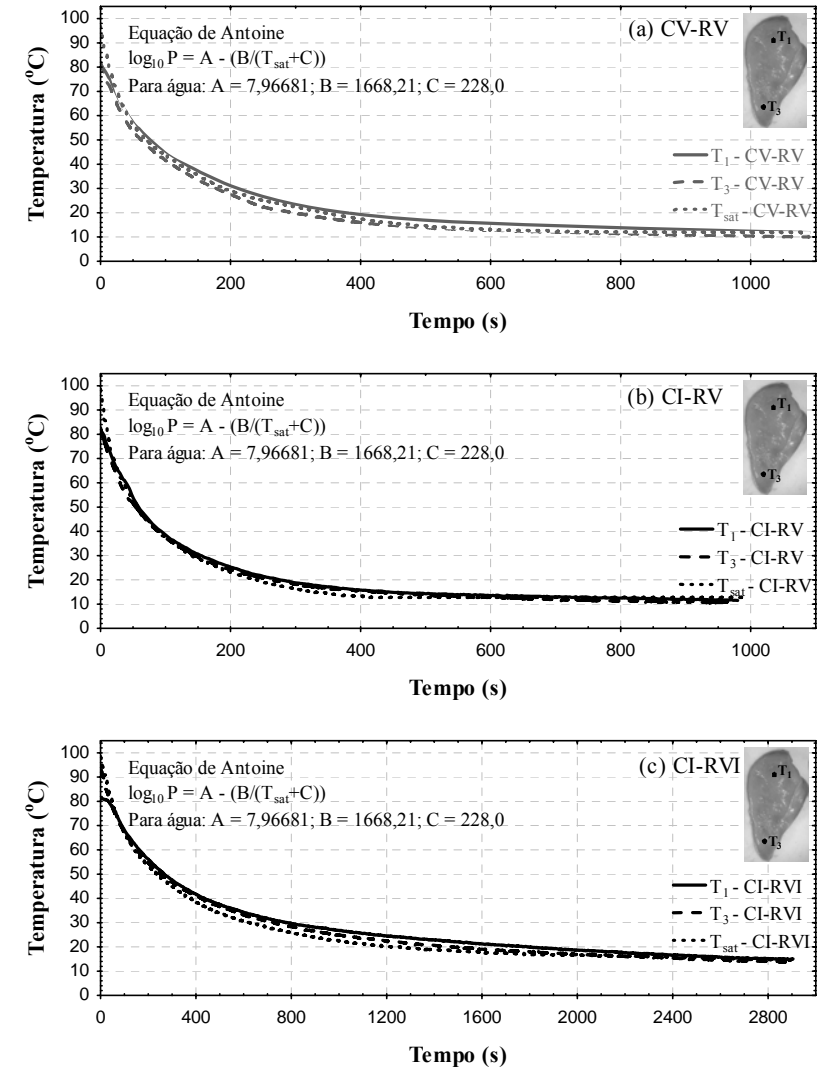
Na Figura 2.6b são apresentados os perfis de temperatura nas amostras durante a etapa de resfriamento a vácuo dos diferentes processos integrados avaliados (CV-RV, CI-RV e CI-RVI). Observa-se que as taxas de resfriamento para os processos de CV-RV e CI-RV foram similares, o que era esperado, visto que o sistema foi submetido à mesma taxa de redução de pressão durante os dois processos (ver Figuras 2.3 e 2.4). O tempo para o resfriamento das amostras de aproximadamente 80 °C (maior espessura) até 14 °C foi em torno de 800 segundos (~ 13 minutos), com um adicional de 200 segundos para o resfriamento até 11°C. Para o processo CI-RVI, o tempo de resfriamento dos filés de peito de frango até 14 °C foi de aproximadamente 2800 segundos (~ 47 minutos), sendo este valor 3,5 vezes maior que o tempo de resfriamento verificado nos processos CV-RV e CI-RV para a mesma variação de temperatura. Drummond et al. (2009) compararam o resfriamento de carne bovina cozida (~1kg) pelos métodos de resfriamento com ar forçado (AF), resfriamento a vácuo convencional (RV) e resfriamento a vácuo com o produto imerso em água (RVI). O tempo de resfriamento das amostras de 72 °C até 4 °C pelo método RVI foi praticamente duas vezes maior (195 minutos) que o tempo de RV (100 minutos), porém inferior ao tempo de resfriamento com AF (315 minutos). Esses autores relatam que durante o RVI, com a redução na pressão na câmara a uma taxa constante, as amostras são primeiramente resfriadas pela evaporação da água na superfície e nos poros da carne e também, em menor parte, pela evaporação do líquido de cozimento, resfriando os arredores do produto. Posteriormente, com a redução na taxa de queda da pressão, surge um gradiente de temperatura entre as diferentes áreas do tecido muscular, promovendo a transferência de calor por condução. Esse calor é liberado por convecção a partir da superfície da carne para a solução de cozimento, sendo que a agitação do líquido (promovida pelas bolhas de vapor gerado) intensifica o

processo convectivo. Desta forma, a taxa de resfriamento verificada nesse período (onde a taxa de queda da pressão é menor) tende a ser menor em comparação com o resfriamento a vácuo convencional devido à baixa condutividade térmica da carne. Por outro lado, como as amostras utilizadas neste trabalho foram menores (~ 210 g), não foram verificados gradientes significativos de temperatura nos filés de peito de frango durante a etapa de resfriamento do processo CI-RVI. Portanto, a menor taxa de resfriamento das amostras submetidas ao processo CI-RVI (em comparação com os processos CV-RV e CI-RV) deve-se principalmente à menor taxa de redução da pressão na câmara devido à maior quantidade de vapor gerado nesse processo.

Na Figura 2.7 é apresentada uma comparação entre os perfis de temperatura na amostra na seção de maior e menor espessura ( $T_1$  e  $T_3$ ) durante a etapa de resfriamento dos processos CV-RV, CI-RV e CI-RVI e a temperatura de saturação da água na pressão do sistema. A temperatura de saturação da água foi determinada através da Equação de Antoine (em detalhe na Figura 2.7), utilizando os valores de pressão na câmara medidos durante a etapa de resfriamento. Observa-se, para todos os processos avaliados, que a temperatura das amostras foi muito próxima da temperatura de saturação da água para cada valor de pressão medido. Nesses casos, o resfriamento a vácuo pode ser considerado um processo isoentálpico, no qual o resfriamento é obtido somente pela evaporação da água da própria amostra. Adicionalmente, pode-se afirmar que não há atraso no processo de resfriamento evaporativo, i.e., a redução da temperatura ocorre simultaneamente à redução da pressão na câmara.



**Figura 2.6** – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango para todas as repetições de cada processo considerado (CV-RV, CI-RV e CI-RVI). (a) Durante todo o processo integrado de cozimento e resfriamento a vácuo; (b) durante a etapa de resfriamento a vácuo.



**Figura 2.7** – Comparação entre os perfis de temperatura na amostra e a temperatura de saturação da água calculada através da Equação de Antoine a partir dos valores de pressão na câmara. (a) CV-RV; (b) CI-RV e (c) CI-RVI.

### 2.3.2. Parâmetros avaliados para os processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo de filés de peito de frango

Os parâmetros determinados para cada processo integrado são apresentados na Tabela 2.1. Os valores de perda de massa no cozimento verificados em todos os processos não apresentaram diferenças significativas ( $p > 0.05$ ) e foram de aproximadamente 19 % da massa inicial da amostra. Essa perda de massa durante o cozimento está associada principalmente à redução da capacidade de retenção de água pelo músculo, a qual é uma consequência da desnaturação das proteínas e do encolhimento das fibras miofibrilares e do tecido conjuntivo (BENDALL e RESTALL, 1983).

Com respeito à perda de massa global, os resultados obtidos apresentaram uma diferença estatisticamente significativa ( $p < 0.05$ ) entre os três processos integrados de cozimento e resfriamento a vácuo. No entanto, a diferença entre a perda de massa global das amostras submetidas aos processos CV-RV e CI-RV foi pequena considerando a variabilidade inerente à matéria-prima e as imprecisões experimentais. Por outro lado, uma diferença considerável foi observada entre a perda de massa global das amostras submetidas ao processo CI-RVI (22,1 %) e a perda de massa global observada nos processos CV-RV (29,8 %) e CI-RV (27,7 %).

Os valores médios da perda de massa no resfriamento das amostras submetidas aos processos integrados CV-RV e CI-RV (processos com o mesmo  $\Delta T$  durante o resfriamento) foram de 12,7 % e 10,6 %, respectivamente. Essa diferença pode estar relacionada com uma maior quantidade de água aderida à superfície do peito de frango após a etapa de cozimento por imersão no processo CI-RV. Esse excesso de água superficial não é removido durante o processo integrado (pois não há manipulação da amostra) e a sua evaporação durante o resfriamento a vácuo contribuiu para o resfriamento da amostra com uma menor perda efetiva de água. Assim, o processo CI-RV pode ser considerado equivalente ao uso da técnica de aspersão de água no produto antes do resfriamento a vácuo, o que, segundo diversos autores, implica em uma menor perda de água (McDONALD e SUN, 2000; APATI et al., 2006; ZHANG e SUN, 2006).

As amostras submetidas ao processo integrado de cozimento e resfriamento a vácuo com produto imerso na água de cozimento (CI-RVI) apresentaram uma considerável redução na perda de massa durante a etapa de resfriamento (apenas 3,7 % em relação à massa da amostra após o cozimento) em comparação aos processos CV-RV (12,7 %) e CI-

RV (10,6 %) (Tabela 2.1). Isso se deve ao fato da perda de massa durante o resfriamento a vácuo ser em parte compensada pela impregnação da água nos poros da carne ao final do processo (com o restabelecimento da pressão atmosférica). Tal impregnação ocorre devido à ação do mecanismo hidrodinâmico, resultante dos gradientes macroscópicos de pressão, o que leva ao preenchimento dos poros do tecido muscular pelo líquido de imersão (CHIRALT et al., 2001; SCHMIDT, CARCIOFI e LAURINDO, 2008b). Drummond et al. (2009) e Cheng e Sun (2006a) também observaram uma importante redução na perda de massa de cortes de carne bovina e suína após o resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento.

**Tabela 2.1** - Parâmetros avaliados para os diferentes processos integrados de cozimento e resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão.

Processo Cozimento e Resfriamento	Perda de massa no cozimento (%)	Perda de massa global (%)	Perda de massa no resfriamento (%)	Teor de umidade final (g água/100 g amostra)	$\eta_T$ ( $^{\circ}\text{C}/1\%$ )	$F_{\text{máx}}$ (N)
CV-RV	19,6 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	29,8 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	12,7	66,7 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	5,5	40,8 $\pm$ 5,7 <sup>a</sup>
CI-RV	19,1 $\pm$ 1,1 <sup>a</sup>	27,7 $\pm$ 1,2 <sup>b</sup>	10,6	67,4 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	6,6	35,8 $\pm$ 7,2 <sup>a</sup>
CI-RVI	19,1 $\pm$ 1,1 <sup>a</sup>	22,1 $\pm$ 2,1 <sup>c</sup>	3,71	70,9 $\pm$ 0,5 <sup>b</sup>	18,1	24,7 $\pm$ 2,9 <sup>b</sup>

<sup>a-c</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

$\eta_T$ : redução média de temperatura por percentual de perda de massa.

$F_{\text{máx}}$ : força máxima de corte (cisalhamento).

A redução média de temperatura por percentual de perda de massa ( $\eta_T$ ) representa o quociente entre a redução total de temperatura da amostra durante o resfriamento ( $\Delta T_1$ ) e a perda de massa percentual observada nesta etapa. Através dessa relação pode-se avaliar a eficiência do processo de resfriamento a vácuo. Valores de  $\eta_T$  igual a 5,5  $^{\circ}\text{C}/1\%$  e 6,6  $^{\circ}\text{C}/1\%$  foram observados para os processos CV-RV e CI-RV, respectivamente (Tabela 2.1). Outros autores encontram valores similares de  $\eta_T$  durante o resfriamento a vácuo de cortes de carne bovina e de frango, os quais foram entre 6,5  $^{\circ}\text{C}/1\%$  e 7,0  $^{\circ}\text{C}/1\%$  de perda de massa (McDONALD et al., 2001, McDONALD e SUN, 2001b;

HUBER e LAURINDO, 2005). O processo integrado CI-RVI foi mais eficiente no que diz respeito à variação de temperatura por percentual de perda de massa ( $\eta_T = 18,1^\circ\text{C}/1\%$ ). No entanto, apesar desse processo apresentar o maior valor de  $\eta_T$ , a taxa de resfriamento foi menor em relação aos processos CV-RV e CI-RV, conforme discutido anteriormente.

O teor de umidade médio das amostras de filés de peito de frango *in natura* foi de  $75,5 \pm 0,3$  g água/100 g de produto (valor médio  $\pm$  desvio padrão). Após o processamento, observa-se a partir dos resultados apresentados na

Tabela 2.1, que não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre os teores de umidade das amostras cozidas e resfriadas pelos processos CV-RV (66,7 g água/100 g de produto) e CI-RV (67,4 g água/100 g de produto). No entanto, as amostras submetidas ao processo CI-RVI apresentaram um conteúdo de umidade significativamente maior ( $p < 0,05$ ), como consequência de uma menor perda de massa (água) durante a etapa de resfriamento (70,9 g água/100 g de produto).

As propriedades de textura das amostras cozidas e resfriadas foram avaliadas através da força necessária para cortar uma peça padrão de carne utilizando a lâmina Warner–Bratzler. A média dos valores da força máxima de corte (cisalhamento) para as amostras submetidas aos processos CV-RV e CI-RV não apresentaram diferença estatisticamente significativa ( $p > 0,05$ ), como pode ser observado na

Tabela 2.1. Em contrapartida, as amostras submetidas ao processo CI-RVI apresentaram uma menor resistência ao corte (valores significativamente menores para a força de cisalhamento). Tal diferença pode estar associada ao maior conteúdo de umidade nas amostras submetidas ao processo CI-RVI em relação às amostras submetidas aos processos CV-RV e CI-RV.

#### 2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um novo dispositivo para a integração dos processos de cozimento e resfriamento a vácuo foi descrito neste capítulo. Os resultados obtidos com o equipamento proposto mostram a possibilidade de integração dos processos de cozimento e resfriamento a vácuo em um mesmo recipiente, evitando a manipulação excessiva do produto e a transferência do mesmo ainda quente a outro equipamento. Os processos integrados CV-RV e CI-RV são similares, em relação ao tempo de processo e à perda de massa global, apesar de utilizarem métodos diferentes de cozimento. Por outro lado, o processo CI-RVI, que consiste no cozimento por imersão e resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento, reduz drasticamente a perda de massa na etapa de resfriamento ao custo de um incremento no tempo de processamento. Neste contexto, a escolha do melhor processo depende da utilização da carne após o cozimento. Em aplicações onde a perda de massa não representa um problema e o objetivo seja reduzir o tempo de processamento, os processos CV-RV e CI-RV podem ser utilizados indistintamente. Caso contrário, o processo CI-RVI é uma alternativa interessante na redução da perda de massa durante o resfriamento a vácuo e no processamento, por exemplo, de cortes de carnes imersos em salmoura ou molhos.

O processo CI-RVI será discutido com mais detalhes no Capítulo 4.

***COMPARAÇÃO ENTRE OS  
MÉTODOS DE RESFRIAMENTO A  
VÁCUO E EM CÂMARA FRIA PARA  
CORTES DE PEITO DE FRANGO***

***3.1. INTRODUÇÃO***

---

O resfriamento a vácuo de peças grandes de carnes e sua comparação com métodos convencionais de resfriamento tem sido extensivamente investigado nos últimos anos (MCDONALD, SUN e KENNY 2000; DESMOND et al, 2000, 2002; SUN e WANG, 2000, 2003; MACDONALD et al., 2001; MACDONALD e SUN, 2001a, 2001b; DRUMMOND e SUN, 2008). Sun e Wang (2000) demonstraram que peças carne suína com aproximadamente 7 kg apresentaram uma redução na temperatura central de 70 °C para 10 °C em apenas 75 minutos utilizando a técnica de resfriamento a vácuo, em comparação com 570 e 415 minutos através do resfriamento em câmara fria e por ar forçado, respectivamente. Desmond et al. (2000) também verificaram uma importante redução no tempo de resfriamento de presuntos com 5-6 kg utilizando o método de resfriamento a vácuo em comparação com métodos tradicionais de resfriamento. Adicionalmente, esses estudos relatam que o resfriamento a vácuo foi o único método de resfriamento capaz de atender à legislação do Reino Unido e da Irlanda, a qual exige que peças de carnes sejam resfriadas de 74 °C a 10 °C dentro de 2,5 horas após o processo de cozimento, com o objetivo de minimizar o crescimento de possíveis micro-organismos patogênicos que tenham sobrevivido ao processo de cozimento (SUN e WANG, 2000; DESMOND et al., 2000). Por outro lado, estudos utilizando a técnica de

resfriamento a vácuo para peças pequenas de carne são escassos na literatura (SELF et al., 1990 apud HUBER, 2004; HUBER e LAURINDO, 2005) e nenhum deles apresenta uma comparação com outros métodos de resfriamento. Neste contexto, o objetivo deste capítulo foi comparar o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) de cortes de peito de frango proposto no capítulo anterior com o processo de cozimento por imersão seguido de método convencional de resfriamento em câmara fria (CI,RC). Para tal, foram avaliadas as influências das etapas RV e RC na taxa de resfriamento e na perda de massa, e nos parâmetros de qualidade do produto obtido (propriedades físicas, mecânicas e microbiológicas).

### 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.2.1. Matéria-prima e preparo das amostras

As amostras utilizadas nos experimentos foram filés de peito de frango sem osso e sem pele de aves abatidas com 42 dias de idade e provenientes de uma mesma unidade produtora (Tyson do Brasil Ltda, São José, SC). Do momento da coleta até a realização dos experimentos, as amostras permaneceram em câmara fria com temperatura controlada em 4 °C e foram utilizadas no máximo 4 dias após a data de abate.

O pH da carne foi medido em três diferentes pontos através de um potenciômetro digital com eletrodo de penetração (marca Analion, modelo PH-730), previamente calibrado com as soluções de pH 7,00 e pH 4,00. Somente amostras com pH entre 5,80 e 6,10 e massa entre 240 g e 270 g foram utilizadas nos ensaios, com o objetivo de minimizar as possíveis variações nos resultados devido à heterogeneidade da matéria-prima. Além disso, nos processos considerados neste capítulo, optou-se por utilizar uma quantidade maior de amostras em cada experimento, também com o objetivo de reduzir a variabilidade dos resultados. Deste modo, em cada experimento foram utilizados, no mínimo, 4 filés de peito de frango com massa total de aproximadamente 1 kg.

#### 3.2.2. Metodologia experimental para o cozimento e resfriamento das amostras

Foram avaliados os seguintes processos: (i) processo integrado de cozimento por imersão em água, seguido da drenagem da água de

cozimento e posterior resfriamento a vácuo (CI-RV) e (ii) cozimento por imersão em água seguido do resfriamento em câmara fria (CI,RC).

As etapas de cozimento e resfriamento referentes ao processo CI-RV foram realizadas no dispositivo experimental desenvolvido neste trabalho, o qual permite a integração dessas etapas em um mesmo equipamento, conforme descrito no Capítulo 2 (seção Material e Métodos, item 2.2.1) e apresentado na Figura 2.1.

Para o processo CI,RC, a etapa de cozimento foi realizada na autoclave adaptada para o processo integrado CI-RV e a etapa de resfriamento foi realizada em um refrigerador de 350 L, equipado com controle de temperatura e dois ventiladores estrategicamente posicionados para promover uma distribuição uniforme da temperatura no interior da câmara. As condições de operação da câmara fria (refrigerador) durante a etapa RC foram: temperatura de 4 °C ± 1 °C, velocidade média do ar próximo aos ventiladores de 2 m.s<sup>-1</sup> ± 0,2 m.s<sup>-1</sup>, velocidade média do ar próximo às amostras de 0,5 m s<sup>-1</sup> ± 0,2 m s<sup>-1</sup> e umidade relativa do ar superior a 85%. A velocidade do ar foi determinada através de um anemômetro (Testo, modelo 425, Alemanha) e a umidade relativa do ar através de um higrômetro (Testo, modelo 610, Alemanha).

O monitoramento da temperatura de cada amostra durante os processos CI-RV e CI,RC foi realizado através de termopares inseridos em duas diferentes seções no filé de peito de frango (seções de maior e menor espessura), sendo que os mesmos foram inseridos até a metade da espessura de cada seção. Também foram monitoradas as temperaturas da água de cozimento e da mistura ar-vapor na câmara de vácuo, além da temperatura do ar no refrigerador.

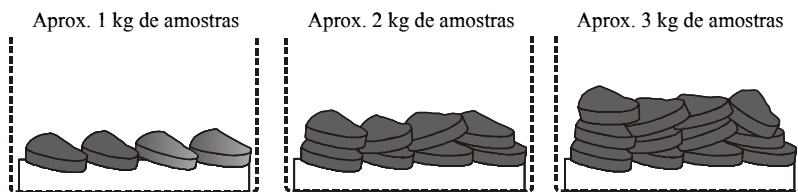
Para ambos os processos avaliados (CI-RV e CI,RC), as amostras foram alocadas no interior de um cesto perfurado de aço inoxidável e sobre uma tela suspensa com suportes de borracha. Primeiramente, o cesto juntamente com as amostras foi pesado e em seguida submerso na água de cozimento (pré-aquecida a 100 °C) no interior da câmara. O cozimento foi realizado à pressão atmosférica e até a temperatura das amostras atingirem 80 °C ± 2 °C na metade da seção de maior espessura (centro térmico - T<sub>1</sub>). Para o processo CI-RV, antes do acionamento da bomba de vácuo (início do processo de resfriamento), a água utilizada para o cozimento foi drenada e o conjunto cesto-amostras foi rapidamente pesado no exterior da câmara. O início do processo de resfriamento a vácuo foi marcado pelo fechamento hermético da câmara e o acionamento da bomba de vácuo. Para o processo CI,RC, após a etapa de cozimento, o cesto contendo as amostras foi rapidamente



pesado e transferido para a câmara fria (refrigerador) com temperatura controlada em 4 °C. Para ambos os processos, o resfriamento foi realizado até que a temperatura de todas as amostras atingisse aproximadamente 9 °C na metade da seção de maior espessura (que corresponde à temperatura de saturação da água na pressão mínima atingida na câmara durante o resfriamento a vácuo, entre 10 e 11 mbar).

O processo integrado CI-RV e o processo CI,RC foram realizados com 1, 2 e 3 kg de filés de peito de frango, sendo que cada processo foi realizado no mínimo em triplicata. Nos experimentos com as diferentes quantidades de amostras consideradas, as mesmas foram alocadas no cesto conforme ilustrado na Figura 3.1. Para os processos realizados com 1 kg de filés de peito de frango, somente uma “camada” de amostras foi disposta sobre a tela no interior do cesto (4 filés). Para os processos realizados com 2 e 3 kg de amostras, foi necessário o empilhamento das mesmas em 2 e 3 camadas, respectivamente, para acomodá-las no recipiente. Desta forma, para cada processo considerado avaliou-se: (i) a influência da quantidade de amostras na taxa de resfriamento e (ii) a influência da posição das amostras no cesto na taxa de resfriamento das mesmas.

Para cada tratamento, foram monitoradas as temperaturas de três filés de peito de frango, sendo que, para os processos realizados com 2 e 3 kg de produto, foi monitorada a temperatura de no mínimo uma amostra em cada camada.



**Figura 3.1** – Ilustração da disposição das amostras no cesto para as diferentes quantidades de produto consideradas nos processos de cozimento e resfriamento CI-RV e CI,RC.

### 3.2.3. Parâmetros do processo

Os parâmetros determinados para cada processo foram: a perda de massa no cozimento ( $\Delta m_C$ ), a perda de massa no resfriamento ( $\Delta m_R$ ) e a perda de massa global ( $\Delta m_G$ ), de acordo com as Equações 3.1, 3.2 e 3.3, respectivamente. É importante destacar que, ao contrário da

metodologia apresentada no capítulo anterior, as amostras submetidas ao processo integrado CI-RV também foram pesadas após o cozimento. Portanto, a massa após o cozimento não foi estimada como realizado anteriormente.

$$\Delta m_C = \frac{m_o - m_C}{m_o} \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$\Delta m_R = \frac{m_C - m_R}{m_C} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$\Delta m_G = \frac{m_o - m_R}{m_o} \cdot 100 \quad (3.3)$$

onde  $m_o$  é a massa inicial das amostras,  $m_C$  é a massa das amostras após a etapa de cozimento e  $m_R$  é a massa das amostras após o processo cozimento e resfriamento. Todos os parâmetros foram expressos como a média dos valores obtidos nas três repetições de cada processo, com exceção dos processos realizados com 1 kg, que foi expresso como a média de 5 repetições.

### 3.2.4. Determinação dos teores de umidade

Após a pesagem das amostras submetidas aos processos CI-RV e CI,RC, dois filés (para cada repetição) foram separadamente triturados e tomaram-se alíquotas para a determinação dos seus teores de umidade através do método gravimétrico (AOAC, 2000). Essas determinações foram realizadas em triplicata, para cada filé de peito de frango analisado.

### 3.2.5. Determinação da capacidade de retenção de água (CRA) das amostras

A capacidade de retenção de água (CRA) dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC foi determinada utilizando um método modificado de centrifugação, conforme descrito por Desmond et al. (2000). Amostras de aproximadamente  $10 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$  foram retiradas do centro da seção de maior espessura dos filés de peito de frango, envoltas em gaze e centrifugadas em tubos de polipropileno de 50 mL (contendo uma camada de algodão no fundo) a 7000 rpm

(5697 g) por 10 minutos a 20 °C (Centrífuga Sigma, modelo 4k15, Alemanha). As amostras foram pesadas antes e após a centrifugação e a CRA foi calculada de acordo com a Equação 3.4 (razão entre a massa de água retida pela amostra após a centrifugação e a massa de sólidos secos da amostra). A média dos valores de oito repetições para cada processo foi considerada para a análise estatística.

$$\text{CRA (g água/g amostra seca)} = \frac{(m_a \cdot x_w) - (m_a - m_d)}{m_a \cdot (1 - x_w)} \quad (3.4)$$

onde  $m_a$  é a massa da amostra antes da centrifugação,  $m_d$  é a massa da amostra após a centrifugação e  $x_w$  é o teor de umidade da amostra.

### 3.2.6. Ensaios mecânicos

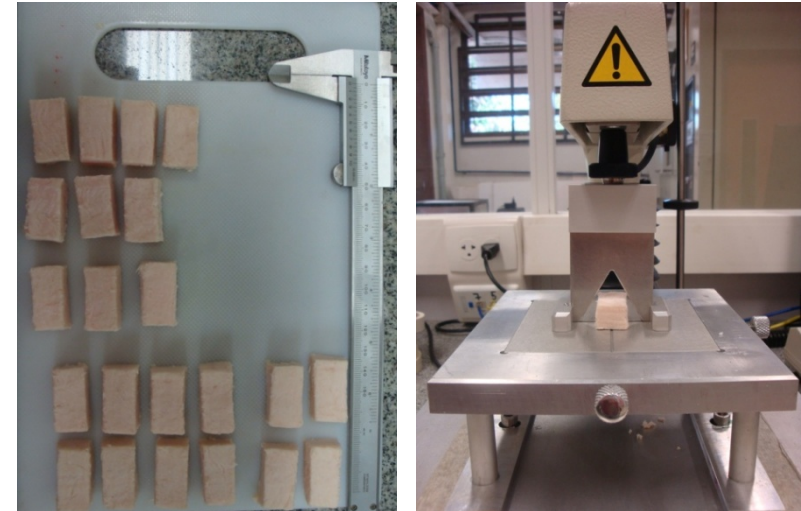
Após o processamento, as amostras foram embaladas e permaneceram armazenadas a 10 °C por aproximadamente 24 horas antes da realização dos ensaios mecânicos. Para o estudo das propriedades mecânicas dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC foram realizadas ensaios de corte e ensaios de dupla compressão (análise de perfil de textura - TPA) utilizando um texturômetro equipado com uma célula de carga de 250N (Stable Micro Systems, modelo TA-TX2, Inglaterra).

#### 3.2.6.1. Análise de corte

Para o ensaio de corte, paralelepípedos com dimensões de 13 mm × 13 mm × 30 mm foram obtidos do centro de cada amostra (da seção de maior espessura), envoltos com filme plástico e mantidos a 10 °C até a realização do teste. O ensaio foi realizado utilizando uma lâmina Warner-Bratzler acoplada ao texturômetro, conforme ilustrado na Figura 3.2.

A força física necessária para cortar uma porção da amostra (força de cisalhamento) foi medida perpendicularmente à orientação das fibras musculares e com velocidade de corte de 5 mm s<sup>-1</sup>, de acordo com a metodologia apresentada por Barbut, Zhang e Marcone (2005) e Drummond e Sun (2006). A partir das curvas de força *versus* distância foi possível obter o valor correspondente à força máxima de corte ( $F_{\text{máx}}$ ), o qual foi expresso em Newtons (N). A média dos valores de no mínimo

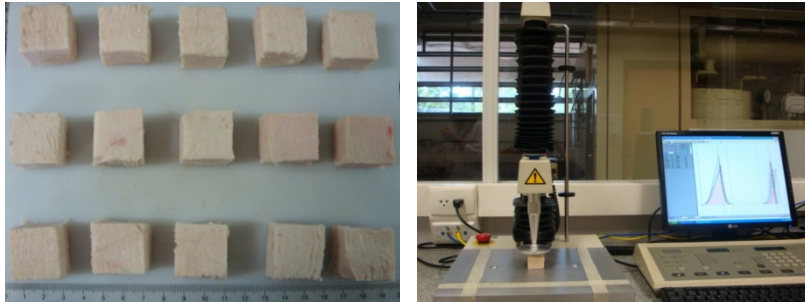
nove repetições para cada processo foi considerada para a análise estatística.



**Figura 3.2** – Ilustração das amostras e da lâmina Warner-Bratzler utilizadas nos ensaios mecânicos de corte.

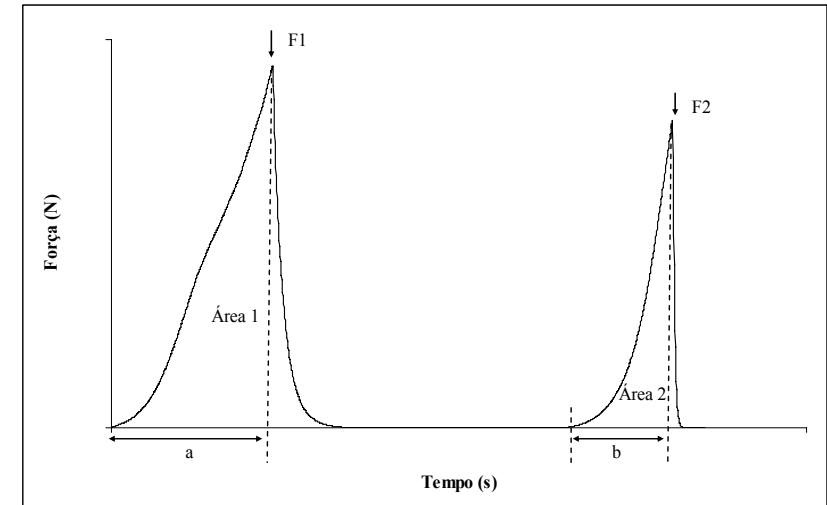
#### 3.2.6.2. Ensaio de dupla compressão - Análise de perfil de textura (TPA)

Para a análise de perfil de textura foram utilizados cubos de 25 x 20 mm obtidos do centro de cada filé de peito de frango (da seção de maior espessura), conforme ilustrado na Figura 3.3. O ensaio foi realizado com uma *probe* plana e circular de 50 mm de diâmetro acoplada ao texturômetro. Durante o ensaio, as amostras foram comprimidas por duas vezes consecutivas até atingir 50 % da sua altura a uma velocidade de 1 mm s<sup>-1</sup>, simulando assim o movimento da mandíbula durante a mastigação (BOURNE, 1982). A partir da análise das curvas de força *versus* tempo fornecidas pelo equipamento foi possível determinar os parâmetros dureza, elasticidade, coesividade, gomosidade e mastigabilidade. A média dos valores de, no mínimo, nove repetições para cada processo foi considerada para a análise estatística.



**Figura 3.3** – Ilustração das amostras e da *probe* utilizadas nos ensaios mecânicos de dupla compressão (TPA).

Na Figura 3.4 é apresentada uma curva típica obtida em um ensaio de TPA. O parâmetro dureza representa fisicamente a força necessária para atingir uma dada deformação e corresponde à força máxima na primeira compressão (F1), expressa em N. A coesividade está relacionada com o nível até o qual um material pode ser deformado antes da ruptura e corresponde à razão entre o trabalho realizado durante a segunda compressão (Área 2) e o trabalho realizado na primeira compressão (Área 1). A elasticidade está relacionada com as taxas de deformação e de retorno à condição inicial (comportamento não-linear dos materiais reais) e corresponde à razão entre as duas deformações, dado por  $b/a$  (adimensional). A gomosidade está relacionada com a energia requerida para desintegrar um alimento semi-sólido a um estado pronto para ser deglutido e corresponde ao produto:  $\text{dureza} \times \text{coesividade}$ , expressa em N. A mastigabilidade está relacionada com a energia requerida para desintegrar um alimento sólido a um estado pronto para ser deglutido e corresponde ao produto:  $\text{dureza} \times \text{coesividade} \times \text{elasticidade}$ , expressa em N.



**Figura 3.4** – Curva típica de análise de perfil de textura (TPA) de amostras de peito de frango cozido e resfriado.

### 3.2.7. Determinação da cor das amostras

A determinação de cor das amostras submetidas aos processos CI-RV e CI-RC foi realizada sobre a superfície da seção de maior espessura (três medidas em cada amostra). Para esta determinação foi utilizado um colorímetro (Hunterlab, modelo Miniscan EZ, Estados Unidos), com observador  $10^\circ$  e illuminate D65. Este equipamento permite uma medida objetiva da cor, através quantificação da luz refletida pela amostra. Foram utilizadas as coordenadas do sistema CIEL\*a\*b\* (*Commission internationale de l'éclairage*), onde o  $L^*$  representa a luminosidade, o  $a^*$  a variação entre o vermelho (+a) e o verde (-a) e o  $b^*$  a variação entre o amarelo (+b) e o azul (-b). A média dos valores de doze repetições para cada processo foi considerada para a análise estatística.

### 3.2.8. Simulação da perda de massa durante o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango

A variação temporal da massa dos cortes de peito de frango cozidos durante a etapa de resfriamento a vácuo, no processo integrado CI-RV, foi estimada através do algoritmo ilustrado na Figura 3.5. Tal algoritmo é baseado no conhecimento da curva experimental de

resfriamento das amostras, considerando que a cada decréscimo no valor da temperatura ocorre uma evaporação proporcional seguindo um processo isoentálpico, de acordo com a Equação 1.4 (Capítulo 1 ou Figura 3.5). Deste modo, a massa das amostras é atualizada em cada passo (decréscimo de temperatura), permitindo a estimativa da massa final que foi comparada com o resultado experimental obtido por pesagem. O algoritmo foi implementado através do *software* MATLAB®.

Os dados de entrada foram: a massa das amostras após o cozimento -  $m$  (kg); a fração mássica de água nas amostras cozidas -  $x_w$  (determinada por secagem em estufa a 105 °C até massa constante – método gravimétrico); o calor específico a pressão constante (cujo valor é função da umidade e da temperatura) -  $c$  (kJ/kg°C); e o perfil médio de temperatura das amostras durante o resfriamento a vácuo [foi utilizada a média entre os perfis de temperatura nas seções de maior e menor espessura das amostras ( $T_1$  e  $T_3$ )].

A dependência entre a temperatura e a entalpia específica de vaporização da água ( $\hat{\Delta H}_v$ ) foi calculada através da Equação 3.5 (DOSTAL et al., 1999).

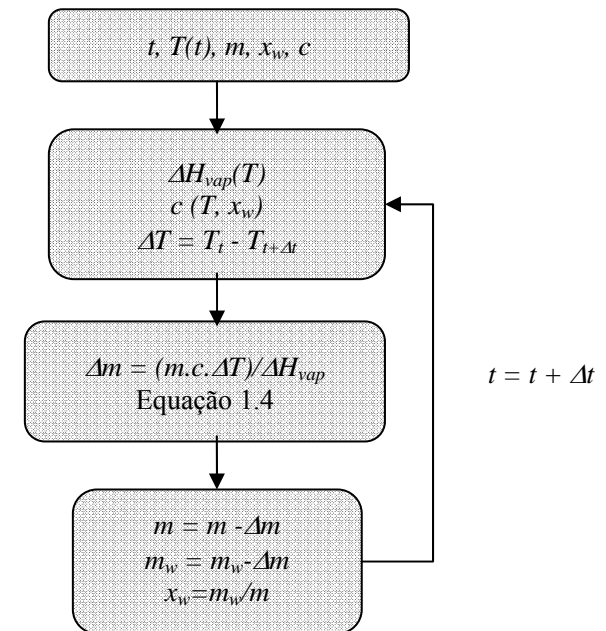
$$\hat{\Delta H}_{vap} = 2,255 \cdot 10^3 \left( \frac{374,15 - T}{274,15} \right)^{0,38} \quad (3.5)$$

onde  $T$  é a temperatura de saturação água, em °C.

O calor específico do peito de frango cozido foi estimado para cada passo do resfriamento (decréscimo simultâneo da temperatura e do teor de umidade) através da correlação empírica de Siebel, de acordo com a Equação 3.6 (MACDONALD e SUN, 2001b). A variação do calor específico com a temperatura foi desprezada.

$$c = 3,349x_w + 0,8374 \quad (3.6)$$

onde  $c$  é o calor específico da amostra (kJ/kg °C) e  $x_w$  é a fração mássica de água.



**Figura 3.5** – Representação do algoritmo utilizado para estimativa da evolução temporal da massa das amostras de peito de frango cozido durante a etapa de resfriamento a vácuo.

O erro relativo entre a perda de massa durante a etapa de resfriamento a vácuo obtida experimentalmente ( $\Delta m_R$ ) e a perda de massa predita a partir da estimativa da massa final das amostras ( $\Delta m_{R \text{ pred}}$ ) foi calculado de acordo com a Equação 3.7.

$$\text{Erro relativo \%} = \left| \frac{\Delta m_R - \Delta m_{R \text{ pred}}}{\Delta m_R} \right| \cdot 100 \quad (3.7)$$

### 3.2.9. Análise microbiológica

As amostras submetidas às análises microbiológicas foram obtidas em experimentos independentes dos processos CI-RV e CI,RC, ambos realizados com 3 kg de amostras. Antes de cada experimento, a câmara e os termopares (utilizados em uma amostra controle em cada

camada de amostras dispostas no cesto) foram sanitizados com solução 50 ppm de cloro ativo por 30 minutos. Cabe destacar que houve o empilhamento das amostras apenas no processo CI-RV. Para o processo CI,RC, após a etapa de cozimento as amostras foram transferidas a outro recipiente perfurado e dispostas em uma única camada antes de serem inseridas no refrigerador. Para ambos os processos, ao final do resfriamento as amostras foram colocadas individualmente em sacos estéreis e armazenadas em câmara fria a 10 °C.

As análises microbiológicas foram realizadas nas amostras *in natura*, após o processamento (t=0) e depois de 5 (t=5) e 10 (t=10) dias de armazenamento a 10 °C através de contagem total de mesófilos e psicrófilos.

#### 3.2.9.1. Metodologia para análise microbiológica

Para cada embalagem de filé de peito de frango *in natura* e submetidos aos processos CI-RV e CI,RC (dois filés para cada condição), foram retiradas de forma asséptica 25 g de amostras, as quais foram colocadas em saco plástico estéril e adicionados 225 mL de solução salina 0,1 % (m/v). Em seguida, as amostras foram homogeneizadas por 60 segundos em *stomacher* (ITR, modelo 1204), realizando-se na seqüência diluição e plaqueamento, seguido de incubação em estufa. Para a contagem total de mesófilos e psicrófilos foi utilizado Ágar padrão - PCA (*Plate Count Agar*) e incubação por 48 horas a 36°C (contagem de mesófilos) e por 7 dias a 10°C (contagem de psicrófilos), de acordo com APHA (2001). Todas as análises foram realizadas em duplicata para cada filé de peito de frango analisado. Os resultados foram expressos em Unidades Formadoras de Colônia por grama de amostra (UFC/g).

As análises microbiológicas descritas foram realizadas no Laboratório de Análises – LABCAL do Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos da UFSC.

#### 3.2.10. Análise estatística

O tratamento estatístico dos dados obtidos foi realizado com o auxílio do *software* STATISTICA® 7.0. Com o objetivo de se verificar a existência de diferenças significativas entre os parâmetros avaliados nos diferentes processos de cozimento e resfriamento foi realizada análise de variância simples (ANOVA). O teste de Tukey foi utilizado para a comprovação das médias a um nível de significância de 5 %.

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

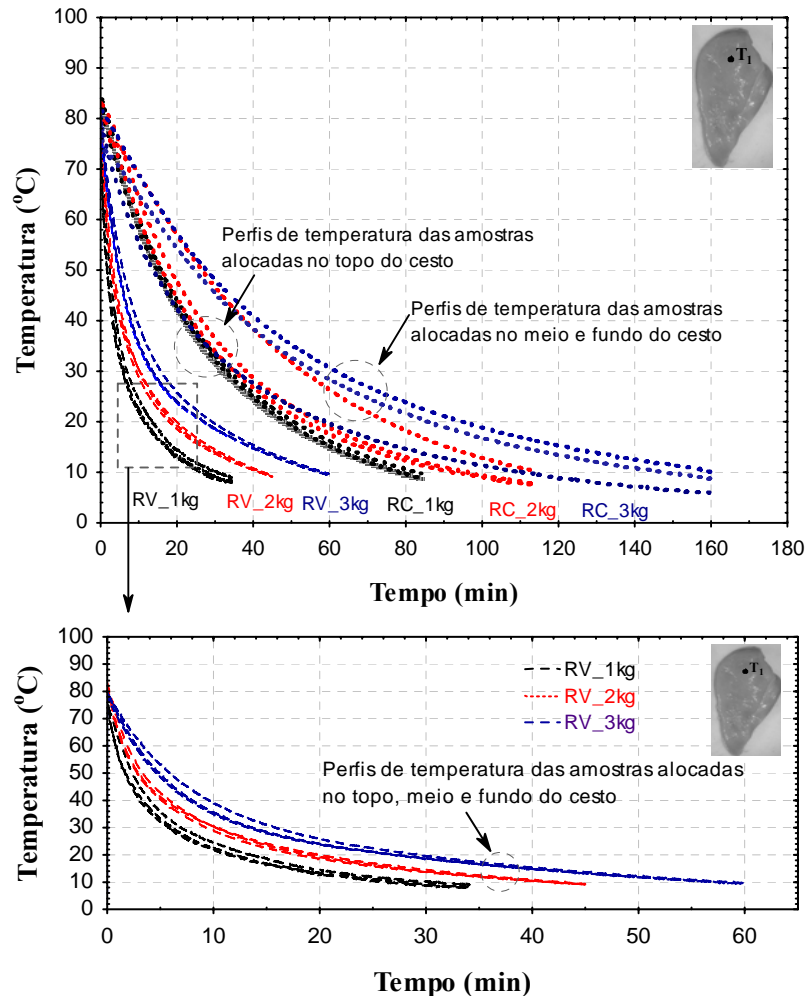
#### 3.3.1. Perfis de temperatura dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC

Em virtude da etapa de cozimento por imersão em água ser comum aos processos avaliados, somente os perfis de temperatura das amostras durante a etapa de resfriamento dos processos CI-RV (cozimento por imersão seguido do resfriamento a vácuo) e CI,RC (cozimento por imersão seguido do resfriamento em câmara fria) com 1, 2 e 3 kg de produto serão considerados nesta seção. Para o processo CI-RV, o início da etapa de resfriamento foi marcado pelo acionamento da bomba de vácuo e a consequente redução da pressão na câmara. No processo CI,RC, o início da etapa de resfriamento foi marcado pela inserção das amostras no interior do refrigerador (câmara fria). Para os processos realizados com 1 kg de filés de peito de frango, somente uma camada de amostras foi disposta sobre a tela no interior do cesto (4 filés). Para os processos realizados com 2 e 3 kg de amostras foi necessário o empilhamento das mesmas em 2 e 3 camadas, respectivamente, para acomodá-las no recipiente (ver Figura 3.1). As temperaturas de três filés foram monitoradas em cada experimento, sendo que nos processos com 2 e 3 kg de produto foi monitorada a temperatura de no mínimo um filé em cada posição da amostra no recipiente (topo, meio e fundo). Neste contexto, são apresentados na Figura 3.6 os perfis de temperatura das amostras durante a etapa de resfriamento nos processos CI-RV e CI,RC, com 1, 2 e 3 kg de produto. Para uma melhor visualização dos dados e considerando a similaridade dos resultados nas diferentes repetições de cada processo, somente os perfis da seção de maior espessura obtidos em uma única repetição são apresentados na Figura 3.6. Os perfis de temperatura da seção de menor espessura serão apresentados posteriormente.

Para os processos realizados com 1 kg de produto, uma diferença considerável foi observada entre a taxa de resfriamento das amostras submetidas ao RV e a taxa de resfriamento das amostras submetidas ao RC. Nas condições experimentais estudadas, o tempo para o resfriamento de 1 kg de filés de peito de frango de aproximadamente 80 °C até 10 °C (temperatura na metade da seção de maior espessura das amostras) foi em média 3 vezes menor para o método RV em comparação com o RC (comparação entre os tempos de resfriamento nas três repetições de cada processo). Por outro lado, não foram verificadas



diferenças consideráveis entre as taxas de resfriamento dos três filés de frango monitorados em cada um dos processos. Tal comportamento era esperado, uma vez que para esse caso (1 kg de produto) não houve o empilhamento das amostras.

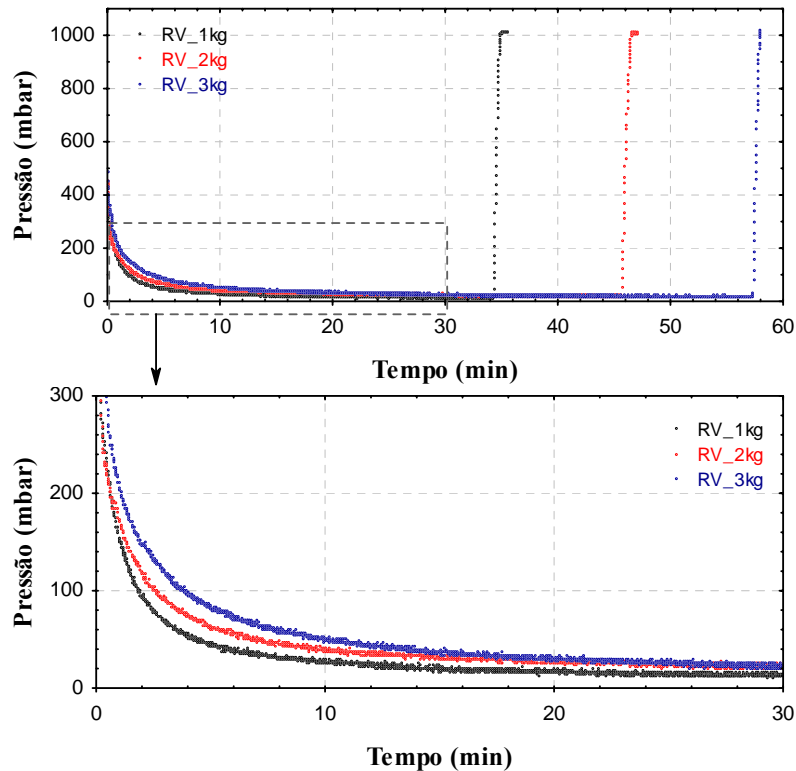


**Figura 3.6** – Comparação entre os perfis de temperatura na metade da seção de maior espessura dos cortes de peito de frango durante a etapa de resfriamento dos processos CI-RV e CI,RC com 1, 2 e 3 kg de amostras.

Com relação aos processos realizados com 2 e 3 kg de amostras, nota-se que a posição da amostra no cesto não interferiu na taxa de resfriamento durante o método RV, i.e., a temperatura do produto foi reduzida à mesma taxa, independentemente da posição da amostra (topo, meio ou fundo do recipiente). Em contrapartida, uma diferença considerável foi observada na taxa de resfriamento das amostras submetidas ao método RC, em relação à posição do filé no recipiente. Essa diferença surge principalmente em consequência da maior transferência de calor por convecção entre as amostras localizadas na superfície (topo do cesto) e o meio de resfriamento. Também se observa, de forma análoga ao processo com 1 kg de amostras, que a taxa de resfriamento dos produtos submetidos ao RV foi superior à taxa de resfriamento dos produtos submetidos ao RC. Para as condições analisadas, o tempo total para o resfriamento de 2 e 3 kg de amostras de 80 °C até 10 °C foi aproximadamente 2,7 vezes menor utilizando o método de resfriamento a vácuo em comparação com o método convencional de resfriamento em câmara fria.

As diferenças observadas entre as taxas de resfriamento dos filés de peito de frango nos dois métodos avaliados (RV e RC) são essencialmente causadas pelos diferentes mecanismos de transferência de calor envolvidos em cada método. Conforme apresentado no Capítulo 1, o resfriamento das amostras em câmara fria é obtido basicamente pela transferência de calor por convecção entre a superfície e o ar frio e por condução entre o núcleo do produto e a superfície. Como a carne cozida possui baixa condutividade térmica, entre 0,442 e 0,464 W/m K (MACDONALD et al., 2002), o mecanismo condutivo controla o tempo do processo. Consequentemente, a taxa de resfriamento depende diretamente de fatores como o tamanho e a espessura das amostras, além do empilhamento do produto (que interfere de forma direta na transferência de calor por convecção). Por outro lado, o resfriamento a vácuo (RV) ocorre através da evaporação da água livre do produto sob condição de vácuo, removendo uma grande quantidade de calor latente instantaneamente. Neste caso, como a evaporação ocorre na superfície e nos poros das amostras e a pressão é praticamente homogênea em toda câmara, um resfriamento uniforme é obtido, independentemente do empilhamento do produto. Adicionalmente, nenhum resultado experimental ou análise teórica encontrados na literatura indicam que a taxa de resfriamento a vácuo é diretamente afetada pelo tamanho e massa do produto (BURFOOT et al., 1990; SUN e WANG, 2003; WANG e SUN, 2003). Por outro lado, a partir da Figura 3.6, é possível observar que as taxas de resfriamento a

vácuo obtidas nos experimentos realizados com 1, 2 e 3 kg de amostras foram diferentes. Isso pode ser explicado pelas diferenças entre as taxas de redução da pressão na câmara durante o resfriamento das quantidades de produto consideradas, o que pode ser observado na Figura 3.7.



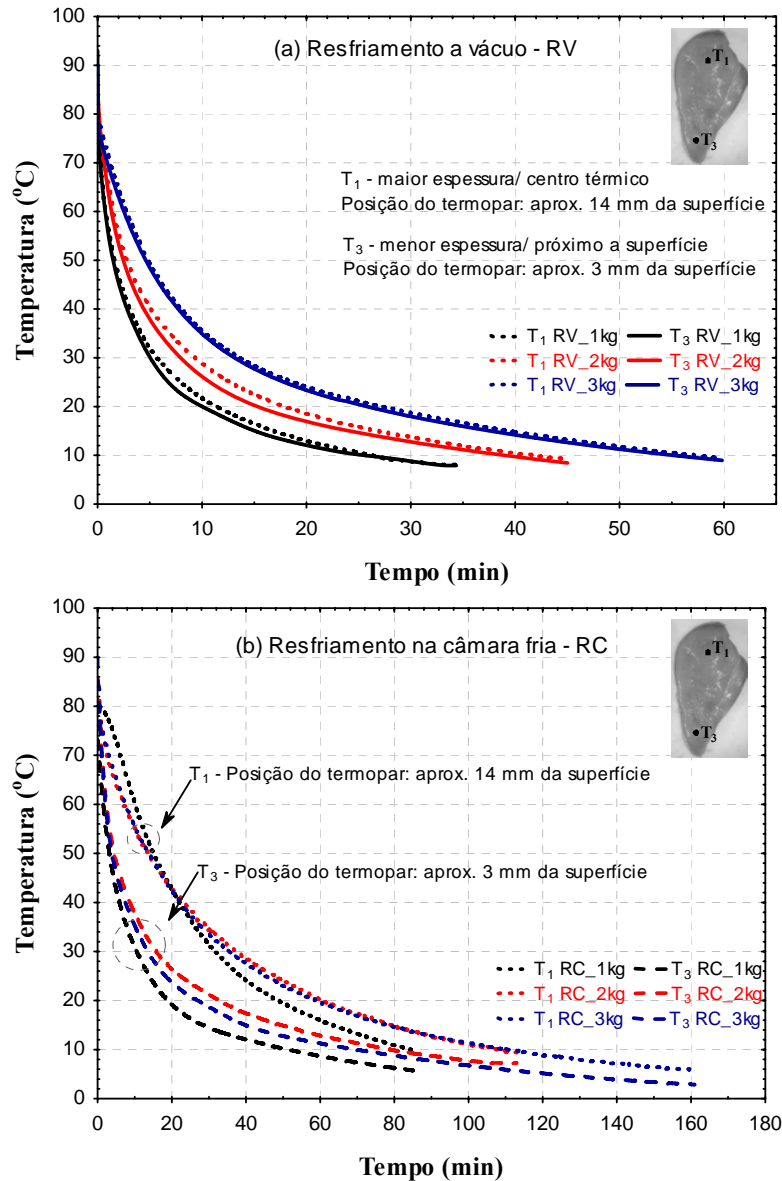
**Figura 3.7** – Curvas de pressão na câmara durante a etapa de resfriamento a vácuo do processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) com 1, 2 e 3 kg de filés de peito de frango.

As diferenças observadas entre as taxas de redução da pressão na câmara devem-se à limitação do equipamento utilizado em remover os distintos volumes de vapor gerados durante o resfriamento das diferentes quantidades de produto analisadas. Como esse vapor possui elevado volume específico a baixas pressões [quando a pressão é igual a 11 mmHg, o volume específico do vapor é 118,8 m<sup>3</sup>/kg (GEANKOPLIS, 1983)], uma maior quantidade de vapor irá interferir de forma significativa na taxa de redução de pressão se o mesmo não for

rapidamente removido da linha de bombeamento. Como alternativas para aumentar a eficiência na remoção dos vapores provenientes da evaporação da água do produto e reduzir a sua influência na taxa de redução da pressão, pode-se citar: (i) a utilização de uma maior vazão e/ou um maior volume de água de resfriamento no condensador, pois se observou um incremento na temperatura da mesma no banho termostático de aproximadamente 4 °C nos primeiros 5 minutos do resfriamento a vácuo, (ii) a utilização de outro fluido refrigerante que permita a obtenção de uma temperatura inferior no condensador.

Na Figura 3.8 são apresentados os perfis de temperatura na metade da seção de maior e de menor espessura dos filés de peito de frango durante a etapa de resfriamento a vácuo (RV) e de resfriamento em câmara fria (RC), dos processos realizados com 1, 2 e 3 kg de amostras (massa das amostras *in natura*). Os perfis apresentados para os processos com 2 e 3 kg de produto correspondem às temperaturas das amostras acomodadas no topo do cesto. Cabe destacar que os termopares localizados na metade da seção de maior e de menor espessura de cada amostra estavam posicionados a aproximadamente 14 mm e 3 mm da superfície, respectivamente.

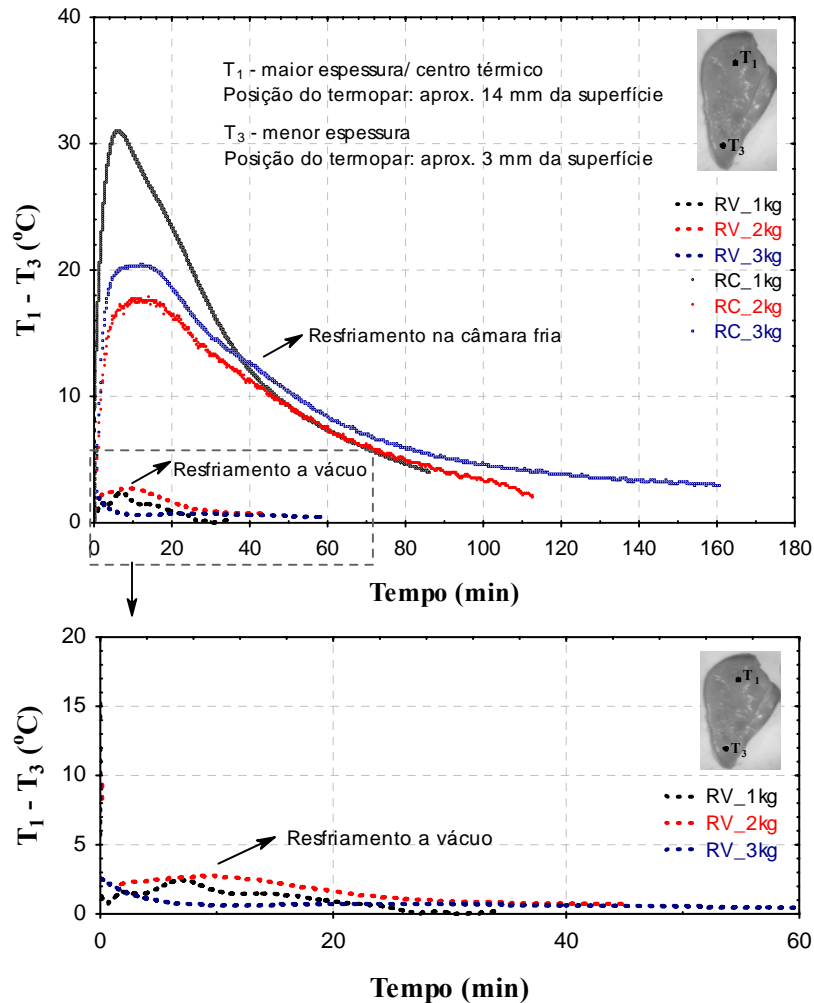
Observa-se na Figura 3.8a que o resfriamento das amostras submetidas ao método RV foi bastante homogêneo, não apresentando gradientes significativos de temperatura entre as seções de maior e menor espessura, como previamente observado nos resultados apresentados no Capítulo 2. De fato, a taxa de resfriamento a vácuo não é diretamente afetada pelo tamanho, espessura e massa das amostras (BURFOOT et al., 1990; SUN e WANG, 2003; WANG e SUN, 2003). No entanto, a taxa de resfriamento depende da porosidade e da distribuição de poros na carne. McDonald e Sun (2001) demonstraram que há uma relação direta entre a porosidade da amostra e a taxa de resfriamento a vácuo. Esses autores observaram que cortes de carne bovina moída com porosidade entre 9,8 % e 11,8 % foram resfriados de 72 °C até 4 °C mais rapidamente que cortes de carne inteiros com porosidade entre 1,4 % e 2,6 %. As análises numéricas do processo de resfriamento a vácuo conduzidas por Wang e Sun (2002b) também indicaram uma relação significativa entre a distribuição de poros no interior do produto e a distribuição de temperatura no mesmo durante o resfriamento. Desta forma, os autores afirmam que produtos com uma distribuição de poros uniforme apresentarão uma distribuição homogênea de temperatura durante o resfriamento a vácuo enquanto que, nos casos onde a distribuição de poros não é uniforme, regiões com maior porosidade serão resfriadas mais rapidamente.



**Figura 3.8** – Comparação entre os perfis de temperatura na metade da seção de maior ( $T_1$ ) e de menor espessura ( $T_3$ ) dos cortes de peito de frango durante a etapa de resfriamento dos processos (a) CI-RV e (b) CI-RC realizados com 1, 2 e 3 kg de amostras.

Para as amostras submetidas ao método RC, uma diferença considerável entre a temperatura na metade da seção de maior espessura ( $T_1$ ) e a temperatura na metade da seção de menor espessura ( $T_3$ ) foi observada durante o resfriamento (ver Figura 3.8b), ao contrário do que ocorre no resfriamento a vácuo. Essa característica fica clara quando se compara os valores absolutos da diferença entre  $T_1$  e  $T_3$  para os processos analisados, conforme apresentado na Figura 3.9. Para o método de resfriamento em câmara fria (RC), nota-se que a diferença entre  $T_1$  e  $T_3$  aumenta no início do processo e então declina gradualmente após atingir um valor máximo. O aumento inicial da diferença entre  $T_1$  e  $T_3$  pode ser explicado pela rápida redução da temperatura da superfície do produto, em função da evaporação da água e da transferência de calor por convecção entre a superfície e o meio de resfriamento (ar frio), enquanto que a temperatura interna é reduzida lentamente devido à baixa condutividade térmica da carne cozida. Essa diferença atinge um valor máximo, uma vez que o meio de resfriamento limita o declínio da temperatura da superfície. Em seguida, a diferença entre  $T_1$  e  $T_3$  reduz gradualmente em função da condução contínua de calor do interior para a superfície da amostra. Por outro lado, para o método de resfriamento a vácuo, a diferença inicial entre  $T_1$  e  $T_3$  de 12 °C a 15 °C foi rapidamente reduzida nos primeiros instantes do resfriamento a valores inferiores a 2,5 °C, indicando que a evaporação da água ocorre tanto na superfície quanto nos poros da amostra, proporcionando o resfriamento homogêneo da mesma. Um comportamento similar foi verificado por outros autores durante o resfriamento de peças grandes de carne bovina e suína através dos métodos de resfriamento a vácuo, resfriamento em câmara fria, por ar forçado e por imersão em água (SUN e WANG, 2000; MACDONALD e SUN, 2001b).





**Figura 3.9** – Comportamento da diferença de temperatura entre a seção de maior e menor espessura dos filés de peito de frango durante a etapa de resfriamento dos processos CI-RV e CI,RC realizados com 1, 2 e 3 kg de amostras.

### 3.3.2. Parâmetros do processo, teor de umidade e capacidade de retenção de água dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC

Na Tabela 3.1 são apresentados os parâmetros do processo (perda de massa no cozimento, perda de massa no resfriamento e perda de massa global), o teor de umidade final e a capacidade de retenção de água das amostras submetidas ao processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) e ao processo de cozimento seguido do resfriamento em câmara fria (CI,RC).

**Tabela 3.1** - Parâmetros avaliados para o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) e para o processo de cozimento seguido do resfriamento em câmara fria (CI,RC) com diferentes quantidades de filés de peito de frango (1, 2, 3 kg). Valores médios  $\pm$  Desvio padrão.

Processo	Perda de massa no cozimento (%)	Perda de massa no resfriamento (%)	Perda de massa global (%)	Teor de umidade final (g água/100 g amostra)	CRA (g água retida/g amostra seca)
CI-RV (1 kg)	19,3 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	11,6 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	28,8 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup>	67,6 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	1,58 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>
CI-RV (2 kg)	19,0 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	11,5 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	28,6 $\pm$ 1,1 <sup>a</sup>	67,3 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	-
CI-RV (3 kg)	18,9 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup>	11,7 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	28,5 $\pm$ 1,6 <sup>ac</sup>	67,5 $\pm$ 1,0 <sup>ac</sup>	-
CI,RC (1 kg)	19,8 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>	6,8 $\pm$ 0,1 <sup>b</sup>	25,3 $\pm$ 0,6 <sup>b</sup>	68,5 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	1,63 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>
CI,RC (2 kg)	20,2 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>	8,0 $\pm$ 0,2 <sup>c</sup>	26,6 $\pm$ 0,7 <sup>bc</sup>	68,3 $\pm$ 0,9 <sup>bc</sup>	-
CI,RC (3 kg)	18,5 $\pm$ 1,7 <sup>a</sup>	8,4 $\pm$ 0,6 <sup>c</sup>	25,2 $\pm$ 1,6 <sup>bc</sup>	68,4 $\pm$ 0,9 <sup>bc</sup>	-

<sup>a-c</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

Observa-se na Tabela 3.1 que a perda de massa dos filés de peito de frango após o cozimento por imersão foi em torno de 19,3 % (em relação à massa inicial). Essa perda de massa é causada principalmente pela redução da capacidade de retenção de água pelo músculo durante o cozimento, em função da desnaturação das proteínas e encolhimento das fibras musculares (BENDALL e RESTALL, 1983). A variabilidade desse parâmetro nos diferentes processos avaliados pode ser atribuída a

fatores como: (i) a heterogeneidade da matéria-prima (pH, espessura, entre outros); (ii) a imprecisão no posicionamento do termopar em cada amostra, o que pode interferir no valor da temperatura atingida durante essa etapa e no tempo de processo; e (iii) a erros experimentais, uma vez que as amostras são pesadas quentes. Além disso, uma variabilidade maior foi verificada nos valores da perda de massa após cozimento para os processos com 3 kg de amostras. Neste caso, devido à maior quantidade de amostras e o empilhamento das mesmas, algumas podem não ter atingido 80 °C no “centro térmico” ( $T_1$ ) ou ultrapassado esse valor pois, para cada repetição, apenas a temperatura de três filés foi monitorada.

Com respeito ao percentual de perda de massa após o resfriamento das amostras de 80 °C até aproximadamente 9 °C (calculado em relação à massa da amostra após o cozimento), verificou-se uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre o método de resfriamento a vácuo (RV) e o método convencional de resfriamento em câmara fria (RC). Como esperado, os valores médios da perda de massa observados após o RV de 1, 2 e 3 kg de amostras (entre 11,5 % e 11,7 %) foram maiores que os valores observados após o resfriamento pelo método convencional (entre 6,8 % e 8,4 %). Conforme mencionado no Capítulo 1, a elevada perda de massa verificada para as amostras resfriadas a vácuo é uma inevitável consequência desta técnica, uma vez que o resfriamento é obtido pela evaporação de parte da umidade do produto. Adicionalmente, observou-se que os valores da perda de massa durante a etapa de resfriamento do processo integrado CI-RV com 1, 2 e 3 kg de amostras (entre 11,5 % e 11,7 %) foram um pouco maiores que o valor médio observado nos resultados para o mesmo processo apresentados no capítulo anterior (10,6 %, Tabela 2.1), quando foi utilizado somente um filé de peito de frango por experimento. Essa diferença está associada principalmente às diferentes metodologias experimentais utilizadas e também às diferentes temperaturas finais obtidas. Nos experimentos considerados neste capítulo, as amostras foram retiradas da câmara e pesadas após a etapa de cozimento, o que resultou em uma perda de água por gotejamento que não ocorreu nos experimentos considerados no capítulo anterior. Além disso, a temperatura final das amostras resfriadas foi menor nos experimentos deste capítulo, o que também resultou em uma perda de massa (água) adicional em comparação com os experimentos do capítulo anterior. É importante destacar que essa menor temperatura é resultado da menor pressão obtida na câmara nos experimentos deste capítulo, o que ocorreu em função de pequenas modificações na linha de vácuo.

Ainda na Tabela 3.1, cabe destacar que os valores da perda de massa verificados após o resfriamento de 2 e 3 kg de amostras pelo método RC foram significativamente maiores ( $p < 0,05$ ) do que os valores observados após o resfriamento de 1 kg de produto pelo mesmo método. Essa diferença pode estar associada ao maior tempo de resfriamento obtido nos processos com 2 e 3 kg de produto (ver Figura 3.6), o que pode ter provocado uma maior desidratação das amostras.

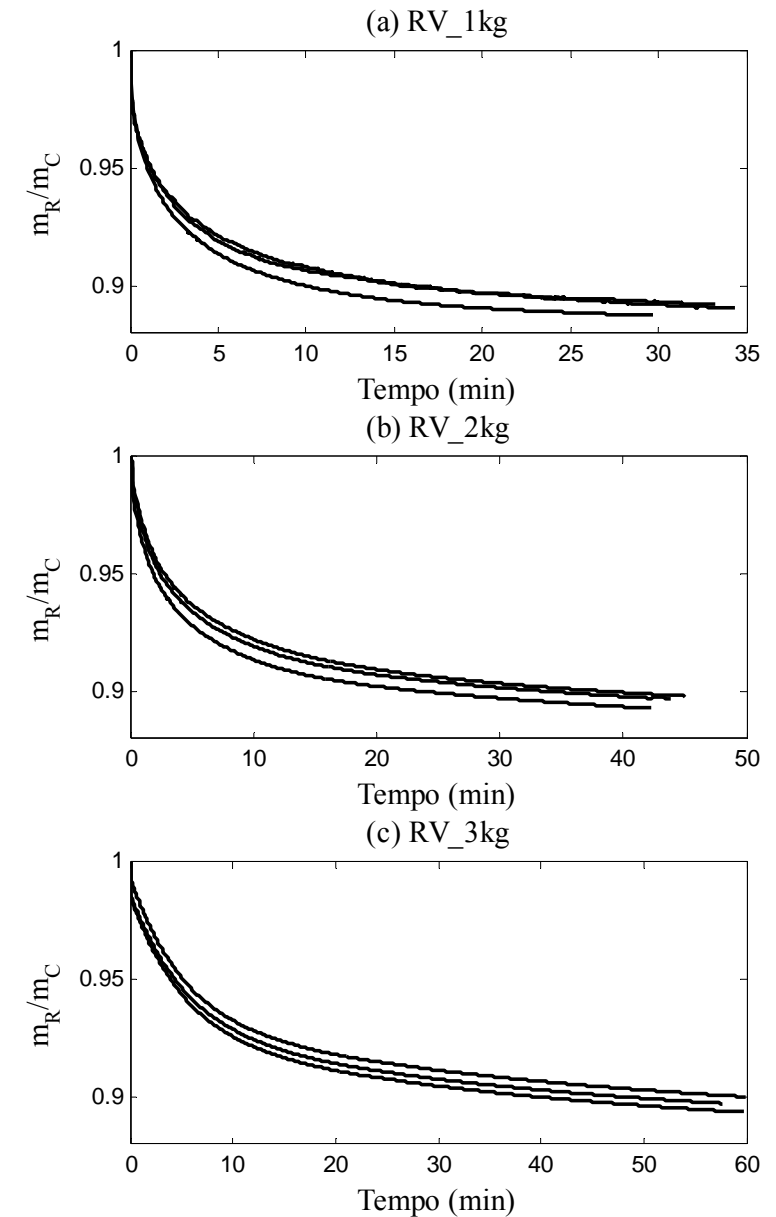
De um modo geral, os teores de umidade das amostras submetidas ao processo CI-RV foram menores que os observados para as amostras submetidas ao CI,RC, principalmente como resultado da maior perda de água na etapa de resfriamento a vácuo (

Tabela 3.1). No entanto, para algumas condições experimentais não foram observadas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre os valores dos teores de umidade das amostras submetidas ao CI-RV em comparação com o CI,RC. Isso pode ser explicado pela variabilidade na perda de massa durante o cozimento, sobretudo quando uma maior quantidade de produto foi considerada. Por outro lado, o método de resfriamento não influenciou a capacidade de retenção de água das amostras. Isso indica que os efeitos do vácuo na estrutura da matriz porosa não foram significativos para alterar a capacidade do músculo em reter água através de forças capilares. Desmond et al. (2000) também não verificaram diferenças significativas entre a capacidade de retenção de água de peças de presuntos resfriadas a vácuo, por ar frio e por ar forçado.

Simulação da perda de massa das amostras durante a etapa de resfriamento a vácuo.

Na Figura 3.10 são apresentados os resultados da evolução temporal da massa das amostras durante a etapa de resfriamento a vácuo ( $m_R$ ) dos processos realizados com 1, 2 e 3 kg de filés de peito de frango (massa dos filés *in natura*). Tal evolução foi estimada utilizando o algoritmo apresentado na Figura 3.5, para as três repetições realizadas com cada quantidade de produto considerada. Conforme mencionado anteriormente, esse algoritmo é baseado no conhecimento da curva experimental de resfriamento das amostras considerando que a cada decréscimo no valor da temperatura ocorre uma evaporação proporcional seguindo um processo isoentálpico, de acordo com a Equação 1.4 (balanço de energia no produto). As curvas obtidas foram normalizadas pela massa das amostras após o cozimento ( $m_C$ ), visando facilitar a visualização dos resultados.

A partir da Figura 3.10, observa-se que a maior variação de massa das amostras ocorreu nos primeiros minutos da etapa de resfriamento (aproximadamente 5 minutos para o RV de 1kg de amostras e 8 minutos para os processos com 2 e 3 kg), o que está diretamente relacionado com a taxa de redução da pressão na câmara (ver Figura 3.7). No início do resfriamento, a pressão na câmara é reduzida mais rapidamente à pressão de saturação na temperatura do produto e conseqüentemente uma maior taxa de evaporação é verificada. Com a redução na taxa de queda da pressão na câmara, a taxa de evaporação também foi reduzida conforme pode ser verificado através da evolução da massa das amostras após os 10 primeiros minutos do processo.



**Figura 3.10** – Evolução temporal da massa das amostras durante a etapa de resfriamento a vácuo do processo integrado CI-RV realizado com diferentes quantidades de produto. (a) 1 kg, (b) 2 kg e (c) 3 kg.

Os valores médios da perda de massa após o resfriamento a vácuo obtidos experimentalmente e os valores de perda de massa calculados a partir da estimativa da massa final das amostras são apresentados na Tabela 3.2. Nota-se que os valores estimados foram próximos aos valores experimentais (erro relativo inferior a 10 %), porém sempre inferiores. Essa diferença pode estar relacionada com a precisão na predição do calor específico do produto, a presença de gotejamento e a evaporação ocorrida entre a pesagem e o efetivo início do resfriamento a vácuo. Outra fonte de erro que deve ser considerada para explicar essa diferença é a transferência de calor por radiação das paredes da câmara de cozimento-resfriamento, que não são resfriadas na mesma taxa durante o RV (modelo utilizado para as simulações não considera nenhuma forma de transferência de calor entre o produto e a vizinhança). McDonald e Sun (2001b) e Sun e Wang (2002b) também verificaram essa diferença entre os valores experimentais e preditos pela Equação 1.4.

**Tabela 3.2** - Comparação entre os valores médios da perda de massa após o resfriamento a vácuo obtidos experimentalmente e os valores estimados através do algoritmo da Figura 3.5. Valores médios  $\pm$  Desvio padrão.

Processo	Perda de massa no resfriamento experimental (%)	Perda de massa no resfriamento estimada (%)	Erro relativo (%)
CI-RV (1kg)	11,6 $\pm$ 0,4	11,0 $\pm$ 0,2	5,2
CI-RV (2kg)	11,5 $\pm$ 0,3	10,5 $\pm$ 0,2	8,7
CI-RV (3kg)	11,7 $\pm$ 0,2	10,6 $\pm$ 0,3	9,4

### 3.3.3. Propriedades mecânicas e coordenadas de cor dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC

Com o objetivo de avaliar o efeito do método de resfriamento nas propriedades mecânicas dos filés de peito de frango foram realizados ensaios de dupla compressão (TPA) e de corte. Os parâmetros obtidos a partir da análise de TPA foram dureza, coesividade, elasticidade, gomosidade e mastigabilidade. A partir do ensaio de corte foi obtido o valor da força máxima necessária para atravessar a amostra ( $F_{\text{máx}}$ ). Os valores médios desses parâmetros determinados para os cortes de peito

de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC são apresentados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** - Propriedades mecânicas de dureza (D), coesividade (C), elasticidade (E), gomosidade (G), mastigabilidade (M) e força máxima de corte ( $F_{\text{máx}}$ ) dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC. Valores médios  $\pm$  Desvio padrão.

Processo	D (N)	C	E	G (N)	M (N)	$F_{\text{máx}}$ (N)
CI-RV (1 kg)	113 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	0,39 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	0,65 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	44,0 $\pm$ 3,4 <sup>a</sup>	28,9 $\pm$ 3,2 <sup>a</sup>	38,9 $\pm$ 5,2 <sup>a</sup>
CI-RV (2 kg)	116 $\pm$ 3 <sup>a</sup>	0,39 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	0,65 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	44,9 $\pm$ 2,5 <sup>a</sup>	29,1 $\pm$ 2,6 <sup>a</sup>	-
CI-RV (3 kg)	115 $\pm$ 4 <sup>a</sup>	0,39 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	0,64 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	44,2 $\pm$ 2,7 <sup>a</sup>	28,0 $\pm$ 1,4 <sup>a</sup>	-
CI,RC (1 kg)	102 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	0,34 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>	0,63 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	34,4 $\pm$ 2,3 <sup>b</sup>	21,6 $\pm$ 1,3 <sup>b</sup>	32,4 $\pm$ 2,3 <sup>b</sup>
CI,RC (2 kg)	104 $\pm$ 6 <sup>b</sup>	0,35 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>	0,65 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	36,3 $\pm$ 3,4 <sup>b</sup>	23,4 $\pm$ 2,6 <sup>b</sup>	-
CI,RC (3 kg)	103 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	0,34 $\pm$ 0,02 <sup>b</sup>	0,64 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	35,1 $\pm$ 2,7 <sup>b</sup>	22,3 $\pm$ 2,2 <sup>b</sup>	-

<sup>a-b</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

Observa-se um efeito significativo ( $p < 0,05$ ) do método de resfriamento em todos os parâmetros obtidos no ensaio de TPA, exceto para a elasticidade. Os valores de dureza para as amostras resfriadas a vácuo foram significativamente maiores (entre 113 e 116 N) que os valores observados para as amostras resfriadas pelo método convencional (entre 102 e 106 N). Uma tendência similar foi observada para os parâmetros coesividade, gomosidade e mastigabilidade. Com respeito aos resultados obtidos no ensaio de corte, a força máxima necessária para cortar as amostras também foi significativamente maior ( $p < 0,05$ ) para os cortes de peito de frango submetidos ao processo CI-RV (38,9 N) do que para os submetidos ao processo CI,RC (32,4 N). Esses resultados corroboram os obtidos por outros autores que também verificaram, para cortes de carne bovina e presuntos resfriados a vácuo, valores maiores de dureza e força máxima de cisalhamento em comparação com os obtidos para os produtos resfriados por métodos tradicionais como o resfriamento em câmara fria, por ar forçado e por imersão em água (DESMOND et al., 2000; DRUMMOND et al., 2009). De um modo geral, os maiores valores de parâmetros mecânicos observados para as amostras submetidas ao CI-RV estão relacionados

com os menores teores de umidade de tais amostras em comparação com as amostras submetidas ao processo CI,RC. Tal diferença entre os teores de umidade é ainda maior quando avaliada em relação ao centro da maior espessura dos filés, de onde foram obtidas as amostras para os ensaios mecânicos ( $68,3 \pm 0,4$  g água/ 100 g de amostra para CI-RV e  $70,5 \pm 0,6$  g água/ 100 g de amostra para CI-RC). Isso decorre do fato de que, nas amostras resfriadas em câmara fria, a perda de água por evaporação ocorre na superfície do produto enquanto que no processo de resfriamento a vácuo a evaporação ocorre tanto na superfície como no interior dos poros. Consequentemente, a distribuição da umidade é mais homogênea nas amostras resfriadas a vácuo.

Os valores correspondentes às coordenadas de cor ( $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ) dos filés de peito de frango submetidos ao processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) e ao processo de cozimento seguido do resfriamento em câmara fria (CI,RC) são apresentados na Tabela 3.4. Observa-se que não houve diferença significativa nos resultados obtidos para a luminosidade ( $L^*$ ) e as coordenadas de cromaticidade  $a^*$  e  $b^*$  dos filés de peito de frango submetidos aos métodos RV e RC, conforme verificado também por outros autores para peças de presunto (DESMOND et al., 2000).

**Tabela 3.4** - Coordenadas de cor dos filés de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC. Valores médios  $\pm$  Desvio padrão.

Processo	$L^*$	$a^*$	$b^*$
CI-RV	$83,52 \pm 0,59^a$	$1,39 \pm 0,32^a$	$14,77 \pm 0,59^a$
CI,RC	$83,84 \pm 0,74^a$	$1,42 \pm 0,19^a$	$14,38 \pm 0,84^a$

<sup>a</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

#### 3.3.4. Análises microbiológicas dos filés de peito de frango submetidos aos processos CI-RV e CI,RC

Na Tabela 3.5 são apresentados os resultados para a contagem total de mesófilos e psicrófilos nas amostras *in natura* e nas amostras submetidas ao processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) e ao processo de cozimento seguido do resfriamento em câmara fria (CI,RC). Para as amostras submetidas aos processos CI-RV e CI,RC, as análises microbiológicas foram realizadas em duplicata após o

processamento ( $t=0$ ) e depois de 5 e 10 dias de armazenamento a  $10^\circ\text{C}$  ( $t=5$  e  $t=10$ ). Observa-se, para  $t=0$ , que após o processamento das amostras através de ambos os processos considerados (CI-RV e CI,RC) foi possível reduzir em três ciclos logaritmos a contagem total de mesófilos e em dois ciclos logaritmos a contagem total de psicrófilos, em relação às contagens totais desses micro-organismos nas amostras *in natura*. Adicionalmente, os resultados das contagens totais de mesófilos e psicrófilos durante o armazenamento indicam que há uma tendência menor para o crescimento microbiano nas amostras submetidas ao processo CI-RV. Resultados similares foram observados por McDonald, Sun e Kenny (2000) para amostras de cortes de carne bovina resfriadas a vácuo e por métodos tradicionais (câmara fria, ar forçado e imersão em água). Tais autores associam o menor nível de crescimento microbiano nos cortes de carne submetidos ao RV, em comparação com os cortes resfriados pelos métodos tradicionais, à maior taxa de resfriamento e à menor atividade de água das amostras resfriadas a vácuo.

Um estudo mais detalhado da vida de prateleira dos filés de frango submetidos aos processos considerados neste trabalho, com um maior número de repetições, seria necessário para a validação dos resultados.

**Tabela 3.5** - Contagem total de mesófilos e psicrófilos nas amostras de filés de peito de frango *in natura* e submetidas aos processos CI-RV e CI,RC após o processamento (t=0) e após 5 e 10 dias de armazenamento a 10 °C (t=5 e t=10).

Amostras	t = 0		t = 5 dias		t = 10 dias	
	Mesófilos UFC/g	Psicrófilos UFC/g	Mesófilos UFC/g	Psicrófilos UFC/g	Mesófilos UFC/g	Psicrófilos UFC/g
<i>In natura</i> <sup>1</sup>	1,3 x 10 <sup>4</sup>	1,3 x 10 <sup>4</sup>	-	-	-	-
<i>In natura</i> <sup>2</sup>	1,0 x 10 <sup>4</sup>	1,4 x 10 <sup>4</sup>	-	-	-	-
CI-RV <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>2</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>2</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	1,0 x 10 <sup>4</sup>
CI-RV <sup>2</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>2</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>2</sup>	2,0 x 10 <sup>1</sup>	9,2 x 10 <sup>3</sup>
CI,RC <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>2</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>2</sup>	2,7 x 10 <sup>3</sup>	9,6 x 10 <sup>4</sup>
CI,RC <sup>2</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>2</sup>	< 1,0 x 10 <sup>1</sup>	< 1,0 x 10 <sup>2</sup>	2,0 x 10 <sup>6</sup>	2,4 x 10 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> e <sup>2</sup> indicam os resultados obtidos para dois filés de peito de frango diferentes (análises realizadas em duplicata para cada filé de peito de frango).

### 3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar das condições utilizadas não reproduzirem inteiramente a escala industrial, os resultados apresentados servem como um indicativo dos potenciais benefícios e desvantagens do processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo para filés de peito de frango em comparação com o processo tradicional de cozimento seguido do resfriamento em câmara fria no processamento de filés de peito de frango.

Diversos trabalhos encontrados na literatura demonstram que o resfriamento a vácuo (RV) aumenta significativamente a taxa de resfriamento de peças grandes de carne em comparação com métodos tradicionais de resfriamento. Os resultados apresentados neste capítulo mostram que a técnica de resfriamento a vácuo também pode aumentar significativamente a taxa de resfriamento de cortes de carne pequenos, como os filés de peito de frango, quando comparada à taxa de resfriamento em câmara fria. Além disso, a técnica de resfriamento a vácuo é extremamente vantajosa quando se deseja resfriar peças de carne sujeitas ao empilhamento, em virtude da temperatura de cada peça ser reduzida à mesma taxa quer esteja no topo, no centro ou no fundo de

um recipiente. Todas essas vantagens devem ser adicionadas à possibilidade de integração do resfriamento ao processo de cozimento em um mesmo tanque, evitando a manipulação excessiva do produto e o risco de contaminação microbológica. Por outro lado, em função da elevada perda de massa durante o resfriamento a vácuo, os produtos submetidos ao processo CI-RV apresentam menores conteúdos de umidade que os resfriados em câmara fria, o que afeta de forma significativa os parâmetros mecânicos de dureza, mastigabilidade e força máxima de corte. Em contrapartida, o RV não tem influência significativa sobre a capacidade de retenção de água e a cor dos cortes de peito de frango. Deste modo, para casos onde a carne cozida seja utilizada na preparação de outros produtos como, por exemplo, em recheios ou coberturas para pizzas, a maior perda de massa pode não representar um problema à qualidade sensorial da mesma. Caso contrário, alternativas de processamento visando a redução da perda de massa durante o resfriamento a vácuo serão propostas e analisadas no capítulo seguinte.

Adicionalmente, os resultados de simulação descrevendo a evolução da massa das amostras durante o resfriamento a vácuo foram satisfatórios na predição da perda de massa durante esta etapa do processo, sendo úteis para a estimativa desse parâmetro conhecendo-se apenas a variação de temperatura das amostras.

***ALTERNATIVAS DE  
PROCESSAMENTO PARA A REDUÇÃO DA  
PERDA DE MASSA DURANTE O  
RESFRIAMENTO A VÁCUO***

Este capítulo descreve estudos realizados para avaliar alternativas de processamento visando reduzir ou compensar parte da perda de massa (água) que ocorre durante o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango. Primeiramente, é apresentado um estudo detalhado do processo integrado de cozimento, seguido do resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (CI-RVI), discutido brevemente no Capítulo 2. Finalizando o capítulo, são apresentados os resultados da integração dos processos de cozimento, resfriamento a vácuo e impregnação a vácuo (CI-RV-IV) como uma segunda alternativa para compensar parte da perda de água decorrente da evaporação durante a etapa RV.

#### 4.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, esforços de pesquisa têm sido dirigidos para a melhoria da técnica de resfriamento a vácuo de cortes de carnes, particularmente com respeito à perda de umidade. Busca-se, com isso, tornar o resfriamento a vácuo de carnes um processo mais atrativo para a indústria, sem comprometer a viabilidade econômica e a qualidade sensorial desse tipo de produto.

Alguns estudos mostraram que a redução na taxa de queda da pressão durante o resfriamento a vácuo pode proporcionar uma pequena diminuição na perda de massa do produto (MACDONALD e SUN 2001b, HUBER e LAURINDO, 2005). No entanto, a relação direta entre essas variáveis não é clara e não foi verificada nos estudos conduzidos por Sun e Wang (2003). Os resultados das pesquisas realizadas por McDonald, Sun e Kenny (2001) indicaram que um aumento nos níveis de injeção de salmoura durante a preparação da carne (entre 30 e 35 % da massa inicial) melhora significativamente a qualidade da carne resfriada a vácuo (sabor, cor e textura), comparável com a qualidade do produto resfriado por imersão em água. Entretanto, a injeção de salmoura não é aplicada a todos os produtos a base de carne e os níveis de injeção devem estar de acordo os limites legais. O nível de injeção de salmoura permitido pela legislação brasileira para cortes de frango temperado é de 20% da massa inicial (BRASIL, 2003).

Conforme descrito no Capítulo 1, estudos recentes têm demonstrado que o resfriamento a vácuo de cortes de carne em conjunto com parte de sua solução de cozimento pode reduzir consideravelmente a perda de massa durante o resfriamento e evitar os efeitos indesejáveis no rendimento e na qualidade do produto. Houska et al. (2003) avaliaram o resfriamento a vácuo de peças de carne bovina imersas na solução de cozimento. Os resultados demonstraram que houve penetração da solução nos poros da carne ao final dos experimentos, reduzindo a perda de massa naturalmente provocada pelo processo. Em alguns casos, foi observado um aumento da massa das amostras, particularmente para os cortes de carne injetados com salmoura antes do cozimento. Em estudos posteriores, Houska et al. (2005) reportaram uma melhoria substancial nos parâmetros de qualidade (avaliação sensorial) de cortes de carnes bovina marinados em salmoura com posterior cozimento e resfriamento a vácuo com o produto imerso na mesma solução, em comparação com as amostras cozidas e resfriadas em câmara fria. Cheng e Sun (2006a, 2006c) observaram que peças de

presunto cozidas resfriadas a vácuo em conjunto com a solução de cozimento apresentaram propriedades físicas, mecânicas e sensoriais comparáveis com as obtidas para as peças de presunto resfriadas por métodos tradicionais (câmara fria e ar forçado). Os resultados apresentados por Drummond e Sun (2008) e Drummond et al. (2009) corroboraram que o resfriamento a vácuo com o produto imerso pode produzir cortes de carne bovina cozidos que não apresentam os efeitos adversos dos produtos resfriados a vácuo, possuindo propriedades sensoriais similares aos resfriados por ar forçado. Por outro lado, os autores observaram um incremento no tempo de resfriamento (de 72 °C até 4 °C), para as amostras imersas na água de cozimento (RVI – 195 minutos) em relação ao resfriamento a vácuo convencional (RV- 100 minutos), sendo ambos os tempos inferiores ao obtido no resfriamento por ar forçado (315 minutos). Além disso, os mesmos autores observaram que os produtos resfriados pelo método RVI apresentaram uma perda de massa de 6,0 %, valor similar à perda de massa verificada no processo de resfriamento com ar forçado (7,0 %), e bastante inferior à perda de massa no RV, a qual foi de 13,2 %.

Com base nos resultados dos trabalhos citados anteriormente e considerando a integração dos processos de cozimento e resfriamento a vácuo com o produto imerso (processo CI-RVI) na água de cozimento (equipamento descrito no Capítulo 2), os objetivos deste capítulo foram: (i) avaliar a influência da taxa de redução da pressão durante a etapa RVI na taxa de resfriamento e na perda de massa das amostras de filés de peito de frango; (ii) avaliar a influência da relação entre a massa das amostras e o volume de água de cozimento durante a etapa RVI na taxa de resfriamento e (iii) avaliar o efeito da aplicação de ciclos de variação da pressão durante a etapa RVI na perda de massa das amostras. Além disso, visando associar as maiores taxas de resfriamento obtidas usando o RV com as menores perdas de massa obtidas com o RVI (resultados apresentados no Capítulo 2), uma nova abordagem integrada aos processos de cozimento e resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango é proposta neste capítulo. Tal abordagem baseia-se no uso da técnica de impregnação a vácuo (IV) após o resfriamento a vácuo convencional. Com isso, busca-se reduzir a perda de massa global através da impregnação dos poros da carne com uma solução de interesse, utilizando os gradientes de pressão impostos ao sistema (aplicação de vácuo e restabelecimento da pressão atmosférica) e explorando a característica de maior porosidade do produto resfriado a vácuo. Tal característica é descrita em detalhes por McDonald e Sun (2001).



## 4.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.2.1. Dispositivo experimental

Conforme descrito no Capítulo 2 (seção Material e Métodos, item 2.2.1).

### 4.2.2. Matéria-prima e preparo das amostras

Conforme descrito no Capítulo 3 (seção Material e Métodos, item 3.2.1). Cabe destacar que, para todos os processos avaliados neste capítulo, foram utilizados 4 filés de peito de frango por experimento, com massa total de aproximadamente 1 kg.

### 4.2.3. Processo integrado de cozimento seguido do resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (CI-RVI)

#### 4.2.3.1. Metodologia experimental para o cozimento e resfriamento das amostras

A metodologia utilizada para o cozimento e resfriamento a vácuo das amostras imersas na água de cozimento (CI-RVI) foi similar à metodologia apresentada no Capítulo 3 (seção Material e Métodos item 3.2.2) para o processo CI-RV, com algumas modificações conforme descrito a seguir.

Para o processo CI-RVI, um recipiente com volume total de 5 L foi colocado no interior da câmara apresentada na Figura 2.1 (Capítulo 2, seção 2.2.1) com o objetivo de reduzir o volume de água necessário para cobrir as amostras durante o processo. Desta forma, o aquecimento da água de cozimento foi realizado de forma indireta. Inicialmente, os termopares foram inseridos nas seções de maior e menor espessura das amostras e as mesmas foram alocadas no interior de um cesto perfurado (com massa determinada previamente). Determinou-se então a massa do conjunto cesto-amostras e em seguida o mesmo foi submerso na água de cozimento pré-aquecida a 100 °C no interior do recipiente descrito anteriormente. A relação entre a massa de amostras e o volume de água foi de 1:3 (kg:L). Tal relação foi determinada em experimentos preliminares como sendo a mínima necessária para que a temperatura da água de cozimento não fosse modificada significativamente com a

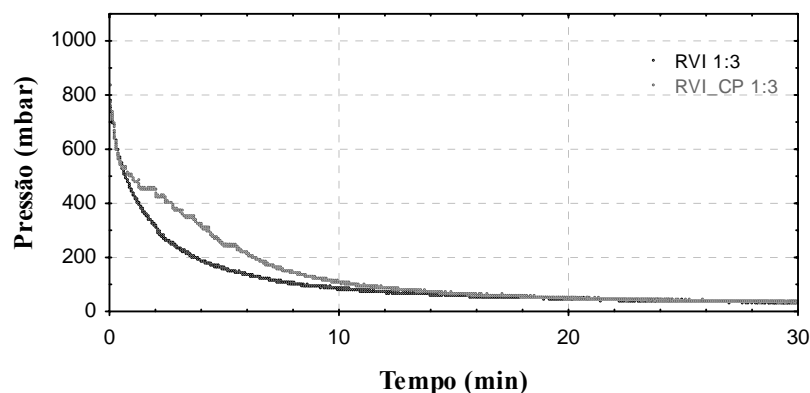
imersão das amostras. O cozimento foi realizado à pressão atmosférica e até a temperatura das amostras atingirem 80 °C ± 2 °C na metade da seção de maior espessura ( $T_1$ ). Antes do acionamento da bomba de vácuo (início do processo de resfriamento), a água utilizada para o aquecimento da câmara (água externa ao recipiente de cozimento) foi drenada e o conjunto cesto-amostras foi rapidamente pesado (no exterior da câmara) e novamente submerso no líquido de cozimento. Com o objetivo de evitar que uma grande quantidade da água de cozimento transbordasse do recipiente durante a etapa de resfriamento a vácuo (devido à intensa agitação do líquido provocada pelas bolhas formadas durante a aplicação do vácuo), uma tampa perfurada foi acoplada ao mesmo. O início do processo de resfriamento a vácuo foi marcado pelo fechamento hermético da câmara e o acionamento da bomba de vácuo. O mesmo foi realizado até que a temperatura de todas as amostras atingisse aproximadamente 9 °C na metade da seção de maior espessura [que corresponde à temperatura de saturação da água na pressão mínima atingida na câmara durante o resfriamento a vácuo (11 mbar)]. Após o resfriamento, as amostras foram retiradas da solução e o líquido em excesso aderido à superfície foi removido com o uso de papel absorvente, colocado em contato com cada amostra por 5 segundos de cada lado. Os filés foram pesados e submetidos às análises descritas no item 4.2.5.

Para este processo foram avaliados:

- (i) A influência da taxa de redução da pressão durante a etapa RVI na taxa de resfriamento e na perda de massa das amostras.

Para casos onde não foi possível preencher todo o volume da câmara com a solução de cozimento e a etapa de resfriamento a vácuo com as amostras imersas foi realizada no interior de outro recipiente (como descrito anteriormente). Nesses casos, o controle da taxa de redução da pressão pode contribuir para evitar o transbordamento da solução (agitada pelas bolhas de vapor geradas) e para garantir que todas as amostras permaneçam submersas durante o processo. Desta forma, avaliou-se a influência da taxa de redução da pressão na câmara na taxa de resfriamento e na perda de massa das amostras. Curvas típicas de redução da pressão na câmara durante o RVI [para a relação entre a massa de amostras e o volume de água de aproximadamente 1:3 (kg:L)] realizadas sem e com controle na taxa de redução da pressão são apresentadas na Figura 4.1. O controle na redução da pressão foi realizado através da abertura intermitente de uma válvula solenóide acoplada à câmara (ver Figura 2.1). O controle foi realizado para a faixa

de pressões compreendida entre 550 mbar e 200 mbar (período onde a taxa de redução da pressão sem a realização do controle é acentuada).



**Figura 4.1** – Curvas típicas da pressão na câmara durante o resfriamento a vácuo com as amostras imersas na água de cozimento [relação entre a massa de amostras e o volume de água de cozimento de 1:3 (kg:L)] realizado sem (RVI) e com controle na taxa de redução da pressão (RVI\_CP).

(ii) A influência da relação entre a massa das amostras e o volume de água de cozimento durante a etapa RVI na taxa de resfriamento das amostras.

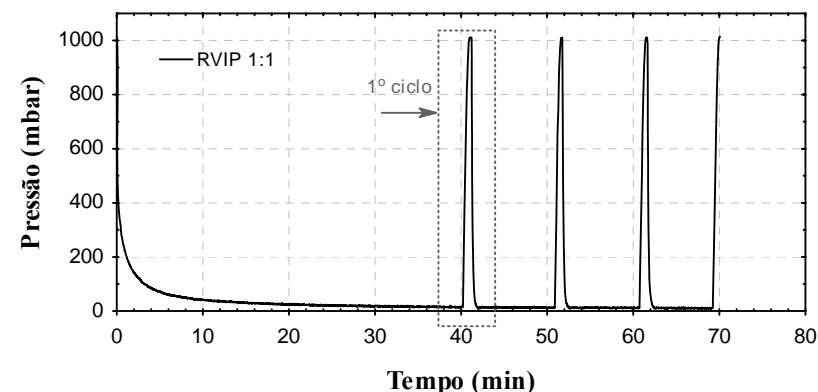
Neste caso, duas relações foram consideradas para a etapa de resfriamento: (a) a utilizada inicialmente durante a etapa de cozimento [1 kg de amostras (massa das amostras *in natura*) imersas em 3 L de água], a qual denominou-se RVI 1:3 (kg:L) e (b) após a drenagem de parte da água utilizada no cozimento, onde somente o volume de água necessário para cobrir as amostras cozidas permaneceu no recipiente (o qual foi de aproximadamente 1 L). Este segundo processo foi denominado RVI 1:1 [relação entre a massa inicial das amostras *in natura* e o volume de água na etapa de resfriamento de aproximadamente 1:1 (kg:L)].

(iii) O efeito da aplicação de ciclos de variação da pressão durante a etapa RVI na perda de massa das amostras.

Para a etapa de resfriamento a vácuo com o produto imerso avaliou-se também o efeito da aplicação de ciclos de variação da pressão na perda de massa das amostras. Conforme ilustrado na Figura 4.2, cada ciclo corresponde ao restabelecimento da pressão atmosférica seguido

de outro pulso de vácuo (vácuo-pressão atmosférica-vácuo). Neste trabalho, foi considerada a aplicação de três desses ciclos após a água de imersão ter atingido a temperatura de 15 °C, com um intervalo de aproximadamente 10 minutos entre os ciclos. A relação entre a massa inicial de amostras e o volume de água de cozimento utilizada na etapa de resfriamento a vácuo imerso com ciclos de variação da pressão foi de aproximadamente 1:1 (kg:L) e essa etapa foi denominada RVIP 1:1. Este processo foi comparado com os avaliados no item (ii) em relação à taxa de resfriamento, à perda de massa e às propriedades mecânicas das amostras obtidas.

Todos os experimentos descritos nos itens (i), (ii) e (iii) foram realizados em triplicata, sendo que em cada repetição foram utilizadas 4 amostras de filés de peito de frango.



**Figura 4.2** – Curvas típicas da pressão na câmara durante o resfriamento a vácuo com as amostras imersas na água de cozimento [relação entre a massa de amostras e o volume de água de cozimento de 1:1 (kg:L)] realizado com ciclos de variação da pressão (vácuo-pressão atmosférica-vácuo).

#### 4.2.4. Processo integrado de cozimento, resfriamento a vácuo e impregnação a vácuo de filés de peito de frango (CI-RV-IV)

##### 4.2.4.1. Metodologia experimental para o cozimento, resfriamento e impregnação das amostras.

Para a realização dos experimentos de cozimento, resfriamento a vácuo e impregnação a vácuo foi utilizado o dispositivo experimental descrito no Capítulo 2 (seção Material e Métodos, item 2.2.1). Para cada experimento foram utilizados 4 filés de peito de frango sem osso e sem pele (conforme apresentado na Figura 2.2), com massa total de aproximadamente 1 kg.

As etapas de cozimento e de resfriamento a vácuo referentes ao processo CI-RV foram realizadas da mesma forma como descrito em detalhes no Capítulo 3 (seção Material e Métodos, item 3.2.1). As amostras foram cozidas por imersão em água pré-aquecida a 100 °C, até as temperaturas dos filés atingirem 80 °C ± 2 °C na metade da seção de maior espessura e a etapa de resfriamento a vácuo foi realizada até as amostras atingirem 9 °C [temperatura correspondente à temperatura de saturação da água na pressão mínima atingida na câmara (11mbar)]. Ao final do resfriamento, determinou-se a massa das amostras e em seguida as mesmas foram realocadas no interior da câmara em um recipiente contendo a solução a ser impregnada [relação entre a massa das amostras e o volume de solução igual a 1:1 (kg:L)]. Durante o processo de impregnação, as amostras permaneceram submersas por 15 minutos sob vácuo ( $P_1$  - na pressão estabelecida para cada experimento, conforme descrito a seguir). Após esse período, as mesmas permaneceram na câmara apenas o tempo necessário para se restabelecer a pressão atmosférica ( $P_2$ ) e retirá-las (~90s). Os períodos de vácuo e relaxação foram escolhidos devido à observação experimental preliminar, que indicou que estes períodos eram suficientes para alcançar as condições de equilíbrio mecânico nos dois passos da IV, o que foi confirmado no estudo da cinética de impregnação a vácuo (item 4.2.6). Ao final da IV, as amostras foram retiradas da solução e o líquido em excesso aderido à superfície foi removido com o uso de papel absorvente, colocado em contato com cada amostra por 5 segundos de cada lado. Os filés foram pesados e submetidos às análises descritas no item 4.2.5.

Para o processo CI-RV-IV foram avaliados:

- (i) A influência da intensidade do vácuo na impregnação das amostras.

Com o objetivo de verificar a influência da intensidade do vácuo na impregnação da solução nas amostras foram avaliadas as pressões de 11, 130 e 270 mbar, utilizando água a 5 °C como fluido impregnante. Os filés de peito de frango cozidos e resfriados permaneceram imersos no líquido impregnante por 15 minutos sob vácuo (nas pressões

analisadas), seguido do restabelecimento da pressão atmosférica. A pressão de vácuo de 11 mbar foi a mínima obtida na câmara (tanque de cozimento-resfriamento) e as pressões de 130 e 270 mbar foram reguladas através de um sistema automático de controle de pressão ligado a uma válvula solenóide. Para fins de comparação, avaliou-se também a impregnação à pressão atmosférica, onde as amostras permaneceram submersas em água a 5 °C pelo mesmo período (etapa denominada IPatm).

Os experimentos descritos foram realizados em triplicata para cada condição experimental avaliada, sendo que em cada repetição foram utilizadas 4 amostras de filés de peito de frango. Conforme mencionado anteriormente, após o processo as amostras foram pesadas e submetidas às análises descritas no item 4.2.5.

- (ii) Avaliação qualitativa da impregnação de um corante

Com o objetivo de avaliar qualitativamente e visualizar a impregnação de um líquido nos poros dos filés de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo foi utilizada uma solução 0,1 % em massa de azul de metileno a 5 °C como fluido impregnante. Após o processo de resfriamento a vácuo, as amostras foram submersas nessa solução por 15 minutos a uma pressão absoluta de 11 mbar, seguido do restabelecimento da pressão atmosférica. Avaliou-se também o processo de impregnação à pressão atmosférica (IPatm), no qual amostras cozidas e resfriadas a vácuo foram submersas por 15 minutos na solução contendo o corante. Após o processo de impregnação, as amostras foram seccionadas e fotografadas para observação e registro da penetração da solução evidenciada pelo corante.

Cabe mencionar que durante o processo experimental foi necessária a abertura da câmara, a retirada das amostras para determinação da massa em cada etapa do processo, além da colocação de um recipiente contendo a solução para realizar a impregnação (visto que uma grande quantidade de solução seria necessária para cobrir as amostras no interior da câmara). No entanto, a etapa de impregnação pode ser realizada de maneira integrada aos processos de cozimento e resfriamento a vácuo. Para tal, a câmara de vácuo deve estar conectada ao recipiente contendo a solução e ao final do resfriamento a vácuo, com a abertura de uma válvula, a solução a ser impregnada pode ser transferida à câmara por diferença de pressão, uma vez que a câmara encontra-se submetida a pressões subatmosféricas. Desta forma, o processo pode ser totalmente integrado, sem a necessidade de manipular o produto ou transferi-lo a outro recipiente. Ainda, é importante salientar

que, em virtude do produto ter sofrido um tratamento térmico equivalente à pasteurização, o líquido a ser impregnado (água, molho, salmoura) deve também ter passado por um tratamento similar antes da impregnação e ser transferido de forma asséptica ao tanque de cozimento-resfriamento, para evitar a contaminação do produto.

#### 4.2.5. Parâmetros avaliados para as amostras submetidas aos processos CI-RVI, CI-RVIP e CI-RV-IV

##### 4.2.5.1. Determinação das variações de massa das amostras durante cada etapa do processo.

As variáveis determinadas para cada etapa do processo foram: a perda de massa no cozimento ( $\Delta m_C$ ), a perda de massa no resfriamento ( $\Delta m_R$ ), a perda de massa global ( $\Delta m_G$ ), e o ganho de massa na impregnação ( $\Delta m_I$ ) de acordo com as Equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

$$\Delta m_C = \frac{m_o - m_C}{m_o} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$\Delta m_R = \frac{m_C - m_R}{m_C} \cdot 100 \quad (4.2)$$

$$\Delta m_G = \frac{m_o - m_R}{m_o} \cdot 100 \quad (4.3)$$

$$\Delta m_I = \frac{m_I - m_R}{m_R} \cdot 100 \quad (4.4)$$

onde  $m_o$  é a massa inicial das amostras,  $m_C$  é a massa das amostras após a etapa de cozimento,  $m_R$  é a massa das amostras após o processo de cozimento e resfriamento e  $m_I$  é a massa das amostras após a impregnação. Todos os parâmetros foram expressos como a média dos valores obtidos nas três repetições de cada processo.

##### 4.2.5.2. Determinação do teor de umidade final das amostras

Conforme descrito no Capítulo 3 (seção Material e Métodos, item 3.2.4).

##### 4.2.5.3. Capacidade de retenção de água das amostras (CRA)

A capacidade de retenção de água das amostras submetidas aos processos CI-RVI, CI-RVIP e CI-RV-IV foi determinada conforme descrito no Capítulo 3 (seção Material e Métodos, item 3.2.5).

##### 4.2.5.4. Ensaios mecânicos

As propriedades mecânicas das amostras submetidas aos processos CI-RVI, CI-RVIP e CI-RV-IV foram determinadas a partir dos ensaios de corte (força máxima de cisalhamento) e dupla compressão-TPA (dureza, coesividade, elasticidade, gomosidade e mastigabilidade) conforme descrito no Capítulo 3 (seção Material e Métodos, item 3.2.6).

#### 4.2.6. Cinética de impregnação a vácuo de filés de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo

##### 4.2.6.1. Dispositivo experimental

Para o estudo da cinética de impregnação a vácuo foi utilizado o dispositivo experimental apresentado por Laurindo et al. (2007), o qual permite o registro da variação temporal da massa das amostras durante as etapas de degaseificação (aplicação do vácuo) e impregnação, bem como da evolução da pressão no sistema durante todo o processo. Esse dispositivo, esquematizado na Figura 4.3, consiste em uma câmara de vácuo (volume interno de 75 L) conectada à mesma linha de vácuo descrita no Capítulo 2 (seção 2.2.1). Dentro da câmara, uma célula de carga do tipo *single point* (Alfa Instrumentos, Modelo GL1, Brasil), com capacidade de 1000,0 g e precisão de 0,1 g, é sustentada por um suporte rígido e acoplada a um recipiente perfurado contendo a amostra através de uma haste de metal. O sistema composto pela haste-recipiente perfurado-amostra é imerso na solução impregnante e a variação do valor da força resultante ( $F_r$ ) agindo nesse sistema, dada pela diferença entre a força peso e a força de empuxo associadas ao mesmo, é medida pela célula de carga e registrada por um indicador de pesagem (Alfa Instrumentos, Modelo 3102, Brasil) conectado a um computador. A aquisição da pressão na câmara durante os experimentos é realizada por um sensor de pressão (Altem Tecnologia, Florianópolis, Brasil) conectado a um sistema de aquisição de dados especialmente desenvolvido para este fim. O controle da temperatura da câmara é

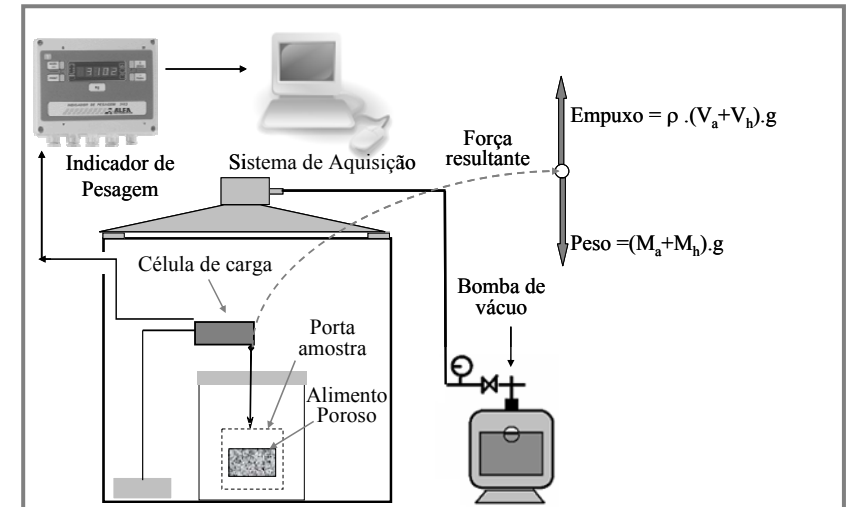
realizado através de uma camisa alimentada por água proveniente de um banho termostático (Microquímica, modelo MQBMP-01, Brasil).

Possíveis expansões de volume da amostra durante a aplicação do vácuo aumentam a força de empuxo enquanto a impregnação da amostra com a solução externa, ocorrida após o restabelecimento da pressão inicial, aumenta a força peso. Em processos de impregnação a vácuo nos quais as amostras não se deformam ou as variações de volume são desprezíveis em relação ao volume total da amostra, a evolução da força resultante representa diretamente a massa perdida (etapa de degaseificação) ou a massa acrescentada (etapa de impregnação) à amostra, ou seja, a cinética da variação de massa durante a impregnação a vácuo (CARCIOFI, 2009).

O valor medido pela célula de carga ( $F_r / g$ ) com as constantes do sistema e com as variáveis de processo pode ser representado pela Equação 4.5.

$$\frac{F_r}{g} = (M_a + M_h) - \rho \cdot (V_a + V_h) \quad (4.5)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\rho$  é a densidade da solução impregnante,  $M_a$  é a massa da amostra em um dado instante,  $M_h$  é a massa da haste rígida e do recipiente perfurado,  $V_a$  é o volume da amostra em um dado instante e  $V_h$  é o volume da haste rígida e do recipiente perfurado imersos na solução.



**Figura 4.3** – Representação esquemática do dispositivo usado para o estudo da cinética de IV e do balanço de forças no sistema haste-porta amostra-amostra.

#### 4.2.6.2. Metodologia experimental

Previamente à realização dos experimentos com as amostras, o líquido impregnante foi desaerado ( $P = 40$  mbar por 2 horas) para retirada dos gases dissolvidos, os quais acarretariam uma variação na força de empuxo do sistema durante o período de vácuo. Ainda com objetivo de corrigir os efeitos da aplicação de vácuo sobre a célula de carga, realizaram-se ensaios com o cesto perfurado, sem amostra em seu interior, submerso no líquido impregnante nas mesmas condições experimentais pré-estabelecidas para as amostras.

Para cada experimento, uma amostra de filé de frango cozida e resfriada a vácuo, com massa de aproximadamente  $150 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ , foi acondicionada no cesto perfurado e submersa em água a  $5^\circ\text{C}$  no interior da câmara de vácuo do dispositivo descrito anteriormente. Durante os experimentos, a temperatura no interior da câmara foi controlada em  $5^\circ\text{C}$ . As amostras foram submetidas à pressão de vácuo ( $P_1 = 40$  mbar) durante 900 s (aproximadamente 350 s para redução desde  $P_{\text{atm}}$  até  $P_1$ ), ao passo que a etapa 2 (etapa à  $P_{\text{atm}}$ ) foi de 60 s. O valor de pressão de vácuo foi selecionado suficientemente acima da pressão de saturação da

água na temperatura de realização dos experimentos, para evitar ebulição do líquido.

As massas das amostras foram determinadas em balança semi-analítica (Tecnal, linha 6 k, Brasil) antes e após a impregnação e o ganho de massa ( $\Delta m_I$ ) foi calculado de acordo com a Equação 4.4 (em relação à massa da amostra cozida e resfriada). Analogamente, determinou-se o ganho de massa durante a impregnação através dos valores registrados pela célula de carga no início e no final do processo ( $\Delta m_{IC}$ ), de acordo com a Equação 4.6. O valor do  $\Delta m_{IC}$  pode ser considerado um valor aparente, pois, neste parâmetro, estão embutidos os efeitos relativos à variação da força de empuxo e da possível drenagem da solução nativa presente na amostra antes da impregnação (CARCIOFI, 2009).

$$\Delta m_{IC} = \frac{(F_r / g)_f - (F_r / g)_i}{m_R} \cdot 100 \quad (4.6)$$

onde  $(F_r/g)_i$  é o valor registrado pela célula de carga no início do processo (logo após o conjunto haste-cesto perfurado-amostra ser submerso no líquido impregnante),  $(F_r/g)_f$  é o registrado pela célula de carga ao final do processo e  $m_R$  é a massa da amostra no início do processo (massa da amostra cozida e resfriada a vácuo).

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

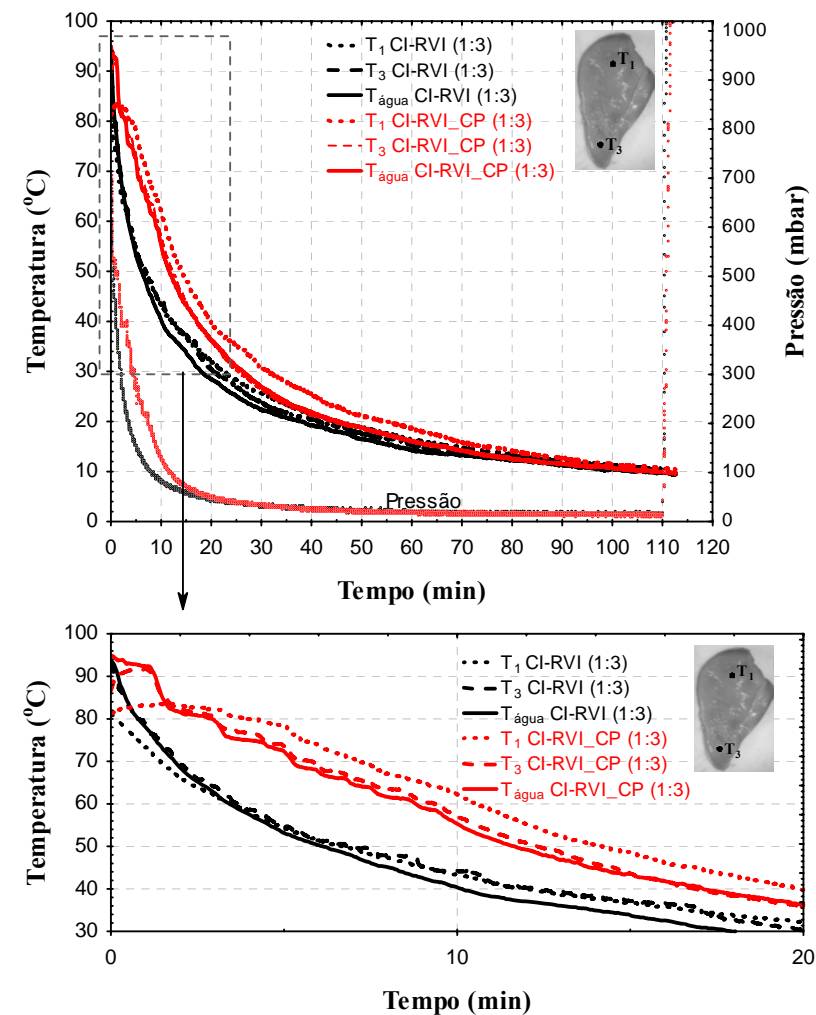
#### 4.3.1. Processo integrado de cozimento, seguido do resfriamento a vácuo de filés de peito de frango imersos na água de cozimento (CI-RVI)

##### 4.3.1.1. Influência da taxa de redução da pressão na câmara durante a etapa RVI na taxa de resfriamento e na perda de massa das amostras

Na Figura 4.4 são apresentados os perfis de temperatura dos filés de peito de frango (nas seções de maior e de menor espessura) e da água de cozimento durante a etapa de resfriamento a vácuo, com o produto imerso, para os processos realizados com e sem controle na taxa de redução da pressão na câmara (RVI\_CP e RVI). Para uma melhor visualização dos dados e considerando a similaridade das curvas, somente os resultados de um experimento para cada processo considerado são apresentados nessa figura. Observa-se que o controle inicial na redução da pressão afetou de forma considerável a taxa de resfriamento das amostras e da água de cozimento, em relação ao processo realizado sem controle (RVI), principalmente nos primeiros 30 minutos do processo. Adicionalmente, nota-se um pequeno aumento na temperatura das amostras submetidas ao processo CI-RVI\_CP nos primeiros minutos da etapa de resfriamento a vácuo. Isso pode ser explicado pelo maior tempo de contato das amostras com a água de cozimento ainda quente e que é resfriada a uma taxa menor em função do controle de pressão. Após 5 minutos do acionamento da bomba de vácuo (início do resfriamento), a diferença entre as temperaturas das amostras submetidas aos processos CI-RVI\_CP e CI-RVI foi de aproximadamente 20 °C. Por outro lado, o controle inicial da taxa de redução da pressão utilizado não afetou o tempo total de resfriamento das amostras.

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores médios das perdas de massa durante cada etapa do processo (etapa de cozimento e etapa de resfriamento a vácuo com o produto imerso), das perdas de massa globais e dos teores de umidade finais das amostras submetidas aos processos CI-RVI 1:3 e CI-RVI\_CP 1:3. Com respeito à perda de massa no resfriamento, o valor médio para o processo realizado com controle inicial na taxa de redução da pressão (CI-RVI\_CP) foi significativamente maior (5,9 %) que o observado para o processo sem o

controle na redução da pressão (CI-RVI) (4,2 %). A maior perda de massa na etapa RVI\_CP pode estar associada à redução na capacidade de retenção de água do músculo devido ao “sobrecozimento” verificado nas amostras. Esse sobrecozimento é resultado do aumento na temperatura das mesmas no início da etapa de resfriamento a vácuo imerso e do maior tempo de contato das amostras com o líquido de cozimento a uma temperatura mais elevada (ver Figura 4.4). Desta forma, nos valores de perda de massa no resfriamento para a etapa RVI\_CP estão embutidas as contribuições relativas à perda de água por evaporação, ao ganho de massa pela impregnação do líquido de cozimento com o restabelecimento da pressão atmosférica e à perda de massa associada ao sobrecozimento. Em consequência dessa maior perda de massa na etapa de resfriamento, as amostras submetidas ao processo CI-RVI\_CP apresentaram um conteúdo de umidade significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que as amostras submetidas ao processo sem controle na taxa de redução da pressão (CI-RVI).



**Figura 4.4** – Comparação entre os perfis de temperatura das amostras e da água de cozimento durante a etapa de resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento realizados sem (RVI) e com (RVI\_CP) controle na taxa de redução da pressão na câmara.

**Tabela 4.1** - Parâmetros avaliados para os processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo com as amostras imersas na água de cozimento realizados sem (CI-RVI 1:3) e com controle inicial na taxa de redução da pressão (CI-RVI\_CP 1:3). Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão.

Processo de cozimento-resfriamento	Perda de massa no cozimento (%)	Perda de massa no resfriamento (%)	Perda de massa global (%)	Teor de umidade final (g água/100 g amostra)
CI-RVI 1:3	19,3 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	4,2 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	22,8 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>	70,2 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>
CI-RVI_CP 1:3	19,1 $\pm$ 1,4 <sup>a</sup>	5,8 $\pm$ 0,4 <sup>b</sup>	23,9 $\pm$ 1,2 <sup>b</sup>	69,4 $\pm$ 0,6 <sup>b</sup>

<sup>a-b</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

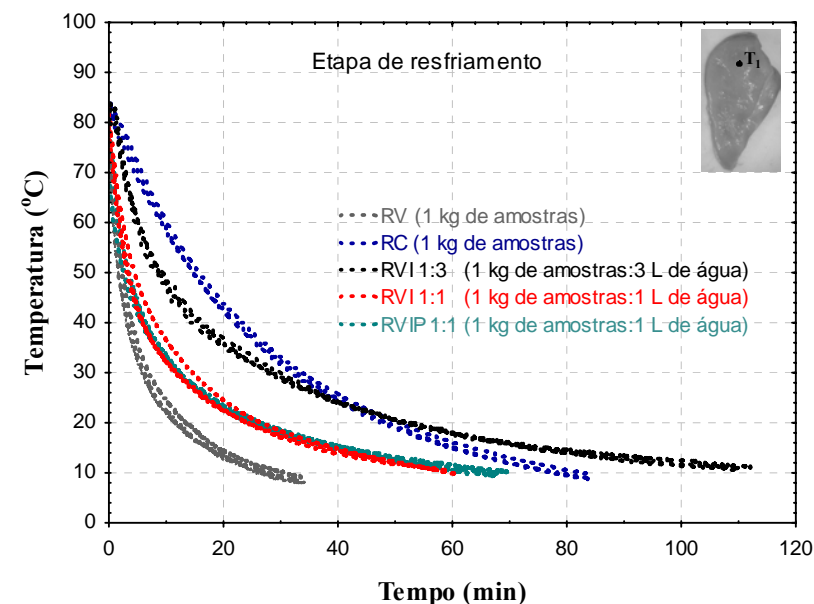
Com base nos resultados obtidos para perda de massa e considerando que praticamente o mesmo volume do líquido de cozimento foi drenado da parte inferior da autoclave ao final do resfriamento (relativo ao volume de líquido que transbordou do recipiente devido à intensa agitação durante a etapa RVI), optou-se por não utilizar o controle na taxa de redução da pressão nos experimentos discutidos a seguir.

#### 4.3.1.2. Influência da relação entre a massa das amostras e o volume de água e de pulsos de variação da pressão durante o resfriamento a vácuo do produto imerso na água de cozimento

A partir dos resultados apresentados anteriormente para o resfriamento a vácuo do produto imerso no volume total da água de cozimento [relação entre a massa inicial de amostras e o volume de água igual a 1:3 (kg:L)], observou-se que o tempo para a redução da temperatura das amostras de aproximadamente 80 °C até 10 °C através do método RVI foi muito maior que o tempo necessário para o resfriamento da mesma quantidade de produto (1 kg) pelos métodos RV e RC (resultados apresentados no Capítulo 3 - aproximadamente 110 min para RVI e 28 min e 80 min para RV e RC, respectivamente). Em comparação com o método RV, o tempo para o resfriamento das amostras imersas na água de cozimento foi aproximadamente 4 vezes maior. Desta forma, avaliou-se também a taxa de resfriamento das amostras após a drenagem de parte da água de cozimento antes do resfriamento, onde somente o volume de água suficiente para cobrir as

amostras permaneceu no recipiente [relação entre a massa inicial de amostras e o volume de água de aproximadamente 1:1 (kg:L)]. Para este último processo, avaliou-se, ainda, a influência de ciclos de variação da pressão na taxa de resfriamento e nos parâmetros de qualidade das amostras obtidas (processo CI-RVIP 1:1).

Na Figura 4.5 são apresentados os perfis de temperatura das amostras (na metade da seção de maior espessura) durante a etapa de resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (RVI) para as diferentes relações consideradas entre a massa inicial de amostras e o volume de água de cozimento [1:3 e 1:1 (kg:L)] e para o RVI com pulsos de variação da pressão durante o resfriamento (RVIP 1:1). Nessa figura, também são apresentados os perfis de temperatura das amostras durante as etapas de resfriamento a vácuo (RV) e de resfriamento em câmara fria (RC) discutidos no capítulo anterior.



**Figura 4.5** – Comparação entre os perfis de temperatura das amostras na seção de maior espessura durante a etapa de resfriamento dos processos CI-RVI 1:3; CI-RVI 1:1; CI-RVIP 1:1; CI-RV e CI,RC.

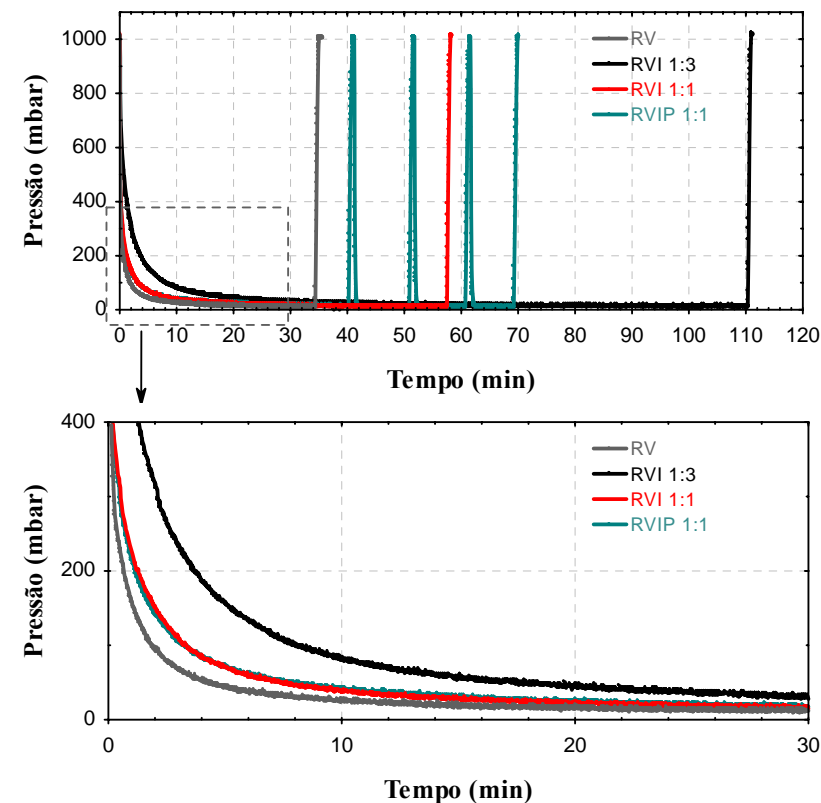
Observa-se que a drenagem de parte da água de cozimento antes do resfriamento a vácuo com o produto imerso possibilitou um



considerável aumento na taxa de resfriamento das amostras (RVI 1:1) em comparação com o processo realizado com as amostras imersas no volume total da água utilizada no cozimento (RVI 1:3). O tempo necessário para a redução da temperatura dos filés de peito de frango de aproximadamente 80 °C até 10 °C foi praticamente duas vezes menor para o RVI 1:1 quando comparado com o RVI 1:3 (Figura 4.5). Uma vez que durante a etapa RVI o resfriamento do líquido de cozimento é obtido pela evaporação da água e as amostras são resfriadas praticamente à mesma taxa que o líquido (devido a pressão ser transmitida por todo o sistema e a evaporação ocorrer tanto na superfície quanto nos poros das amostras, ver Figura 4.4 para RVI 1:3), o volume de água presente influencia a taxa de resfriamento do produto pois uma maior massa de água é evaporada e, como consequência, uma maior quantidade de vapor precisa ser retirada do sistema. Durante a etapa RVI 1:3 a quantidade de água evaporada foi três vezes maior que durante a etapa RVI 1:1, com base na mesma variação de temperatura das amostras e do líquido de cozimento. Conforme já discutido no Capítulo 3, sobre o resfriamento a vácuo de diferentes quantidades de produto, essa maior quantidade de vapor gerado interfere de forma significativa na taxa de redução da pressão na câmara, o que também pode ser verificado na Figura 4.6 para os processos avaliados neste capítulo. Desta forma, fica ainda mais evidente a importância do sistema de condensação do vapor de água no processo de resfriamento a vácuo. Vale lembrar que, à pressão de 11 mbar, o volume específico do vapor é igual a 118,8 m<sup>3</sup>/kg (GEANKOPLIS, 1993). Se o condensador estiver sub-dimensionado, o sistema de bombeamento não consegue manter a mesma taxa de redução da pressão.

Ainda na Figura 4.5, nota-se que a taxa de resfriamento das amostras durante o método RVI 1:1 também foi consideravelmente maior do que a taxa de resfriamento das mesmas pelo método tradicional em câmara fria (RC). Isso mostra a eficiência do resfriamento evaporativo a baixas pressões quando comparado com a transferência de calor condutiva e convectiva durante o RC.

Como esperado, as taxas de resfriamento das amostras pelos métodos RVI e RVIP foram similares. No entanto, um pequeno incremento no tempo para o resfriamento das amostras de aproximadamente 80 °C até 10 °C foi observado para o RVIP em função da aplicação dos repetidos ciclos de pressão durante o processo.



**Figura 4.6** – Comparação entre as curvas de pressão na câmara durante a etapa de resfriamento dos processos CI-RV; CI-RVI 1:3; CI-RVI 1:1 e CI-RVIP 1:1.

Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros do processo (perda de massa no cozimento, perda de massa no resfriamento e perda de massa global), o teor de umidade final e a capacidade de retenção de água das amostras submetidas aos processos integrados de cozimento-resfriamento a vácuo com o produto imerso na água cozimento (CI-RVI 1:3; CI-RVI 1:1 e CI-RVIP 1:1), assim como os resultados desses parâmetros para o processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo (CI-RV) e para o processo de cozimento seguido do resfriamento em câmara fria (CI,RC) discutidos no capítulo anterior.

Com relação à perda de massa no resfriamento, não houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre os métodos RVI para as duas

relações entre a massa de amostras e o volume de água de cozimento consideradas nesta etapa (1:3 e 1:1). Esse resultado era esperado, pois nas duas situações há excesso de água e impregnação a vácuo. Por outro lado, as amostras submetidas ao método de resfriamento a vácuo imerso com ciclos de variação da pressão (etapa RVIP) apresentaram valores significativamente menores ( $p < 0,05$ ) de perda de massa (2,8 %) quando comparados aos valores observados para o método RVI (entre 4,2 e 4,8 %). As alterações bruscas da pressão na câmara durante os repetidos ciclos de pulso (de 11 mbar até 1013 mbar e retorno a 11 mbar em poucos segundos - ver Figura 4.6) podem ter provocado um aumento adicional nos espaços entre as fibras musculares e entre os feixes de fibras, como resultado da expansão do gás no interior dos poros das amostras durante a etapa de redução da pressão de cada ciclo (FITO et al., 1996; LAURINDO et al., 2007; CARCIOFI, 2009). Deste modo, torna-se possível a impregnação de uma maior quantidade de água de cozimento na estrutura porosa do tecido muscular ao final do processo, com o restabelecimento da pressão atmosférica. Resultados similares foram observados por Cheng e Sun (2006b) no estudo do resfriamento a vácuo de peças de presunto imersas no líquido de cozimento (solução 2 % de NaCl). Para as amostras de presunto submetidas ao método RVIP com 3 e 7 ciclos de variação da pressão (vácuo-pressão atmosférica-vácuo) os autores acima relataram valores de perda de massa que foram estatisticamente similares (entre 4,9 e 5,3 % com  $p > 0,05$ ), enquanto que para as amostras submetidas ao processo RVI os valores de perda de massa foram significativamente maiores (em média 7,0% com  $p < 0,05$ ). Os autores ainda concluíram que há uma limitação na redução da perda de massa com o aumento do número de ciclos, devido à limitação na expansão do volume das amostras (relacionada com o aumento da porosidade da carne).

Adicionalmente, nota-se na Tabela 4.2 que as amostras submetidas ao método de resfriamento a vácuo com o produto imerso na água de cozimento (RVI e RVIP) também apresentaram valores de perda de massa significativamente menores ( $p < 0,05$ ) que aquelas submetidas ao método tradicional de resfriamento em câmara fria (RC). Com relação ao teor de umidade final das amostras, não foi observada diferença significativa entre os métodos CI-RVI e CI-RVIP, embora uma menor perda de massa (água) no resfriamento ter sido verificada para a etapa RVIP (Tabela 4.2). Isso pode estar relacionado com a variabilidade na perda de massa durante o cozimento (devido a fatores inerentes à matéria-prima e a fatores experimentais, como, por exemplo, a posição do termopar na amostra). De fato, o valor médio da perda de

massa no cozimento para o processo CI-RVIP foi maior que o valor médio observado na etapa de cozimento do processo CI-RVI, embora a diferença não seja estatisticamente significativa ( $p > 0,05$ ). Por outro lado, os teores de umidade das amostras submetidas aos processos CI-RVI e CI-RVIP foram significativamente maiores (entre 70,3 e 70,6 g água/100 g de produto) que os observados para as amostras submetidas aos processos CI-RV (67,7 g/100g) e CI,RC (68,5 g água/100g). A capacidade de retenção de água, expressa em gramas de água retida após a centrifugação em relação à massa de amostra seca, foi significativamente maior para as amostras submetidas ao processo CI-RVI. Como as modificações que ocorrem na estrutura das amostras durante o processo são bastante complexas, somente uma análise detalhada da microestrutura das amostras poderia explicar esses resultados. O possível desenvolvimento de poros menores em função da menor taxa de redução de pressão durante a etapa RVI ou o menor impacto das variações de pressão nas amostras resfriadas imersas no líquido de cozimento podem ser responsáveis pelo aumento da CRA da estrutura muscular.

**Tabela 4.2** - Parâmetros avaliados para os processos CI-RVI (1:3 e 1:1), CI-RVIP, CI-RV e CI,RC realizados com filés de peito de frango. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão.

Processo de cozimento e resfriamento	Perda de massa no cozimento (%)	Perda de massa no resfriamento (%)	Perda de massa global (%)	Teor de umidade final (g água/100 g amostra)	CRA (g água retida/g amostra seca)
CI-RVI 1:3	19,3 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	4,2 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	22,8 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>	70,3 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	-
CI-RVI 1:1	19,1 $\pm$ 1,7 <sup>a</sup>	4,8 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	22,6 $\pm$ 1,9 <sup>a</sup>	70,6 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	1,74 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>
CI-RVIP 1:1	20,5 $\pm$ 1,7 <sup>a</sup>	2,8 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	22,9 $\pm$ 1,8 <sup>a</sup>	70,3 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	-
CI-RV (1 kg)	19,3 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	11,6 $\pm$ 0,4 <sup>c</sup>	28,8 $\pm$ 1,2 <sup>b</sup>	67,6 $\pm$ 0,4 <sup>b</sup>	1,58 $\pm$ 0,04 <sup>b</sup>
CI,RC (1 kg)	19,8 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>	6,8 $\pm$ 0,1 <sup>d</sup>	25,3 $\pm$ 0,6 <sup>c</sup>	68,5 $\pm$ 0,4 <sup>c</sup>	1,63 $\pm$ 0,08 <sup>b</sup>

<sup>a-d</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

A partir dos resultados obtidos com as diferentes alternativas investigadas, optou-se por continuar os estudos apenas como os processos CI-RVI 1:1 e CI-RVIP 1:1. Por simplicidade, eles serão denominados simplesmente CI-RVI e CI-RVIP.

Os valores das propriedades mecânicas dos filés de peito de frango submetidos aos processos integrados CI-RVI e CI-RVIP, obtidos nos ensaios de corte e dupla compressão (TPA), são apresentados na Tabela 4.3. Para fins de comparação, os resultados obtidos para as amostras submetidas aos processos CI-RV e CI,RC, discutidos no capítulo anterior, também são apresentados nessa tabela. Os parâmetros obtidos a partir da análise de TPA foram dureza, coesividade, elasticidade, gomosidade e mastigabilidade. A partir do ensaio de corte foi obtido o valor da força máxima necessária para atravessar a amostra ( $F_{\text{máx}}$ ).

**Tabela 4.3** - Propriedades mecânicas de dureza (D), coesividade (C), elasticidade (E), gomosidade (G), mastigabilidade (M) e força máxima de corte ( $F_{\text{máx}}$ ) dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RVI; CI-RVIP; CI-RV e CI,RC. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão.

Processo	D (N)	C	E	G (N)	M (N)	$F_{\text{máx}}$ (N)
CI-RVI	89,9 $\pm$ 4,7 <sup>a</sup>	0,34 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	0,63 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>	30,3 $\pm$ 2,5 <sup>a</sup>	18,9 $\pm$ 1,4 <sup>a</sup>	29,5 $\pm$ 4,5 <sup>ac</sup>
CI-RVIP	87,4 $\pm$ 4,3 <sup>a</sup>	0,34 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	0,63 $\pm$ 0,03 <sup>a</sup>	29,7 $\pm$ 1,7 <sup>a</sup>	18,8 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	26,5 $\pm$ 5,2 <sup>a</sup>
CI-RV (1 kg)	113 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	0,39 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>	0,65 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	44,0 $\pm$ 3,4 <sup>b</sup>	28,9 $\pm$ 3,2 <sup>b</sup>	38,9 $\pm$ 5,2 <sup>b</sup>
CI,RC (1 kg)	102 $\pm$ 5 <sup>c</sup>	0,34 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	0,63 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	34,4 $\pm$ 2,3 <sup>c</sup>	21,6 $\pm$ 1,3 <sup>c</sup>	32,4 $\pm$ 2,3 <sup>c</sup>

<sup>a-c</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

Com respeito ao efeito da etapa RVIP nas propriedades mecânicas dos filés de peito de frango, não foram observadas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre as amostras submetidas a esse método em relação às submetidas ao método RVI (sem pulsos). Em contrapartida, Cheng e Sun (2006b) observaram que amostras de presuntos submetidas ao RVIP (PVCW - sigla utilizada pelos autores) apresentaram menores valores para os parâmetros dureza e força máxima de corte quando comparados aos valores observados para as amostras submetidas ao

processo RVI. Conforme discutido anteriormente, a maior perda de massa dos filés de peito de frango na etapa de cozimento do processo CI-RVIP em relação ao processo CI-RVI pode ter encoberto os efeitos dos sucessivos ciclos de variação de pressão nas propriedades mecânicas das amostras. Por outro lado, as amostras submetidas aos processos CI-RVI e CI-RVIP apresentaram valores significativamente menores ( $p < 0,05$ ) para os parâmetros dureza, coesividade, gomosidade, mastigabilidade e força máxima de corte (como previamente observado nos resultados apresentados no Capítulo 2) em relação às amostras submetidas ao processo CI-RV. Além disso, com exceção dos parâmetros coesividade e elasticidade, todos os outros parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios de TPA foram significativamente menores ( $p < 0,05$ ) para as amostras submetidas ao processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo do produto imerso (com e sem pulsos) em relação ao processo de cozimento seguido do método tradicional de resfriamento em câmara fria (CI,RC). De um modo geral, os menores valores dos parâmetros mecânicos das amostras submetidas aos processos CI-RVI e CI-RVIP em relação aos processos CI-RV e CI,RC podem ser atribuídos aos maiores teores de umidade (ver Tabela 4.2). Adicionalmente, as alterações na estrutura das amostras durante o resfriamento a vácuo, provocadas tanto pela expansão do gás e do vapor gerado na etapa a vácuo quanto pela compressão do gás e pela entrada de líquido com o restabelecimento da pressão atmosférica, podem ter contribuído positivamente na tenderização (amaciamento) da carne.

#### 4.3.2. Processo integrado de cozimento, resfriamento a vácuo e impregnação a vácuo de filés de peito de frango

Os perfis de temperatura das amostras submetidas ao processo CI-RV-IV durante a etapa de resfriamento correspondem aos apresentados no Capítulo 3 para o processo CI-RV (1 kg). A única diferença para o processo avaliado neste capítulo é a etapa de impregnação, para a qual será dada ênfase nos resultados apresentados a seguir.

##### 4.3.2.1. Efeito da pressão na impregnação de água nas amostras cozidas e resfriadas a vácuo

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados de perda/ganho de massa durante cada etapa do processo integrado CI-RV-IV, a perda de massa global e o conteúdo de umidade das amostras cozidas, resfriadas a

vácuo e submetidas à impregnação (etapa IV realizada a 11, 130 e 270 mbar). Para fins de comparação, também são apresentados nessa tabela os resultados para os processos CI-RV e CI,RC discutidos no Capítulo 3. Considerando os processos CI-RV-IV avaliados e o processo CI-RV-IPatm, a perda de massa média das amostras durante as etapas de cozimento e de resfriamento a vácuo foi de 19,9 % (em relação à massa inicial) e 11,6 % (em relação à massa da amostra cozida), respectivamente. Os ganhos de massa pelas amostras submetidas à IV foram estatisticamente similares ( $p > 0,05$ ) para todas as pressões subatmosféricas avaliadas (ganho de massa entre 5,1 e 5,4 %, em relação à massa das amostras cozidas e resfriadas a vácuo). Em contrapartida, os valores do ganho de massa pelas amostras submersas à pressão atmosférica foram aproximadamente 2,7 vezes menores (em média 1,9 %) que os valores observados para a etapa de IV. No caso do processo de impregnação à pressão atmosférica, a força motriz para o ganho de água pelas amostras (diferença entre o potencial químico da água no produto e no líquido de imersão) se deve às contribuições relativas às forças capilares e de atração (interação água-proteína, por exemplo). No processo de impregnação a vácuo, adicionalmente às contribuições mencionadas anteriormente, o ganho de água pela amostra é intensificado pela entrada do líquido nos poros do tecido muscular devido aos gradientes macroscópicos de pressão impostos ao sistema (aplicação de vácuo seguido do restabelecimento da pressão atmosférica). O fenômeno de impregnação é ilustrado pela Figura 4.7, onde são apresentadas fotografias de amostras submetidas aos processos CI-RV-IV (etapa IV com 15 min e  $P_1=11$  mbar) e CI-RV-IPatm (etapa IPatm com 15 min e  $P_1=1013$  mbar) usando solução de azul de metileno 0,1% em massa como fluido impregnante. Nota-se claramente nessa figura, uma maior infiltração da solução (evidenciada pelo corante) nas amostras submetidas à etapa IV em comparação com as submetidas à etapa IPatm. Deste modo, além da IV proporcionar um transporte global de massa maior (devido ao mecanismo hidrodinâmico), o mecanismo difusivo que intervém na operação dispõe de uma superfície muito maior para a transferência de massa, visto que se aproveita não só a superfície externa como também a superfície interna dos poros impregnados, i.e., o mecanismo difusivo atuará no sentido de homogeneizar as concentrações de água e corante (neste caso) através de caminhos difusivos mais curtos. Sendo assim, essa técnica pode ser útil na impregnação de um soluto de interesse disperso em água (aroma de fumaça, NaCl, por exemplo) ou na impregnação de um molho na

estrutura porosa da carne cozida e resfriada a vácuo na composição de uma refeição pronta para o consumo, por exemplo.

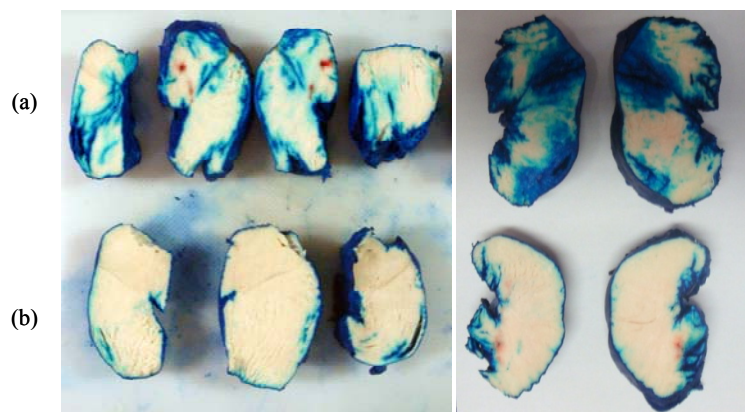
**Tabela 4.4** - Parâmetros avaliados para as amostras de filé de peito de frango submetidas aos processos CI-RV-IV (com pressões de 11, 130 e 270 mbar na etapa IV), CI-RV e CI,RC. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão.

Cozimento Resfriamento Impregnação	Perda de massa no cozimento (%)	Perda de massa no resfriame nto (%)	Ganho de massa na impregna ção (%)	Perda de massa global (%)	Teor de umidade final (g água/100g amostra)	CRA (g água retida/g amostra seca)
CI-RV-IV <sub>11</sub>	19,7 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	11,6 $\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	5,4 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>	25,4 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup>	68,9 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	1,64 $\pm$ 0,05 <sup>a</sup>
CI-RV-IV <sub>130</sub>	19,8 $\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	11,5 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	5,1 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	25,2 $\pm$ 1,1 <sup>a</sup>	68,7 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	-
CI-RV-IV <sub>270</sub>	19,6 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>	11,7 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	5,1 $\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	25,5 $\pm$ 1,2 <sup>a</sup>	68,6 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	-
CI-RV-IP <sub>atm</sub>	20,4 $\pm$ 1,1 <sup>a</sup>	11,6 $\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	2,0 $\pm$ 0,2 <sup>b</sup>	28,1 $\pm$ 1,2 <sup>b</sup>	67,9 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	-
CI-RV (1 kg)	19,3 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	11,6 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	-	28,8 $\pm$ 1,2 <sup>b</sup>	67,6 $\pm$ 0,4 <sup>b</sup>	1,58 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>
CI,RC (1 kg)	19,8 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>	6,8 $\pm$ 0,1 <sup>b</sup>	-	25,3 $\pm$ 0,6 <sup>a</sup>	68,5 $\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	1,63 $\pm$ 0,08 <sup>a</sup>

<sup>a-c</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

Ainda considerando os resultados obtidos para os processos CI-RV-IV utilizando somente água como fluido impregnante, observa-se na Tabela 4.4 que as amostras submetidas aos processos CI-RV-IV apresentaram valores de perda de massa global (em relação às amostras *in natura*) significativamente menores que as amostras submetidas ao processo CI-RV e similares aos valores observados para as amostras submetidas ao processo CI,RC. Esse resultado é consequência da compensação de parte da perda de massa ocorrida no resfriamento a vácuo pelo ganho de massa que ocorre ao final da etapa de impregnação a vácuo (com o restabelecimento da pressão atmosférica). Adicionalmente, não foi observada diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre os teores de umidade das amostras submetidas ao processo CI-RV-IV e das amostras submetidas ao processo de cozimento por imersão

seguido do método convencional de resfriamento em câmara fria (CI,RC). Com relação à capacidade de retenção de água (CRA) dos filés de peito de frango submetidos aos diferentes processos considerados, não foram observadas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) entre a massa de água retida (em relação à massa de amostra seca) pelas amostras submetidas aos processos CI-RV-IV<sub>11</sub>, CI-RV e CI,RC após a centrifugação. Isso indica que a matriz porosa é capaz de reter a quantidade adicional de água impregnada durante a etapa IV<sub>11</sub>.



**Figura 4.7** – Ilustração das amostras de peito de frango cozidas e resfriadas a vácuo submetidas à impregnação com solução de azul de metileno 0,1 % em massa. (a) Impregnação a vácuo (IV) e (b) Impregnação à pressão atmosférica (IPatm).

#### 4.3.2.2. Propriedades mecânicas das amostras submetidas ao processo CI-RV-IV

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios dos parâmetros mecânicos determinados a partir dos resultados da análise de perfil de textura (TPA) e de corte para as amostras submetidas ao processo integrado de cozimento-resfriamento a vácuo-impregnação a vácuo nas diferentes pressões subatmosféricas avaliadas (CI-RV-IV<sub>11</sub>, <sub>130</sub>, <sub>270</sub>) e aos processos CI-RV e CI,RC (resultados apresentados no Capítulo 3). Observa-se que as amostras submetidas aos processos CI-RV-IV<sub>11</sub>, CI-RV-IV<sub>130</sub> e CI-RV-IV<sub>270</sub> apresentaram valores menores para os parâmetros dureza, coesividade, gomosidade, mastigabilidade e força máxima de corte quando comparadas com as amostras submetidas aos

processos CI-RV. Isso está relacionado com o maior conteúdo de umidade nas amostras submetidas ao processo de impregnação (ver Tabela 4.4). Com relação às amostras cozidas e resfriadas em câmara fria (CI,RC), somente a propriedade de dureza foi estatisticamente menor para as amostras submetidas ao processo CI-RV-IV. Essa diferença pode estar associada à “tenderização” da carne, a qual foi submetida repetidas vezes a mudanças de pressão (durante as etapas de resfriamento e impregnação).

**Tabela 4.5** - Propriedades mecânicas de dureza (D), coesividade (C), elasticidade (E), gomosidade (G), mastigabilidade (M) e força máxima de corte ( $F_{máx}$ ) dos cortes de peito de frango submetidos aos processos CI-RV-IV (com pressões de 11, 130 e 270 mbar na etapa IV), CI-RV e CI,RC. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão.

Processo	D (N)	C	E	G (N)	M (N)	$F_{máx}$ (N)
CI-RV-IV <sub>11</sub>	94,5 $\pm$ 1,9 <sup>a</sup>	0,37 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	0,63 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	34,9 $\pm$ 2,0 <sup>a</sup>	21,8 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	31,7 $\pm$ 3,1 <sup>a</sup>
CI-RV-IV <sub>130</sub>	94,1 $\pm$ 2,2 <sup>a</sup>	0,37 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	0,63 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	34,8 $\pm$ 1,8 <sup>a</sup>	21,6 $\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	-
CI-RV-IV <sub>270</sub>	93,1 $\pm$ 3,5 <sup>a</sup>	0,36 $\pm$ 0,02 <sup>a</sup>	0,63 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	33,7 $\pm$ 1,5 <sup>a</sup>	21,4 $\pm$ 1,9 <sup>a</sup>	-
CI-RV (1 kg)	113 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	0,39 $\pm$ 0,01 <sup>b</sup>	0,65 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	44,0 $\pm$ 3,4 <sup>b</sup>	28,9 $\pm$ 3,2 <sup>b</sup>	38,9 $\pm$ 5,2 <sup>b</sup>
CI,RC (1 kg)	102 $\pm$ 5 <sup>c</sup>	0,34 $\pm$ 0,01 <sup>c</sup>	0,63 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	34,4 $\pm$ 2,3 <sup>a</sup>	21,6 $\pm$ 1,3 <sup>a</sup>	32,4 $\pm$ 2,3 <sup>a</sup>

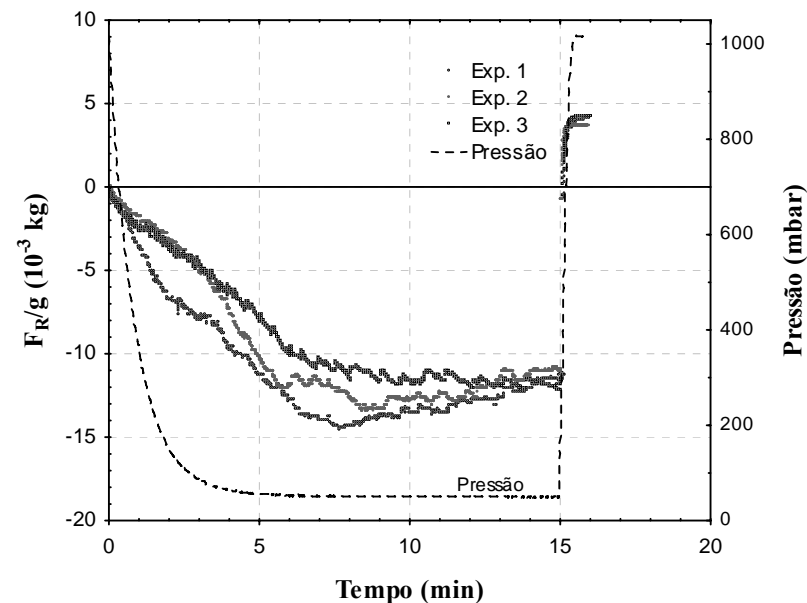
<sup>a-c</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

#### 4.3.2.3. Cinética de impregnação a vácuo de filés de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo.

Os resultados experimentais característicos da cinética do processo de IV dos cortes de peito de frango estão apresentados na Figura 4.8. Os dados descrevem a variação temporal dos valores registrados pela célula de carga (razão entre a força resultante sobre o cesto perfurado e a aceleração da gravidade) e da pressão total no interior da câmara durante a IV de uma amostra de filé de peito de frango cozida e resfriada a vácuo, utilizando água como fluido

impregnante. As curvas obtidas foram normalizadas pelo valor inicial registrado pela célula de carga (após a imersão do conjunto haste-cesto-amostra), visando facilitar a comparação dos resultados. Observa-se que durante a aplicação de vácuo ocorreu uma redução na força resultante, efeito tanto da deformação (expansão) da amostra quanto da drenagem da solução nativa presente nos poros da carne, ambos promovidos pela expansão dos gases presentes no interior dos poros. No período entre 10 e 15 minutos houve pouca variação na força resultante, o que indica que o equilíbrio do primeiro passo da IV foi atingido nesse período para a curva de pressão indicada e para a geometria da amostra utilizada. Com o restabelecimento da pressão atmosférica, observa-se um aumento na força resultante devido à impregnação das amostras promovida pelos gradientes macroscópicos de pressão (mecanismo hidrodinâmico).

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores de ganho de massa calculados a partir da massa das amostras antes e após o processo de IV (determinadas através da balança,  $\Delta m_I$ ) e o ganho de massa determinado a partir dos valores registrados pela célula de carga ( $F_R/g$ ) no início e ao final do processo ( $\Delta m_{IC}$ ), ambos expressos como uma porcentagem em relação à massa das amostras antes da IV. A diferença entre  $\Delta m_I$  e  $\Delta m_{IC}$  é creditada à deformação irreversível da amostra, ou seja, o aumento de volume da amostra durante a etapa a vácuo provocada pela expansão do gás no interior dos poros. Fito et al. (1996), Salvatori et al. (1998) e Laurindo et al. (2007) também observaram um incremento de volume de frutas ao final da impregnação a vácuo o qual atribuem ao fenômeno de deformação-relaxação da matriz sólida.



**Figura 4.8** – Evolução temporal dos valores registrados pela célula de carga (razão entre a força resultante sobre o cesto perfurado e a aceleração da gravidade) e da pressão no sistema durante a impregnação a vácuo de filés de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo.

**Tabela 4.6** - Comparação entre o ganho de massa calculado através da massa das amostras antes e após a etapa de IV ( $\Delta m_I$ ) e o ganho de massa calculado através dos valores registrados pela célula de carga no início e no final do processo ( $\Delta m_{IC}$ ).

Cinética de IV	$\Delta m_I$ (%)	$\Delta m_{IC}$ (%)
Exp 1	4,6	2,9
Exp 2	4,2	2,3
Exp 3	4,3	2,8
Média ± Desvio Padrão	4,4 ± 0,2	2,7 ± 0,3

#### 4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de cozimento por imersão seguido do resfriamento a vácuo dos filés de frango na presença de parte da água de cozimento (CI-RVI) apresenta-se como uma boa alternativa na redução da perda de massa do produto em relação ao método CI-RV. Adicionalmente, a utilização de ciclos de variação da pressão na câmara (pulsos de vácuo-pressão atmosférica-vácuo) durante o resfriamento a vácuo com o produto imerso (RVIP) pode proporcionar reduções ainda maiores na perda de massa nessa etapa do processo (em comparação com as etapas RV, RC e RVI). Análises da micro-estrutura dos cortes de peito de frango seriam interessantes para evidenciar as transformações ocorridas durante o processo. Com relação às propriedades mecânicas, os parâmetros de dureza e força máxima de corte são menores nos cortes de peito de frango que apresentam maiores conteúdos de umidade como os submetidos ao processo CI-RVI. As possíveis modificações na estrutura das amostras durante a aplicação de vácuo e o restabelecimento da pressão atmosférica podem ser responsáveis pela tenderização (amaciamento) dos cortes de frango resfriados a vácuo em conjunto com a solução de cozimento. Além disso, através do método RVI é possível obter taxas de resfriamento de filés de peito de frango cozidos superiores às obtidas pelo método tradicional de resfriamento em câmara fria, com menores perdas de água. Para isso, o volume de água mínimo para cobrir as amostras deve ser utilizado para evitar gastos desnecessários de energia e, ainda, o sistema de condensação e a vazão da bomba de vácuo utilizada devem estar apropriadamente dimensionados, considerando a taxa de resfriamento desejada para as quantidades de produto e de solução de cozimento a serem resfriadas. Por outro lado, o tempo de resfriamento obtido usando o método RVI será sempre maior do que o obtido com o RV, para os mesmos parâmetros operacionais, em função da maior quantidade de vapor gerado.

A técnica de impregnação a vácuo integrada aos processos de cozimento e resfriamento a vácuo (CI-RV-IV) se apresenta como outra alternativa interessante na redução da perda de massa global durante o processamento de filés de peito de frango cozido, sem apresentar o maior tempo de resfriamento obtido com o método RVI. Isso é feito através da impregnação de uma solução de interesse diretamente na estrutura porosa do tecido muscular após o resfriamento a vácuo (etapa RV). Adicionalmente, o processo com impregnação a vácuo não exige

que a etapa de cozimento seja realizada por imersão, podendo assim ser integrado ao cozimento com vapor para se obter economia de água.

Para a impregnação a vácuo (IV) dos filés de peito de frango com soluções de viscosidades similares à da água pura, pode-se afirmar que a intensidade do vácuo na faixa de pressão de 11 a 270 mbar não possui influência significativa na quantidade de solução impregnada. Adicionalmente, através da impregnação a vácuo de soluções aquosas com essas características é possível obter cortes de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo com teores de umidade e propriedades mecânicas similares aos submetidos ao processo CI,RC (etapa de resfriamento em câmara fria). O estudo da técnica de IV com soluções de diferentes viscosidades (como molhos, por exemplo) e o impacto dessa técnica na qualidade microbiológica de produtos que tenham sido submetidos a um tratamento térmico preliminar precisam ser avaliados.

O estudo da cinética de IV utilizando o equipamento proposto por Laurindo et al. (2007) é útil para se determinar os tempos de aplicação de vácuo e de pressão atmosférica (os quais são função do tipo de carne, da geometria dos cortes e da curva de pressão do sistema), além de permitir a confirmação da variação irreversível do volume dos cortes de peito de frango cozidos durante a IV.

***USO DA ESPECTROSCOPIA DE  
IMPEDÂNCIA PARA AVALIAÇÃO DO  
PROCESSO DE COZIMENTO DE CORTES  
DE PEITO DE FRANGO***

Neste capítulo é apresentado um estudo complementar realizado durante o estágio de doutorado no Departamento de Tecnologia de Alimentos da Universidade Politécnica de Valência (UPV - Espanha), no grupo de pesquisa coordenado pelo professor Dr. José Manuel Barat Baviera. Além dos resultados apresentados neste capítulo, o estágio de doutorado proporcionou a participação em outros trabalhos de pesquisa relacionados com o uso da espectroscopia de impedância para a determinação de parâmetros físico-químicos em alimentos como, por exemplo, a determinação do conteúdo sal em carne (MASOT et al., 2010).



### 5.1. INTRODUÇÃO

O processamento térmico adequado de produtos cárneos é de extrema importância para garantir a qualidade microbiológica do produto, sendo um ponto crítico de controle comumente empregado em programas de segurança de alimentos. Durante o cozimento, a redução da população contaminante depende da magnitude do tempo e da temperatura utilizados no processo de cocção. Para produtos avícolas, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA-FSIS) estabelece que carne de aves e produtos cárneos não curados de aves devem atingir uma temperatura interna de no mínimo 71,1 °C antes de serem removidos do meio de cozimento.

Diferentes abordagens são utilizadas para verificar a adequação do processamento térmico em produtos cárneos, com o objetivo de garantir a qualidade do produto final. Orta-Ramirez e Smith (2002) categorizaram tais abordagens nas seguintes classes: determinações colorimétricas, métodos enzimáticos, ensaios imunológicos e métodos físicos. Ang, Liu e Huang (1996) avaliaram a atividade catalítica, definida como a decomposição de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em H<sub>2</sub>O e O<sub>2</sub>, como um potencial indicador da temperatura final atingida por empanados de frango no tratamento térmico. Os autores observaram uma boa predição da temperatura final com variações entre 3 e 4 °C. Bogin et al. (1992) desenvolveram um método bioquímico para verificar o tratamento térmico de carne de peito de peru. As atividades de doze enzimas e proteínas solúveis residuais foram examinadas para vários tratamentos térmicos realizados em diferentes condições. Os resultados obtidos mostraram que algumas enzimas (como aspartato aminotransferase, creatina quinase, aldolase, dentre outras) são valiosos marcadores da evolução do tratamento térmico. Determinações das alterações de cor na carne também têm sido sugeridas como uma forma de estimar a temperatura máxima atingida no cozimento (*end-point temperature*) (DAWSON, MANGALASSARY e SHELDON, 2006). No entanto, a maioria dos métodos citados tem caráter destrutivo (inclusive o método colorimétrico pois é necessário cortar a amostra) e/ou são de difícil aplicação em uma linha de processamento.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de técnicas rápidas, precisas e não-destrutivas para a predição de parâmetros físico-químicos e sensoriais em diferentes tipos de alimentos tem sido foco de diversos estudos (GIL et al., 2008; BARAT et al., 2008; MASOT et al., 2010). O uso de sensores eletrônicos como as línguas eletrônicas ou sistemas

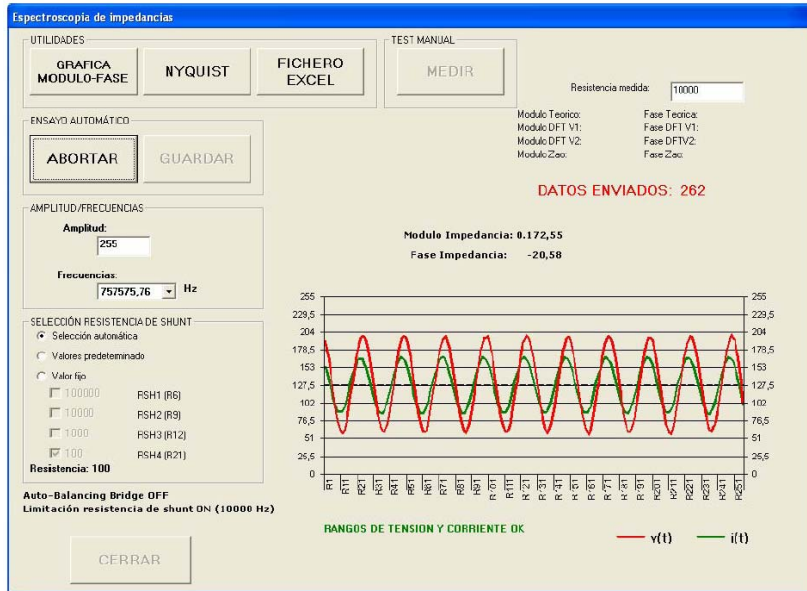
baseados na espectroscopia de impedância tem sido apontado como uma alternativa aos métodos convencionais de análises de alimentos devido à alta sensibilidade e resposta rápida que esses sistemas proporcionam (MASOT, 2010). A técnica de espectroscopia de impedância permite analisar as propriedades de um material ou produto através da aplicação de sinais elétricos de baixa intensidade com diferentes frequências e da medição dos sinais elétricos de saída correspondentes. A partir da relação entre esses sinais de entrada e saída, medidas de impedância elétrica (módulo e fase) são obtidas em função da frequência. O uso de tais medidas em conjunto com métodos de análise multivariante torna possível o estabelecimento de relações entre os valores de impedância e os parâmetros de interesse (propriedades sensoriais e físico-químicas do produto, por exemplo), resultando em um modelo estatístico para a predição das propriedades de novas amostras. Neste contexto, o objetivo do estudo apresentado neste capítulo foi investigar a relação entre medidas de espectroscopia de impedância realizadas em peito de frango cozidos e resfriados e parâmetros de interesse como, por exemplo, a temperatura máxima atingida pelas amostras durante o cozimento e o seu teor de umidade final.

### 5.2. MATERIAL E MÉTODOS

#### 5.2.1. Equipamento eletrônico de medição de impedância

Para a determinação dos valores da impedância de cortes de peito de frango foi utilizado um equipamento de medição desenvolvido por pesquisadores da UPV (IDM - *Instituto de Reconocimiento Molecular y Desarrollo Tecnológico*). Tal equipamento é conectado a um computador através da porta serial e controlado por um *software*. A interface com o usuário desse *software* está apresentada na Figura 5.1. O equipamento eletrônico recebe informações (especificações de frequência, amplitude, dentre outras) enviadas pelo computador e gera um sinal sinusoidal de tensão correspondente nos terminais do eletrodo. Os sinais de tensão (estímulo) e de corrente (resposta) obtidos no eletrodo são amostrados e os dados coletados são enviados para o computador. Dessa forma, o programa calcula o módulo e fase da impedância observada na amostra para a frequência considerada. Esse processo de leitura da impedância é realizado para todas as frequências selecionadas através do *software* (em uma faixa de 1Hz até 1MHz) e os resultados podem então ser gravados em um arquivo de texto. As

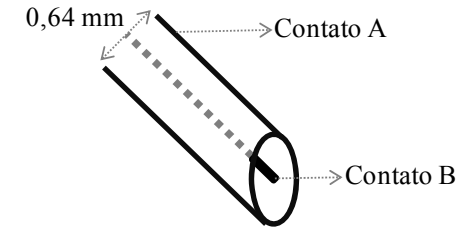
características eletrônicas do equipamento utilizado, bem como as informações referentes à sua precisão são descritas em detalhes por Masot (2010).



**Figura 5.1** – Interface do *software* de controle do equipamento de medição de impedância.

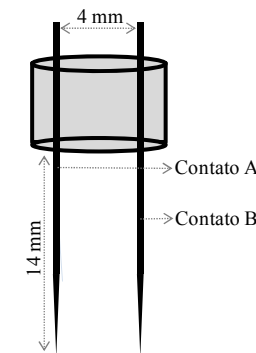
### 5.2.1.1. Eletrodo

Por se tratar do elemento que entra em contato direto com a amostra, a escolha do eletrodo é de fundamental importância em um sistema de espectroscopia de impedância. Essa escolha deve estar baseada nos parâmetros e nas características da amostra que se deseja avaliar a partir das medidas de espectroscopia de impedância. Nos primeiros ensaios de avaliação da impedância de cortes de peito de frango cozidos (a diferentes temperaturas) usando o equipamento de medida, um eletrodo de agulha foi utilizado. Esse eletrodo consiste de uma agulha concêntrica de aço inoxidável, onde a parte interna da agulha atua como eletrodo exterior ou de referência e a parte interna atua como eletrodo de trabalho. O isolamento entre os dois contatos do eletrodo é realizado usando resina epóxi (material dielétrico). Na Figura 5.2 é apresentada uma ilustração da estrutura do eletrodo tipo agulha.



**Figura 5.2** – Ilustração de um eletrodo tipo agulha.

O eletrodo tipo agulha é bastante útil para realização de medidas de impedância pontuais de forma não-destrutiva devido ao seu reduzido diâmetro (0,64 mm). No entanto, quando o objetivo é avaliar alterações macroscópicas em cortes de carne submetidos a processos de cozimento, o eletrodo em agulha não é recomendado devido à pequena distância entre os seus contatos ( $< 0,64$  mm), o que resulta em medidas muito pontuais que podem não refletir as variáveis de interesse. Essa característica foi verificada nos primeiros experimentos de espectroscopia de impedância de cortes cozidos de peito de frango realizados no laboratório da UPV. Visando aperfeiçoar as medidas no contexto da aplicação em questão, uma nova forma de eletrodo foi proposta. O eletrodo obtido, denominado eletrodo duplo, foi utilizado nos experimentos considerados neste capítulo e consiste de dois contatos em forma de agulha (com 14 mm de comprimento cada) dispostos de forma paralela a uma distância de 4 mm. O isolamento entre os contatos e a sua sustentação foram realizados usando resina epóxi. Um esboço do eletrodo duplo é apresentado na Figura 5.3.



**Figura 5.3** – Ilustração do eletrodo duplo utilizado para a medição da impedância em filés de peito de frango.

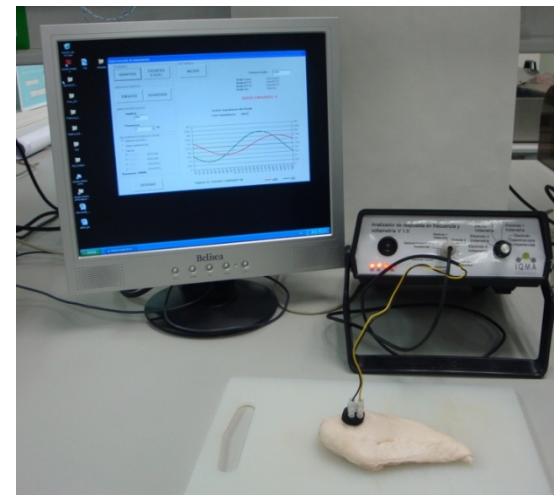
### 5.2.2. Preparação das amostras e metodologia experimental

Foram utilizados filés de peito de frango sem osso e sem pele, provenientes da mesma unidade produtora e adquiridos no comércio local de Valência - Espanha. O pH da carne foi medido em três diferentes pontos através de um potenciômetro digital com eletrodo de penetração (CRISON, Barcelona, Espanha). Somente amostras com pH entre 5,80 e 6,10 e espessura média de  $26 \pm 2$  mm na seção de maior espessura dos filés foram utilizadas nos ensaios.

As amostras de peito de frango foram cozidas por imersão em água em um banho termostático com temperatura controlada. A aquisição da temperatura das amostras (na metade da seção de maior espessura) e da água de imersão foi realizada através de termopares tipo "T" conectados a um sistema de aquisição de dados (Agilent, modelo 34970A, 34901A). Duas abordagens experimentais foram adotadas para avaliar diferentes parâmetros do processo de cozimento dos filés de peito de frango (diferentes tempos e temperaturas de cozimento):

(i) Na primeira abordagem, as amostras de filés de peito de frango foram cozidas por imersão em água a diferentes temperaturas (60, 70, 80 e 90 °C) e o cozimento foi realizado até as amostras atingirem a temperatura da água de imersão. Após o cozimento, as amostras foram resfriadas em câmara fria até atingirem 10 °C. Os experimentos foram realizados em duplicata para cada temperatura da água de cozimento considerada (com lotes distintos), sendo que para cada experimento foram utilizados dois filés de peito de frango (total de 20 amostras). As medidas de impedância foram realizadas com o eletrodo inserido na seção de maior espessura dos filés e perpendicularmente à orientação das fibras musculares, conforme ilustrado na Figura 5.4. Tais medidas foram realizadas no mínimo em triplicata para cada filé de peito de frango analisado (em diferentes posições na seção de maior espessura) e em 50 diferentes frequências (entre 1Hz e 1MHz). Deste modo, para cada espectro de impedância foram obtidos 50 valores de módulo e 50 valores de fase.

(ii) Na segunda abordagem, a temperatura da água de imersão foi controlada em  $80 \pm 2$  °C e as amostras foram cozidas por diferentes tempos (5, 15, 25, 35 e 55 minutos). Após o cozimento as amostras foram resfriadas até atingirem 10 °C. Para cada tempo de cozimento considerado, os experimentos foram realizados em quadruplicata (total de 20 amostras). As medidas de impedância foram realizadas conforme descrito no item (i).



**Figura 5.4** – Ilustração do equipamento utilizado para as medidas de impedância de filés de peito de frango cozidos a diferentes tempos e temperatura.

### 5.2.3. Perda de massa e determinações analíticas

Para cada filé de peito de frango submetido aos diferentes processos descritos no item 5.2.2 (cozimento a diferentes tempos e temperaturas) foram avaliados a perda de massa (porcentagem em relação à massa da amostra *in natura*) e o conteúdo de umidade (AOAC, 2000).

### 5.2.4. Análise dos dados

Para cada medida de módulo e fase uma análise de variância (ANOVA) foi conduzida com o objetivo de comprovar a existência de diferenças significativas entre essas medidas e os parâmetros avaliados para cada abordagem (temperatura máxima atingida durante o cozimento e teor de umidade final das amostras). O teste de Tukey foi utilizado para a comprovação das médias a um nível de significância de 5 %.

Para relacionar os dados dos espectros de impedância obtidos em cada um dos experimentos considerados neste capítulo com os parâmetros de interesse (temperatura máxima atingida pela amostra durante a etapa de cozimento e o teor de umidade final do produto) foi utilizado o método de regressão por mínimos quadrados parciais (*partial*

*least squares* – PLS), uma breve descrição desse método é apresentada no Apêndice C. A regressão por PLS foi realizada em duas etapas. A primeira etapa consistiu-se na etapa de treinamento, na qual um modelo entre os espectros de impedância (variável X) e cada parâmetro de interesse (temperatura máxima atingida na etapa de cozimento ou teor de umidade final - variável Y) foi identificado. Na etapa subsequente foi realizada a validação desse modelo. Dessa forma, foi possível avaliar a capacidade do modelo obtido para a predição de novos valores da variável Y (conjunto de dados não utilizados para gerar o modelo). O tratamento estatístico dos dados foi realizado utilizando o *software* Statgraphics Centurion XV (StaPoint Technologies, Inc., Warrenton, VA, USA).

### 5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.3.1. Avaliação das medidas de impedância em filés de peito de frango cozidos por imersão em água a diferentes temperaturas (60, 70, 80 e 90 °C)

A temperatura máxima atingida pelas amostras na etapa de cozimento, bem como a perda de massa e o teor de umidade final das amostras são apresentados na Tabela 5.1. Observa-se um aumento da perda de massa das amostras com o aumento da temperatura máxima atingida durante a etapa de cozimento. Conforme apresentado no Capítulo 1, as proteínas musculares (sarcoplasmáticas, miofibrilares e do tecido conjuntivo) desnaturam a diferentes temperaturas (BENDALL e RESTALL, 1983), o que explica a redução da capacidade de retenção de água com o aumento da temperatura das amostras.

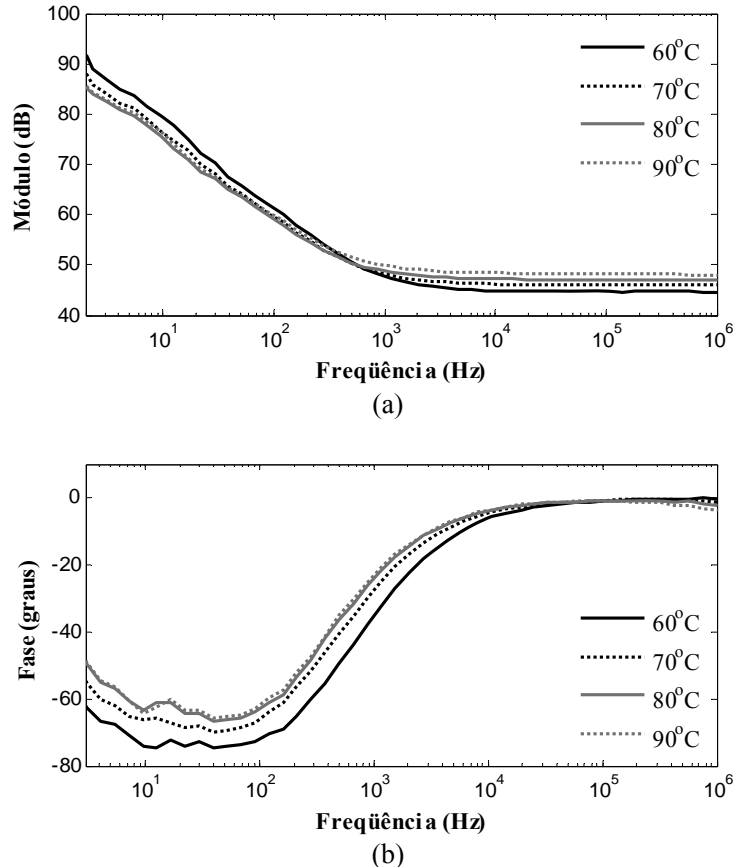
**Tabela 5.1** - Parâmetros avaliados para os filés de peito de frango cozidos por imersão em água a diferentes temperaturas e posteriormente resfriados até 10 °C. Valores médios ± Desvio Padrão.

Temperatura máxima atingida no cozimento (°C)	Perda de massa após cozimento (%)	Teor de umidade final (g <sub>água</sub> /100g <sub>p</sub> )
60,1 ± 0,3	9,2 ± 1,2 <sup>a</sup>	72,4 ± 0,3 <sup>a</sup>
70,3 ± 0,5	15,7 ± 1,5 <sup>b</sup>	71,1 ± 0,4 <sup>b</sup>
80,2 ± 0,8	21,0 ± 1,7 <sup>c</sup>	69,4 ± 0,9 <sup>c</sup>
90,3 ± 0,3	29,2 ± 1,0 <sup>d</sup>	66,1 ± 0,5 <sup>d</sup>

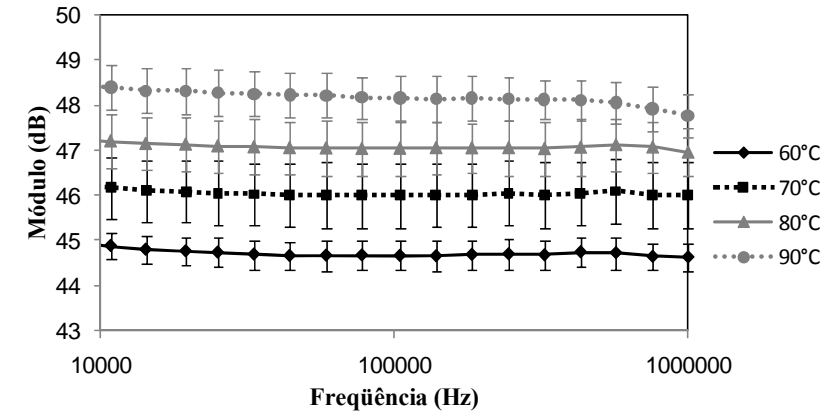
<sup>a-d</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

Na Figura 5.5 são apresentados os valores médios do módulo e da fase da impedância em função da frequência obtidos para as amostras cozidas até diferentes temperaturas (60, 70, 80 e 90 °C). Para uma melhor visualização dos dados, esses valores são apresentados na forma do diagrama de Bode (Capítulo 1, seção 1.6). A partir dos perfis dos módulos das impedâncias apresentados na Figura 5.5a, é possível observar que as impedâncias em baixas frequências são muito maiores do que as impedâncias em altas frequências. Conforme descrito por Masot (2010), essa característica se deve à permissividade do material, a qual determina a capacidade dos seus íons de polarizá-lo e com isso dificultar a circulação de corrente para frequências inferiores a uma determinada frequência característica (o que resulta em valores elevados de impedância em frequências baixas). Por outro lado, para frequências suficientemente elevadas, os íons não têm tempo de polarizar o material, facilitando a circulação de corrente e resultando em valores menores de impedância (MASOT, 2010). O fato dos valores de fase para frequências altas tenderem para zero (Figura 5.5b) também indica que o material não está polarizado (MASOT, 2010). Na Figura 5.6 são apresentados somente os valores médios dos módulos das impedâncias obtidos nas frequências de 10 kHz a 1 MHz. Para essa faixa de frequência, foi observada uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os valores dos módulos para as diferentes temperaturas de cozimento consideradas (temperatura máxima atingida pelas amostras durante a etapa de cozimento). Adicionalmente, nota-se na Figura 5.6 que, quanto maior a temperatura final atingida pelas amostras, maior é o valor do módulo da impedância em alta frequência. Essa característica pode estar

associada à maior perda de água (ver Tabela 5.1), ao maior grau de desnaturação das proteínas e às conseqüentes mudanças estruturais (encolhimento das fibras musculares e aumento da porosidade do tecido) que ocorrem nas amostras em função da temperatura máxima atingida durante o cozimento.



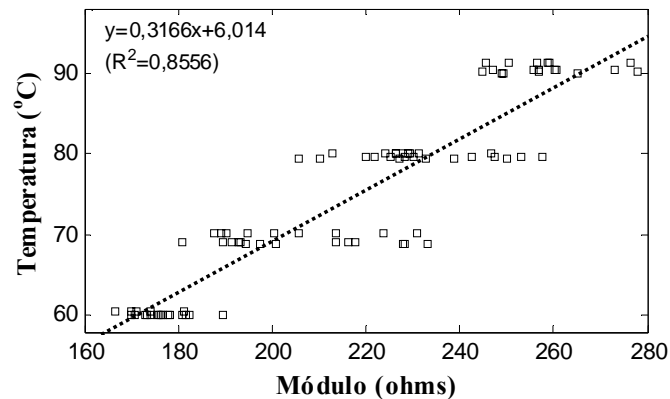
**Figura 5.5** – Valores de impedância em função da frequência de filés de peito de frango cozidos por imersão a diferentes temperaturas. (a) Valores médios do módulo e (b) valores médios da fase.



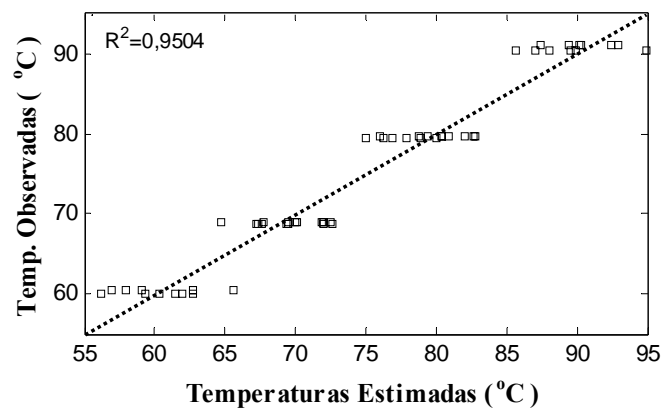
**Figura 5.6** – Valores médios dos módulos das impedâncias obtidos nas frequências de 10 kHz a 1 MHz para as amostras de peito de frango cozidas a diferentes temperaturas.

Aparentemente, as diferenças observadas entre os módulos de impedância em altas frequências podem ser utilizadas como um indicador da temperatura máxima atingida pela amostra durante o cozimento. Para verificar a eficiência dessa abordagem, os valores de temperatura máxima em função do módulo da impedância (convertido para ohms) em altas frequências (10 kHz a 1 MHz) são apresentados na Figura 5.7. A partir do ajuste linear entre essas duas variáveis, observa-se que a correlação não é satisfatória para a predição da temperatura máxima atingida pela amostra na etapa de cozimento ( $R^2 = 0,8556$ ). Nesse contexto, a avaliação dos valores de módulo e fase em todo o espectro de frequências (entre 1 Hz a 1 MHz) pode ser uma alternativa mais interessante para identificação (predição) da temperatura máxima, em função da maior quantidade de informação disponível e a sua possível relação com o processo. Para realizar essa análise, o método de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) foi utilizado, conforme descrito na seção 5.2. Dessa forma, os espectros de impedância das amostras cozidas a diferentes temperaturas foram separados em dois grupos: um para geração do modelo (com 56 observações do espectro, sendo que cada observação possui 50 valores de módulo e 50 valores de fase) e outro para validação do modelo obtido (32 observações). Foram avaliadas diferentes configurações de modelagem (números de variáveis latentes ou componentes – ver Apêndice C), sendo que os melhores resultados foram obtidos com o

uso de um modelo de regressão com 5 componentes. Os resultados obtidos na etapa de modelagem e na etapa de validação do modelo (predição da temperatura máxima) são apresentados na Figura 5.8 e Figura 5.9, respectivamente. A partir dessas figuras, observa-se um bom desempenho da regressão linear por PLS para a modelagem da temperatura máxima atingida pelas amostras nos processos de cozimento considerados para geração do modelo ( $R^2 = 0,9504$ ) e para a predição de tal temperatura para novas observações ( $R^2 = 0,9028$ ).

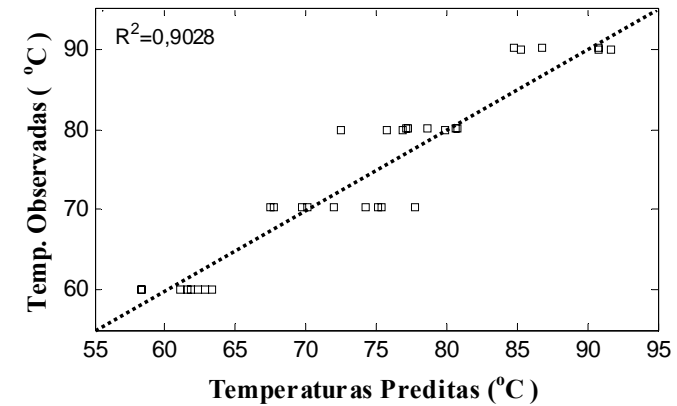


**Figura 5.7** – Valores de temperatura final das amostras (na etapa de cozimento) em função do módulo da impedância em alta frequência.



**Figura 5.8** – Ajuste obtido a partir da modelagem das temperaturas máximas atingidas pelos filés de peito de frango em função do espectro

de impedância (módulo e fase) usando o método de regressão linear por PLS.

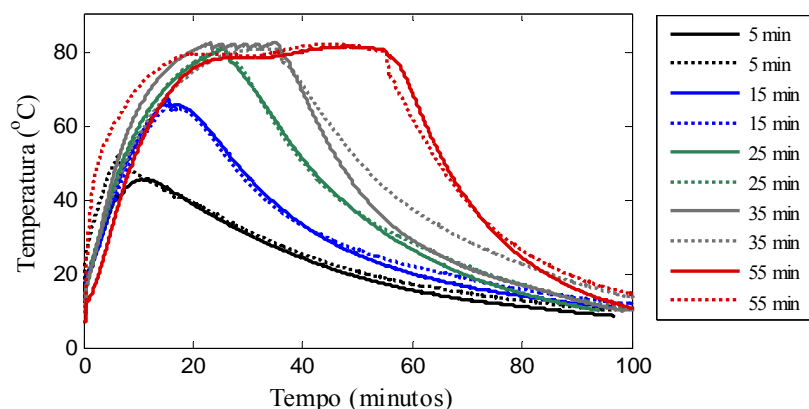


**Figura 5.9** – Avaliação da capacidade de predição, usando o modelo obtido a partir da regressão linear por PLS, das temperaturas máximas atingidas pelos filés de peito de frango no cozimento.

### 5.3.2. Avaliação das medidas de impedância em filés de peito de frango cozidos por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo (5, 15, 25, 35 e 55 minutos)

Na Figura 5.10 são apresentados os perfis de temperatura dos filés de peito de frango cozidos por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo e posteriormente resfriados até aproximadamente 10 °C (nessa figura são apresentados os resultados de duas repetições). A temperatura máxima atingida pelas amostras na etapa de cozimento para os diferentes tempos considerados, bem como a perda de massa ao final do processo (cozimento-resfriamento) e o teor de umidade final das amostras são apresentados na Tabela 5.2. Observa-se que para os tempos de cozimento de 25, 35 e 55 minutos as amostras atingiram a temperatura da água de imersão. No entanto, uma diferença considerável na perda de massa entre as amostras cozidas por 25 minutos e as cozidas por 35 e 55 minutos foi observada. Isso indica que o processo de desnaturação das proteínas é considerável nesse período, reduzindo a capacidade de retenção de água da carne. Para os tempos de

cozimento de 35 e 55 minutos, não foi observado uma diferença significativa ( $p > 0,05$ ) entre a perda de massa das amostras.



**Figura 5.10** – Perfis de temperatura dos filés de peito de frango cozidos por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo e posteriormente resfriados até 10 °C.

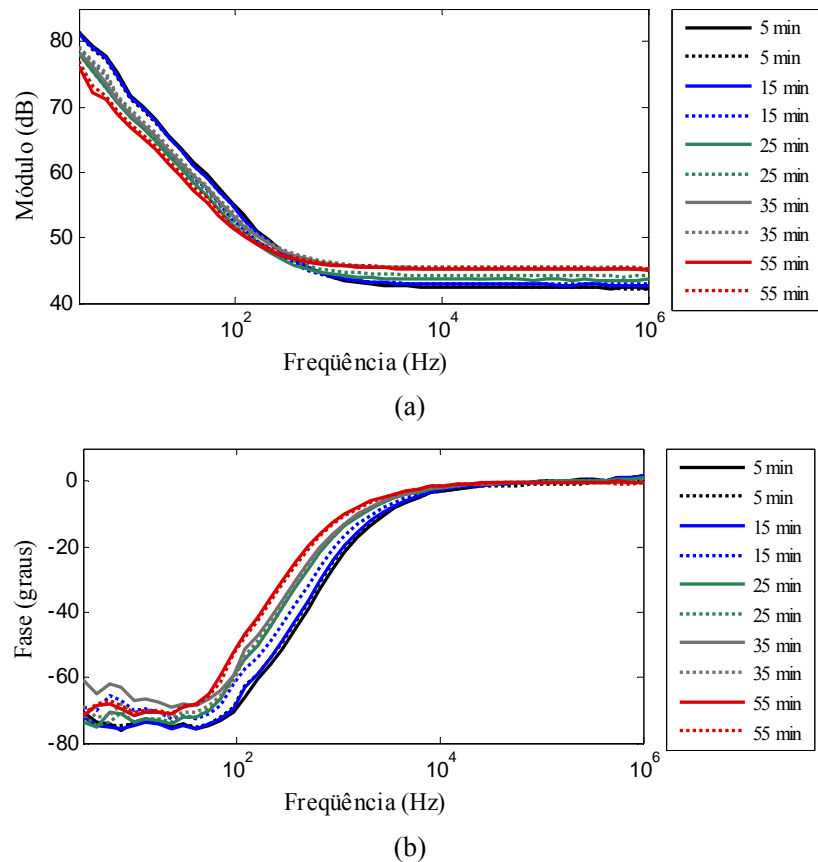
**Tabela 5.2** – Parâmetros avaliados para os filés de peito de frango cozidos por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo e posteriormente resfriados até 10 °C. Valores médios  $\pm$  Desvio Padrão.

Tempo de Cozimento (minutos)	Temperatura máxima atingida (°C)	Perda de massa após cozimento e resfriamento (%)	Teor de umidade final (g <sub>água</sub> /100g <sub>p</sub> )
5	50,1 $\pm$ 2,5	10,9 $\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	72,8 $\pm$ 0,2 <sup>a</sup>
15	66,7 $\pm$ 0,8	14,8 $\pm$ 0,7 <sup>b</sup>	72,4 $\pm$ 0,3 <sup>b</sup>
25	80,2 $\pm$ 1,0	20,9 $\pm$ 1,0 <sup>c</sup>	70,8 $\pm$ 0,2 <sup>c</sup>
35	81,5 $\pm$ 0,4	26,7 $\pm$ 0,7 <sup>d</sup>	69,4 $\pm$ 0,5 <sup>d</sup>
55	81,7 $\pm$ 0,3	27,4 $\pm$ 0,8 <sup>d</sup>	69,8 $\pm$ 0,2 <sup>d</sup>

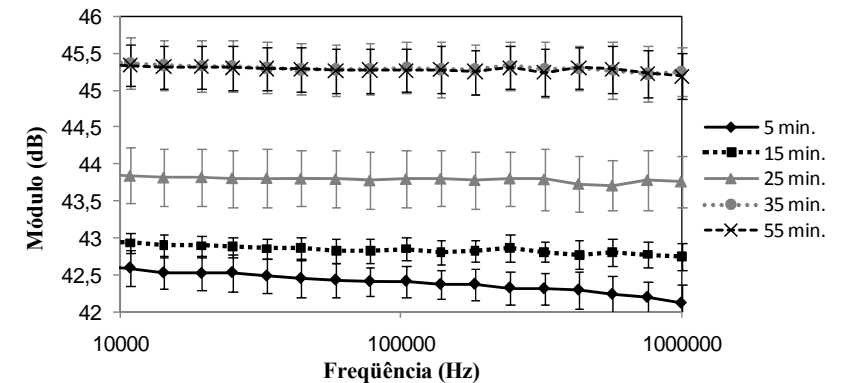
<sup>a-c</sup> Médias na mesma coluna com letras diferentes indicam uma diferença significativa ( $p < 0,05$ ).

Na Figura 5.11 são apresentados os valores médios do módulo e da fase da impedância em função da frequência obtidos para as amostras cozidas por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo (resultados de duas repetições). As características dos valores médios do módulo são similares às dos valores apresentados na Figura 5.5, i. e., as impedâncias em baixas frequências são muito maiores do que as impedâncias em altas frequências. Dessa forma, na Figura 5.12 são apresentados somente os valores médios dos módulos das impedâncias obtidos nas frequências de 10 kHz a 1 MHz. A partir dessa figura, é possível observar diferentes valores de módulos de impedância para as amostras submetidas aos diferentes períodos de cozimento, com exceção das amostras cozidas por 35 e 55 minutos, as quais apresentaram valores muito próximos. Isso pode estar relacionado com o teor de umidade das mesmas (ver Tabela 5.2), indicando que esse parâmetro apresenta uma relação com valores de módulo de impedância a alta frequência. Neste contexto, a regressão linear por PLS foi utilizada para identificar a temperatura final atingida pelas amostras e também o teor de umidade das mesmas, com o objetivo de confirmar a relação entre as medidas de impedância e o teor de umidade final. Os espectros de impedância (módulo e fase) foram separados em dois grupos, um para obtenção do modelo (51 observações) e outro para validação (16 observações).





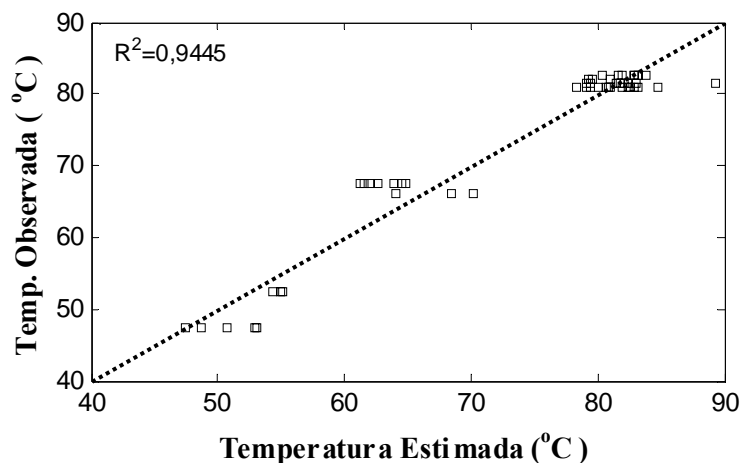
**Figura 5.11** – Valores de impedância em função da frequência obtidos a partir das amostras de peito de frango cozidas por imersão em água a 80 °C por diferentes períodos de tempo. (a) Módulo e (b) Fase.



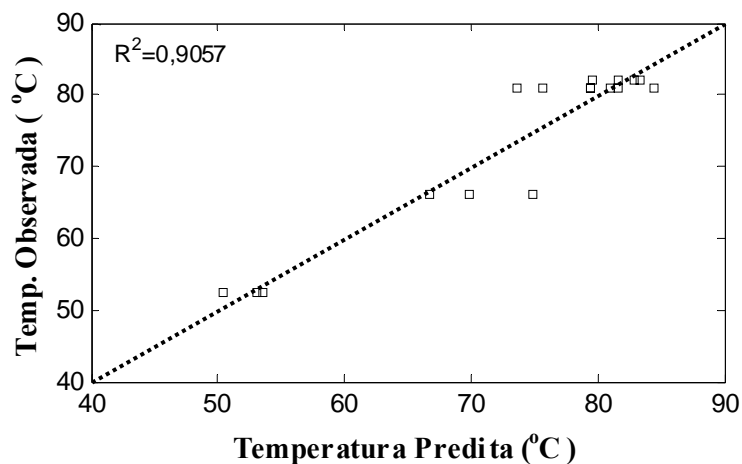
**Figura 5.12** – Valores médios dos módulos das impedâncias obtidos nas frequências de 10 kHz a 1 MHz para as amostras de peito de frango cozidas por imersão a 80 °C por diferentes períodos de tempo.

A partir de simulações com o *software* utilizado para realização da modelagem, observou-se um bom desempenho usando 5 componentes (variáveis latentes) para a modelagem da temperatura e 4 componentes para a modelagem do teor de umidade final. Os resultados obtidos estão apresentados na Figuras 5.13 e 5.15 (ajuste dos modelos obtidos) bem como nas Figuras 5.14 e 5.16 (resultados de validação). Os valores de  $R^2$  obtidos (0,9445 para modelagem da temperatura e 0,9641 para a modelagem do teor de umidade) indicam o bom ajuste dos modelos obtidos bem como o desempenho satisfatório de tais modelos para identificação ou predição dos parâmetros considerados nos grupos de validação ( $R^2 = 0,9057$  para o caso da temperatura e  $R^2 = 0,9388$  para o caso do teor de umidade).

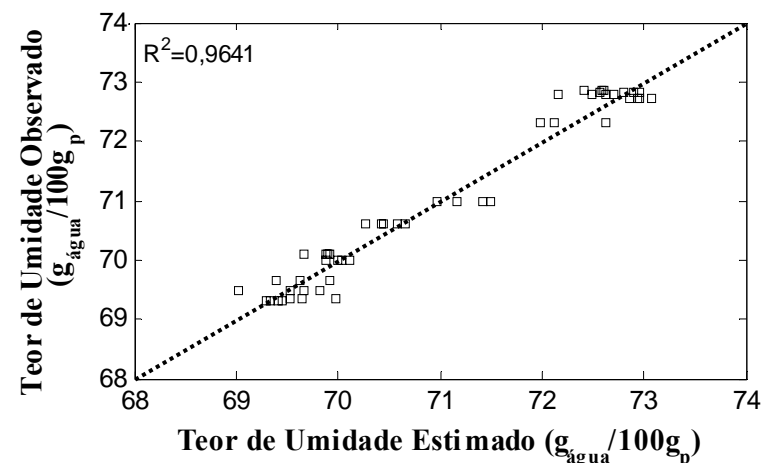




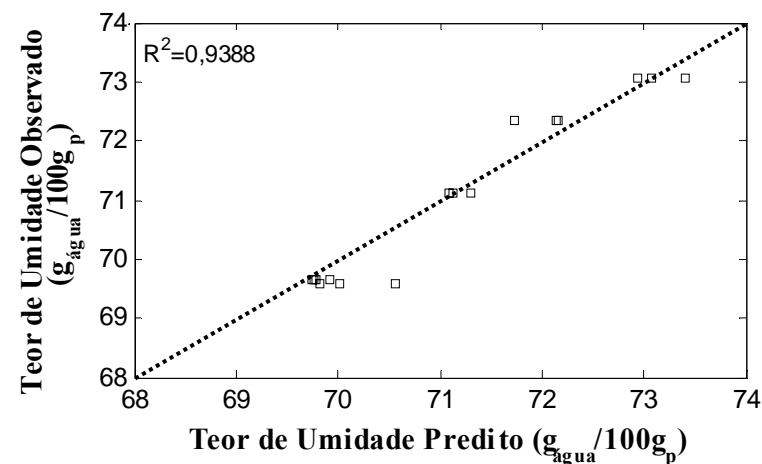
**Figura 5.13** – Ajuste obtido a partir da modelagem das temperaturas máximas atingidas pelos filés de peito de frango, no cozimento a 80 °C por diferentes períodos de tempo, em função do espectro de impedância usando o método de regressão linear por PLS.



**Figura 5.14** – Avaliação da capacidade de predição, usando o modelo obtido a partir da regressão linear por PLS, das temperaturas máximas atingidas pelos filés de peito de frango durante o cozimento.



**Figura 5.15** – Ajuste obtido a partir da modelagem do teor de umidade final dos filés de peito de frango em função do espectro de impedância usando o método de regressão linear por PLS.



**Figura 5.16** – Avaliação da capacidade de predição, usando o modelo obtido a partir da regressão linear por PLS, do teor de umidade final dos filés de peito de frango submetidas ao cozimento.

#### 5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, o uso da espectroscopia de impedância para a avaliação da temperatura máxima atingida por filés de peito de frango submetidos ao processo de cozimento por imersão foi estudado. Os resultados obtidos mostram uma clara relação entre o espectro de impedância e a temperatura máxima atingida pelas amostras durante a etapa de cozimento. Essa relação é confirmada pelo ajuste satisfatório dos resultados de modelagem e predição obtidos utilizando o método de regressão linear por PLS. Adicionalmente, a possibilidade da modelagem e predição de outros parâmetros do processo, como o teor de umidade final, foi observada a partir dos resultados experimentais obtidos. De maneira geral, o grande potencial de aplicação da espectroscopia de impedância para a análise de parâmetros de interesse durante o processamento de filés de peito de frango foi verificado, produzindo interessantes perspectivas para futuras atividades de pesquisa.

## CAPÍTULO 6

### **CONCLUSÕES FINAIS**

O desenvolvimento de processos para a industrialização de carne frango é de extrema importância para a indústria de alimentos. Neste trabalho foram apresentados resultados tecnológicos de relevância para a concepção de novas formas de processamento que permitam agregar valor a esse tipo de matéria-prima. A partir dos resultados discutidos e das considerações finais apresentadas ao final de cada capítulo podem ser destacadas as seguintes conclusões:

- O dispositivo experimental desenvolvido é uma alternativa viável para a integração dos processos de cozimento e resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango em um mesmo recipiente, permitindo reduzir a manipulação do produto e o consequente risco de contaminação microbológica.
- O método de resfriamento a vácuo (RV) apresenta-se como uma excelente alternativa na redução do tempo de processo e na obtenção de um resfriamento mais homogêneo de filés de peito de frango em comparação com o método tradicional de resfriamento em câmara fria (RC). Adicionalmente, o método RV é extremamente vantajoso para o resfriamento de peças de carne sujeitas ao empilhamento, em virtude da temperatura de cada peça ser reduzida à mesma taxa quer esteja no topo, no centro ou no fundo de um recipiente. Entretanto, a perda de água (decorrente da evaporação) durante o resfriamento a vácuo dos filés de peito de frango cozidos é maior que a perda de água durante o resfriamento em câmara fria. Dessa forma, o menor conteúdo de umidade dos produtos resfriados a vácuo tem

influência direta nas propriedades mecânicas dos mesmos (maiores valores de dureza e força máxima de cisalhamento).

- O resfriamento a vácuo de filés de peito de frango imersos na água de cozimento (método RVI) apresenta a melhor relação entre a redução de temperatura do produto durante o resfriamento e a perda de massa percentual nesta etapa do processo. Adicionalmente, a aplicação de ciclos de variação da pressão (pulsos de vácuo- pressão- atmosférica-vácuo) durante o RVI pode proporcionar reduções ainda maiores na perda de massa em comparação com os métodos RV e RC. No entanto, a taxa de resfriamento do produto através do método RVI é menor quando comparada com as taxas obtidas através do método RV, em função da maior quantidade de vapor gerado. Assim, fica evidente a grande importância do sistema de condensação de vapores no resfriamento a vácuo.
- A técnica de impregnação a vácuo integrada aos processos de cozimento e resfriamento a vácuo (CI-RV-IV) se apresenta como alternativa interessante para a redução da perda de massa global durante o processamento de filés de peito de frango cozido, sem apresentar o maior tempo de resfriamento obtido com o método RVI. Adicionalmente, o processo com impregnação a vácuo não exige que a etapa de cozimento seja realizada por imersão, podendo assim ser integrado ao cozimento com vapor para se obter economia de água. Além disso, essa técnica pode proporcionar a impregnação de um soluto de interesse ou de um molho diretamente na estrutura porosa dos filés de peito de frango, podendo ser utilizada no desenvolvimento de novos produtos.
- A espectroscopia de impedância (EI) permite estimar satisfatoriamente a temperatura máxima atingida e o teor de umidade final de cortes de peito de frango submetidos ao cozimento, sem promover alterações significativas em tal produto. Assim, a EI destaca-se como uma técnica promissora para o controle de qualidade na indústria de alimentos.

### ***PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS***

- Avaliar a microestrutura de amostras de filés de peito de frango após os processos CI,RC, CI-RV, CI-RVI, CI-RVIP e CI-RV-IV, com o objetivo de verificar os efeitos da variação da pressão (aplicação de vácuo e restabelecimento da pressão atmosférica) e da impregnação a vácuo nos produtos obtidos.
- Avaliação sensorial e microbiológica de filés de peito de frango temperados submetidos aos diferentes processos avaliados neste trabalho.
- Avaliar a impregnação a vácuo dos filés de peito de frango cozidos e resfriados a vácuo com soluções ou molhos de diferentes viscosidades.
- Avaliação do resfriamento a vácuo com um sistema misto de bombeamento de ar e vapor, composto por uma bomba de vácuo e um ejetor de água (esquema e descrição do processo apresentado no Apêndice B).
- Relacionar medidas de impedância de cortes de peito de frango cozidos a diferentes tempos e temperaturas com parâmetros mecânicos (força máxima de corte, por exemplo).

## REFERÊNCIAS

ABEF - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES E EXPORTADORES DE FRANGO. Disponível em: <[www.abef.com.br](http://www.abef.com.br)>. Acesso em: agosto de 2008.

AFONSO, M. R. A. **Resfriamento a vácuo de alfaces hidropônicas (*Lactuca sativa* L.) cv. Salad Bowl: avaliação do processo e da vida pós-colheita.** 2005. 227p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

AFONSO, M. R. A. **Resfriamento Rápido a Vácuo em Alfaces (*Lactuca Sativa* L.).** 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

ANG, C. Y. W.; LIUAND, F.; HUANG. Y. W Catalatic activity as an indicator of end-point temperatures in breaded, heat processed chicken patties. **Journal of Muscle Foods**, v. 7, p. 291–302, 1996.

ANIMAL SCIENCE COMPUTER LABS. Disponível em: <<http://www.anslab.iastate.edu>> Acesso em: março de 2006.

AOAC. Official Methods of Analysis, seventeenth ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC, 2000.

APATI, G.; FURLAN, S.A.; LAURINDO, J.B. Resfriamento a vácuo de cogumelos comestíveis *Pleurotus ostreatus*. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 9, n. 4, p. 249-256, 2006.

APHA. **Compendium of methods for the microbiological examination of foods**, American Public Health Association: 4<sup>a</sup> ed., Washington, D.C., 2001.

ARTÉS, F.; MARTÍNEZ, J.A. Influence of packaging treatments on the keeping quality of ‘Salinas’ lettuce. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, v. 29, p. 664-668, 1996.

BARAT, J.M.; RODRÍGUEZ-BARONA, S.; ANDRÉS, A.; FITO, P. Cod salting manufacturing analysis. **Food Research International**, v. 36, p. 447-453, 2003.

BARAT, J.M.; GIL, L.; GARCÍA-BREIJO, E., ARISTOY M-C.; TOLDRÁ, F.; MARTÍNEZ-MÁÑEZ, R. SOTO, J. Freshness monitoring of sea bream (*Sparus aurata*) with a potentiometric sensor. **Food Chemistry**, v. 108, p. 681–688, 2008.

BARAT, J.M.; GRAU, R., IBÁÑEZ, J.B.; FITO, P. Post-salting studies in Spanish cured ham manufacturing. Time reduction by using brine thawing-salting. **Meat Science**, v. 69, n. 2, p. 201-208, 2005.

BARBUT, S. Estimating the magnitude of the PSE problem in poultry. **Journal of Muscle Foods**, v. 9 (1), p. 35–49, 1998.

BARBUT, S.; SOSNICKI, A.A.; LONERGAN, S.M.; KNAPP, T.; CIOBANU, D.C.; GATCLIFFE, L.J.; HUFF-LONERGAN, E.; WILSON, E.W. Progress in reducing the pale, soft and exudative (PSE) problem in pork and poultry meat. **Meat Science**, v. 79, p. 46–63, 2008.

BARBUT, S.; ZHANG, L.; MARCONE, M. Effects of pale, normal and dark chicken breast meat on microstructure, extractable proteins, and cooking of marinated fillets. **Poultry Science**, v. 84, pp. 797–802, 2005.

BENDALL, J. R.; RESTALL, D. J. The cooking of single myofibres, small myofibre bundles and muscle strips from beef *M. psoas* and *M. sternomandibularis* muscles at varying heating rates and temperatures. **Meat Science**, v. 8, p. 93-117, 1983.

BETORET, N.; PUENTE, L.; DÍAZ, M.J; PAGÁN, M.J; GARCÍA, M.J; GRAS, M.L.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; FITO, P. Development of probiotic-enriched dried fruits by vacuum impregnation. **Journal of Food Engineering**, v. 56, p. 273-277, 2003.

BOGIN, E.; ISRAELI, B.A.; KLINGER I. Evaluation of heat treatment of turkey breast meat by biochemical methods. **Journal of Food Protection**, v. 55, p. 787–791, 1992.

BORCH, E.; KANT-MUERMANS, M.L.; BLIXT, Y. Bacterial spoilage of meat and cured meat products. **International Journal of Food Microbiology**, v. 33, p. 103-120, 1996.

BOURNE, M.C. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. New York: Academic Press, 1982.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Abastecimento. Instrução Normativa nº 89, de 17 de dezembro de 2003. **Regulamento Técnico de Qualidade e Identidade de Aves Temperadas**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 dez. 2003. Disponível em: <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: Novembro de 2010.

BROMBERG, R; MIYAGUSKU, L. **Microbiologia de carnes processadas termicamente**. Preservação da carne pelo processo de cocção, Campinas - SP, CTC/ITAL, 2008. CD-ROM.

BROSNAN, T; SUN, D-W. Compensation or water loss in vacuum-precooled cut lily flowers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 79, n. 3, 299-305, 2001.

BURFOOT, D.; SELF, K.P.; HUDSON, W.R.; WILKINS, T.J.; JAMES, S.J. Effect of cooking and cooling method on the processing time, mass losses and bacterial condition of large meat joints. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 22, p. 599–606. 1990.

BURTON, K. S.; FROST, C.E.; ATKEY, P.T. Effect of vacuum cooling on mushroom browning. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 22, p. 599-606, 1987.

CARCIOFI, B.A.M. 2009. **Dinâmica da impregnação a vácuo em meios porosos**. 2009. 94p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CHANET, M.; RIVIÈRE, C.; EYNARD, P. Electric impedance spectrometry for the control of manufacturing process of comminuted meat products. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 153-159, 1999.

CHENG, Q.; SUN, D- W. Feasibility assessment of vacuum cooling of cooked pork ham with water compared to that without water and with air blast cooling. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 41(8), p. 938–945, 2006a.

CHENG, Q.; SUN, D-W. Effects of combined water cooking–vacuum cooling with water on processing time, mass loss and quality of large pork ham. **Journal of Food Process Engineering**, v. 30, p. 51–73, 2006c.

CHENG, Q.; SUN, D-W. Improving the quality of pork ham by pulsed vacuum cooling in water. **Journal of Food Process Engineering**, v. 29(2), p. 119–133, 2006b.

CHIRALT, A.; FITO, P.; BARAT, J. M.; ANDRÉS, A.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; ESCRICHE I.; CAMACHO, M. M. Use of vacuum impregnation in food salting process. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 2-3, p. 141-151, 2001.

CORTEZ, L. A. B.; NEVES FILHO, L.; CARDOSO, J. L. Análise Preliminar de uma unidade de resfriamento a vácuo de alface. **Horticultura Brasileira**, v. 18, n. 3, p. 232-238, 2000.

DAMEZ, J.L.; CLERJON, S.; ABOUELKARAM, S.; LEPETIT, J. Beef meat electrical impedance spectroscopy and anisotropy sensing for non-invasive early assessment of meat ageing. **Journal of Food Engineering**, v.85 p. 116–122, 2008.

DAMEZ, J. L.; CLERJON, S.; ABOUELKARAM, S.; LEPETIT, J. Dielectric behavior of beef meat in the 1–1500 kHz range: Simulation with the Fricke/Cole–Cole model. **Meat Science**, v. 77, p.512–519, 2007.

DAMEZ, J.L.; CLERJON, S. Meat quality assessment using biophysical methods related to meat structure. **Meat Science**, v. 80, p. 132–149, 2008.

DAWSON, P.L.; MANGALASSARY, S.; SHELDON, B.W. **Thermal Processing of Poultry Products In: Thermal food processing: new technologies and quality issues**. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006. 640 p.

DESMOND, E. M.; KENNY, T.A.; WARD, P.; SUN, D-W. Effect of rapid and conventional cooling methods on the quality of cooked ham joints. **Meat Science**, v. 56, p. 271-277, 2000.

DESMOND, E.M.; KENNY, T.A.; WARD, P. The effect of injection level and cooling method on the quality of cooked ham joints. **Meat Science**, v. 60, p. 271-277, 2002.

DEUMIER, F.; TRYSTRAM, G.; COLLIGNAN, A.; GUÉDIDER, L.; BOHUONB, P. Pulsed vacuum brining of poultry meat: interpretation of mass transfer mechanisms. **Journal of Food Engineering**, v. 58, n. 1, p. 85-93, 2003.

DOSTAL, M.; HOUSKA, M.; GREE, R.; KYHOS, K. Vacuum cooling of solid foods. **Czech Journal of Food Sciences**, v. 17, p. 103-112, 1999.

DRUMMOND, L.; SUN, D-W.; VILA, C.T.; SCANNELL, A.G.M. Application of immersion vacuum cooling to water-cooked beef joints – quality and safety assessment, **LWT. Food Science and Technology**, v. 42 (1), p. 332–337, 2009.

DRUMMOND, L.; SUN, D.-W. Feasibility of water immersion cooking of beef joints: Effect on product quality and yield, **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 289-294, 2006.

DRUMMOND, L., SUN, D.-W. Immersion vacuum cooling of cooked beef – safety and process considerations regarding beef joint size. **Meat Science**, v. 80 (3), p. 738–743, 2008.

FITO, P.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A.; PARDO, P. Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems. **Journal of Food Engineering**, v. 27, n. 3, p. 229-240, 1996.

FITO, P.; CHIRALT, A.; BETORET, N.; GRAS, M.; CHÁFER, M.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; ANDRÉS, A.; VIDAL, D. Vacuum impregnation and osmotic dehydration in matrix engineering: Application in functional fresh food development. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 175-183, 2001b.

FITO, P.; CHIRALT, A.; BARAT, J.M.; ANDRÉS, A.; MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Vacuum impregnation for development of new dehydrated products. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 297–302, 2001a.

FITO, P. Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. **Journal of Food Engineering**, v. 22, n. 1-4, p. 313-328, 1994.

FITO, P.; PASTOR, R. Non-diffusional mechanisms occurring during vacuum osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 21, n. 4, p. 513-519, 1994.

GARCÍA-BREIJO, E.; BARAT, J.M.; TORRES, O.L.; GRAU, R.; GIL, L.; IBÁÑEZ, J.; ALCANIZ, M.; MASOT, R.; FRAILE, R. Development of a puncture electronic device for electrical conductivity measurements throughout meat salting. **Sensors and Actuators A**, v. 148, p.63–67, 2008.

GEANKOPLIS, M. R. A. **Transport Processes and Unit Operations**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1993. 921 p.

GIL, L.; BARAT, J.M.; GARCÍA-BREIJO, E.; IBÁÑEZ, J.; MARTÍNEZ-MÁÑEZ, R.; SOTO, J.; LLOBET, E.; BREZMES, J.; ARISTOY, M-C.; TOLDRÁ, F. Fish freshness analysis using metallic potentiometric electrodes. **Sensors and Actuators B**, v. 131, p. 362–370, 2008.

GUARNIERI, P.D.; SOARES, A.L.; OLIVO, R.; SCHNEIDER, J.P.; MACEDO, R.M.; IDA, E.I.; SHIMOKOMAKI, M. Preslaughter handling with water shower spray inhibits PSE (pale, soft, exudative) broiler breast meat in a commercial plant. Biochemical and ultra structural observations. **Journal of Food Biochemistry**, v. 28, p. 269–277, 2004.

GUERRERO, L. GOBANTES, I.; OLIVER, M.A.; ARNAU, J.; GUÀRDIA, M.D.; ELVIRA, J.; RIU, P.; GRÈBOL, N.; MONFORT, J.M. Green hams electrical impedance spectroscopy (EIS) measures and pastiness prediction of dry cured hams. **Meat Science**, v. 6, p. 289–294, 2004.

HAAS, E.; GUR, G. Factors affecting the cooling rate of lettuce in vacuum cooling instalations. **International Journal of Refrigeration**, v. 10, p. 82-86, 1987.

HOFMEISTER, L. C.; SOUZA, J. A. R.; LAURINDO, J. B. Use of dyed solutions to visualize different aspects of vacuum impregnation of Minas cheese. **LWT-Food and Science Technology**, v. 38, n. 4, p. 379-386, 2005.

HONIKEL, K.O.; KIM, C.J.; HAMM, R.; RONCALES, P. Sarcomere shortening of *prerigor* muscles and its influence on drip loss. **Meat Science**, v. 16, p. 267-282, 1986.

HOUSKA, M.; SUN, D-W.; LANDFELD, A.; ZHANG, Z. Experimental study of vacuum cooling of cooked beef in soup. **Journal of Food Engineering**, v. 59, p. 105-110, 2003.

HOUSKA, M.; PODLOUCKY, S.; ZITNY, R.; GREE, R.; SESTAK, J.; DOSTAL, M.; BURFOOT, D. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 339–348, 1996.

HUBER, E. 2004. **Resfriamento a vácuo de cortes de carne após o cozimento**. 2004. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

HUBER, E.; LAURINDO, J. B. Determination of mass transfer coefficients during the vacuum cooling of pre-cooked meat cuts. **International Journal of Food Properties**, v. 9, n. 2, p. 287-298, 2006.

HUBER, E.; LAURINDO, J. B. Weight loss of precooked chicken breast cooled by vacuum application. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28, n. 3, p. 299-312, 2005.

JAMES, S. J. **Cooling systems for ready meals and cooked products**. In R. W. Field, & J. A. Howell (Eds.), *Process engineering in the food industry 2: Convenience foods and quality assurance* (pp. 88–97). London, UK: Elsevier, 1990.

JIN, T.X.; ZHU, H.M.; XU, L. Moisture movement characteristics and their effect on the ultrastructure of cooked meat during vacuum cooling. **Biosystems Engineering**, v.95 (1), p. 111–118, 2006.

KITAMURA, Y.; TOYODA, K.; PARK, B. Electric impedance spectroscopy for yogurt processing. **Food Science and Technology Research**, v.6 (4), p. 310–313, 2000.

LAURINDO, J.B.; STRINGARI, G.B.; PAES, S.S.; CARCIOFI, B.A. Experimental determination of the dynamics of vacuum impregnation of apples. **Journal of Food Science**, v. 72, p. 470-475, 2007.

LAWRIE, R. A. **Ciência da carne**. 6ª.ed. Porto Alegre: Artmed, 2005. 384p.

LE MESTE, M.; LORIENT, D; SIMATOS, D. **L’eua dans aliments**. Paris: Editions TEC & DOC, 2002. 674p.

LIZHI, H.; TOYODA, K.; IHARA, I. Discrimination of olive oil adulterated with vegetable oils using dielectric spectroscopy. **Journal of Food Engineering**, v.9, p. 167–171, 2010.

MACDONALD, J. R. BARSOUKOV, E. **Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications**. 2ª ed., John Wiley & Sons, Inc. 2005.

MARTÍNEZ, J. A.; ARTÉS, F. Effect of packaging treatments and vacuum cooling on quality of winter harvested iceberg lettuce. **Food Research International**, v. 32, p. 621-627, 1999.

MARTÍNEZ-MONZÓ, J.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N.; CHIRALT, A.; FITO, P. Mechanical properties and structural changes in apple (Var. Granny Smith) due to vacuum impregnation with cryoprotectants. **Journal of Food Science**, v. 63, n. 3, 1998.

MASOT, R. **Desarrollo de un sistema de medida basado en espectroscopía de impedancia para la determinación de parámetros fisicoquímicos en alimentos**. 2010. 214f. Tese de doutorado - Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2010.

MASOT, R.; ALCANIZ, M.; FUENTES, A.; SCHMIDT, F.C.; BARAT, J.M.; GIL, L.; BAIGTS, D.; MARTÍNEZ-MÁÑEZ, R.; SOTO, J. Design of a low-cost non-destructive system for punctual measurements of salt levels in food products using impedance spectroscopy. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 158 (2), p. 217-223, 2010.

MCDONALD, K.; SUN, D. W.; KENNY, T. The effect of injection level on the quality of a rapid vacuum cooled cooked beef product. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 139-147, 2001.

MCDONALD, K.; SUN, D-W. The formation of pores and their effects in a cooked beef product on the efficiency of vacuum cooling. **Journal of Food Engineering**, v. 47, 175-183, 2001a.

MCDONALD, K.; SUN, D-W. Effect of evacuation rate on the vacuum cooling process of a cooked beef product. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 195-202, 2001b.

MCDONALD, K.; SUN, D-W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 45, p. 55-65, 2000.

MCDONALD, K.; SUN, D-W.; KENNY, T. Comparison of the quality of cooked beef products cooled by vacuum cooling and by conventional cooling. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, v. 33, p. 21-29, 2000.

MCDONALD, K.; SUN, D-W.; LYNG, J. G. Effect of Vacuum cooling on the thermophysical properties of a cooked beef product. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 167-176, 2002.

MOREIRA, J. **Causas da ocorrência de carne PSE em frangos de corte e como controlá-las**. IV Seminário Internacional de Aves e Suínos, Florianópolis - SC, 2005.

MÚJICA-PAZ, H.; VALDEZ-FRAGOSO, A.; LÓPEZ-MALO, A.; PALOU, E.; WELTI-CHANES, J. Impregnation properties of some fruits at vacuum pressure. **Journal of Food Engineering**, v. 56, n. 4, p. 307-314, 2003.



NIU, J.; LEE, J. A new approach for the determination of fish freshness by electrochemical impedance spectroscopy. **Journal of Food Science**, v. 65(5), p. 780–785, 2000.

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**, v. 58, p. 107-116, 1992.

OFFER, G; TRINICK, J. On the mechanism of water holding in meat - the swelling and shrinking of myofibrils. **Meat Science**, v. 8, p. 245-281, 1983.

OLIVER, M. A.; GOBANTES, I.; ARNAU, J.; ELVIRA, J.; RIU, P.; GRÈBOL, N.; MONFORT, J.M. Evaluation of the electrical impedance spectroscopy (EIS) equipment for ham meat quality selection. **Meat Science**, v. 58 (3), p. 305–312, 2001.

OLIVO, R.; SCARES, A.L.; IDA, E.I.; SHIMOKOMAKI, M. Dietary vitamin E inhibits poultry PSE and improves meat functional properties. **Journal Food Biochemistry**, v. 25, p.271-283, 2001.

OLIVO, R. **O mundo do frango: cadeia produtiva da carne de frango**. Criciúma, SC: Ed. do Autor, 2006. 680p.

OLIVO, R.; SHIMOKOMAKI, M. **Carne PSE em Frangos. In: Atualidades em Ciência e Tecnologia de Carnes** Shimokomaki et al. 1ª ed., São Paulo: Varela, p. 95-104, 2006.

OLIVO, R.; SHIMOKOMAKI, M. **Carnes: no caminho da pesquisa**. 2. ed. Cocal do Sul: IMPRINT, 2002. 155p.

ORTA-RAMIREZ, A.; SMITH, D.M. Thermal inactivation of pathogens and verification of adequate cooking in meat and poultry products. **Advances in Food Nutrition Research**, v. 44, p. 147–194, 2002.

PAES, S.S.; STRINGARI, G.B.; LAURINDO, J.B. Effect of vacuum impregnation-dehydration on the mechanical properties of apples. **Drying Technology**, v. 24, p. 1649-1656, 2006.

PARDI, M.C.; SANTOS, I.F.; SOUZA, E.R.; PARDI, H.S. **Ciência e Higiene da Carne. Tecnologia de sua Obtenção e Transformação**. 1ed. Niterói: EDDF, 1995.

RENNIE, T.J.; VIGNEAULT, C.; RAGHAVAN, G.S.V.; DEELL, J.R. Effects of pressure reduction rate on vacuum cooled lettuce quality during storage. **Canadian Biosystems Engineering**, v. 43, p. 3.39-3.43, 2001.

ROÇA, R.O. **Tecnologia da carne e produtos derivados**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, 2000. 202p.

RODRIGUES, L.G.G. **Processo integrado de cozimento e resfriamento de legumes**. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, 2009.

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

SCHMIDT, F.C.; CARCIOFI, B.A.M.; LAURINDO, J.B. Efeito da impregnação a vácuo na transferência de massa durante o processo de salga de cortes de peito de frango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, p. 366-372, 2008b.

SCHNEIDER, J.P.; ODA, S.H.I.; GUARNIERI, P.D.; OLIVO, R.; SHIMOKOMAKI, M. **Carne DFD em Frangos. In: Atualidades em Ciência e Tecnologia de Carnes** Shimokomaki et al. 1ª ed., São Paulo: Varela, p. 105-110, 2006.

SELF, K.P.; NUTE, G.R.; BURFOOT, D.; MONCRIEFF, C.B. Effect of Pressure Cooking and Pressure Rate Change during Cooling in Vacuum on Chicken Breast Quality and Yield. **Journal of Food Science**, v. 55 (6), p. 1531-1535, 1990.

SHIMOKOMAKI, M.; OLIVO, R.; TERRA, N.N., FRANCO, B.D.G.M.A. **Atualidades em Ciência e Tecnologia de Carnes**. 1ª ed. Varela, São Paulo-SP, 2006. 236 p.

SOARES, A.L.; IDA, E.I.; MIYAMOTO, S.; HERNÁNDEZ-BLAZQUEZ, F.J.; OLIVO, R.; PINHEIRO, J.W.; SHIMOKOMAKI,

M. Phospholipase A2 activity in poultry PSE, pale, soft, exudative, meat. **Journal of Food Biochemistry**, v. 27(4), p. 309–320, 2003.

SUN, D-W.; BROSANAN, T. Extension of the vase life of cut daffodil flowers by rapid vacuum cooling. **International Journal of Refrigeration**, v. 22, p. 472- 478, 1999.

SUN, D-W.; WANG, L. Experimental investigation of performance of vacuum cooling for commercial large cooked meat joints. **Journal of Food Engineering**, v.61 (4), p. 527-532., 2003.

SUN, D-W.; WANG, L. Heat transfer characteristics of cooked meats using different cooling methods. **International Journal of Refrigeration**, v. 23, p. 508-516, 2000.

TORNBERG, E. Effects of heat on meat proteins - Implications on structure and quality of meat products. **Meat Science**, v. 70, n. 3, p. 493-508, 2005.

UBABEF – UNIÃO BRASILEIRA DE AVICULTURA. Disponível em: <<http://www.brazilianchicken.com.br>>. Acesso em: novembro de 2010.

USDA, UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Disponível em: < <http://www.usda.gov> > Acesso em julho de 2008.

VELAND, J.O.; TORRISEN, O.J. The texture of Atlantic salmon (*Salmo salar*) muscle as measured instrumentally using TPA and Warner-Brazler shear test. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 79, p. 1737-1746, 1999.

VOLPATO, G.; MICHIELIN, E.M.Z.; FERREIRA, S.R.S.; PETRUS, J.C.C. Optimization of the chicken breast cooking process. **Journal of Food Engineering**, v.84, p. 576-581, 2008.

WANG, L.; SUN, D-W. Effect of operating conditions of a vacuum cooler on cooling performance for large cooked meat joints. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 231-240, 2003.

WANG, L.; SUN, D-W. Modelling vacuum cooling process of cooked meat – Part 1: Analysis of vacuum cooling system. **International Journal of Refrigeration**, v. 25, p. 854-861, 2002a.

WANG, L.; SUN, D-W. Modelling vacuum cooling process of cooked meat – part 2: Mass and heat transfer of cooked meat under vacuum pressure. **International Journal of Refrigeration**, v. 25, p. 862-871, 2002b.

WANG, L.; SUN, D-W. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology. **Food Science & Technology**, v. 12, p. 174-184, 2001.

WARRISS, P. D. **Ciencia de la carne**. 2.ed. Zaragoza: ACRIBIA, 2003. 309p.

WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 58, p. 109–130, 2001.

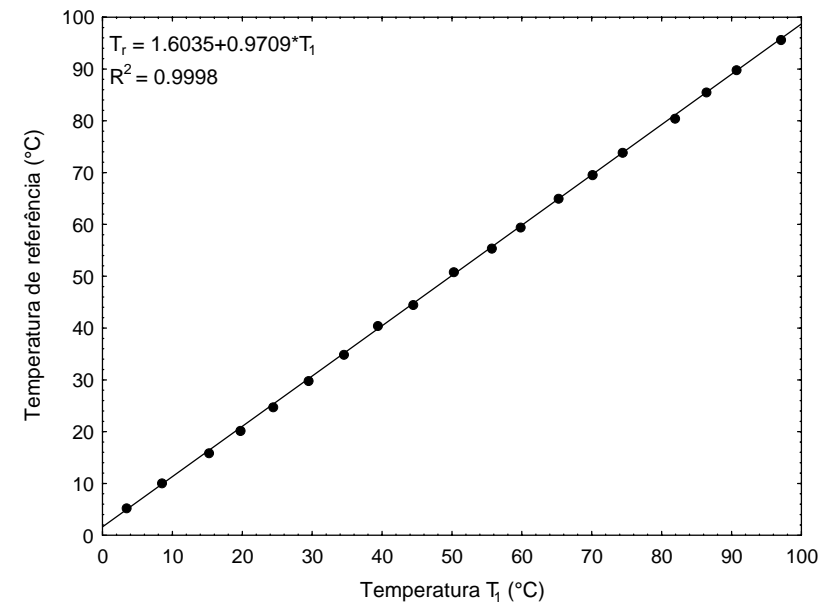
ZHANG, Z.; SUN, D-W. Experimental study on temperature and weight loss profiles of vacuum cooling of sliced cooked carrot. In: **21° IIR International Congress of Refrigeration**, Washington, DC USA, p. ICR0470, 2003.

ZHANG, Z.; SUN, D-W. Effects of cooling methods on the cooling efficiency and quality of cooked rice. **Journal of Food Engineering**, v. 77, p. 269-274, 2006.

ZHENG, L.; SUN, D-W. Vacuum cooling for the food industry - A review of recent research advances. **Trends in Food Science & Technology**, v. 15, p. 555–568, 2004.

## APÊNDICE A

### *CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA*



**Figura A.1** - Curva de calibração do termopar 1.

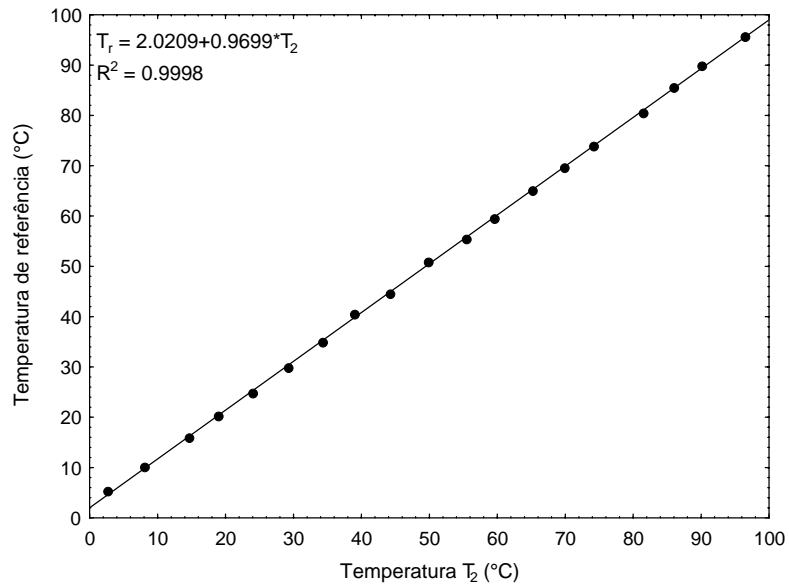


Figura A.2 - Curva de calibração do termopar 2.

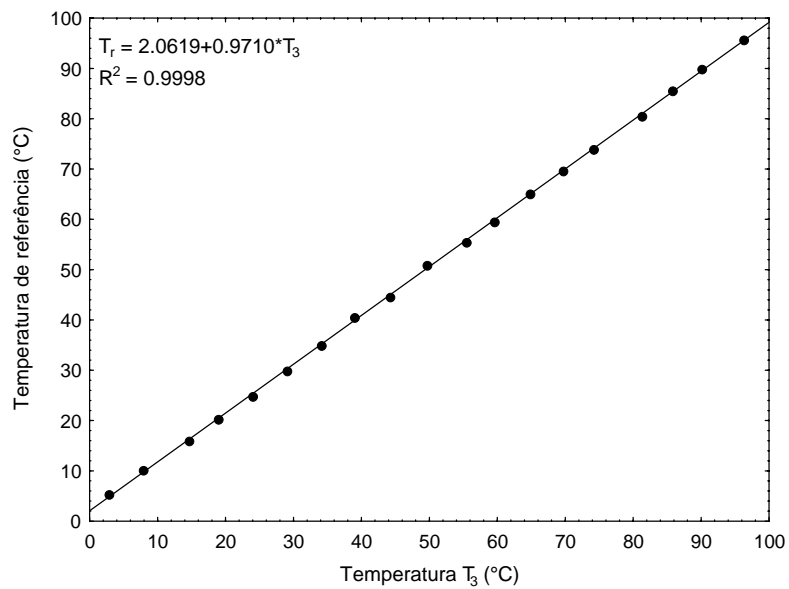


Figura A.3 - Curva de calibração do termopar 3.

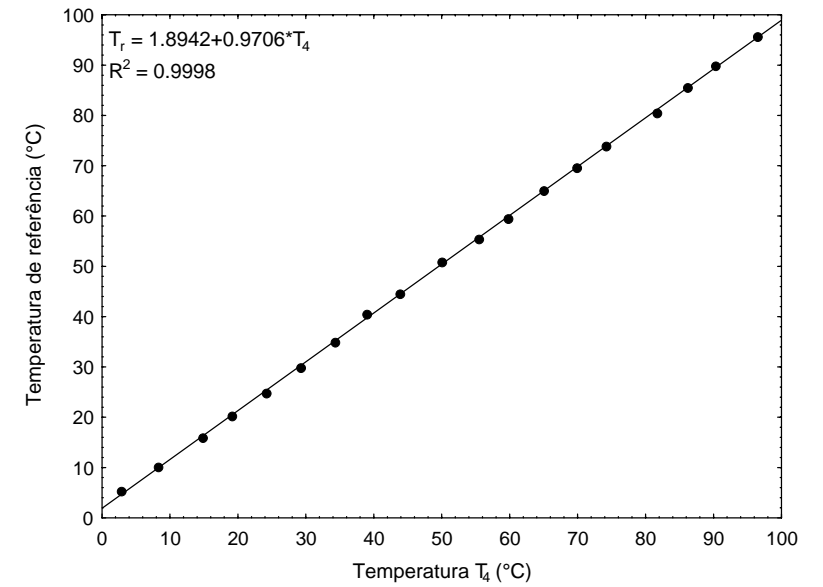


Figura A.4 - Curva de calibração do termopar 4.

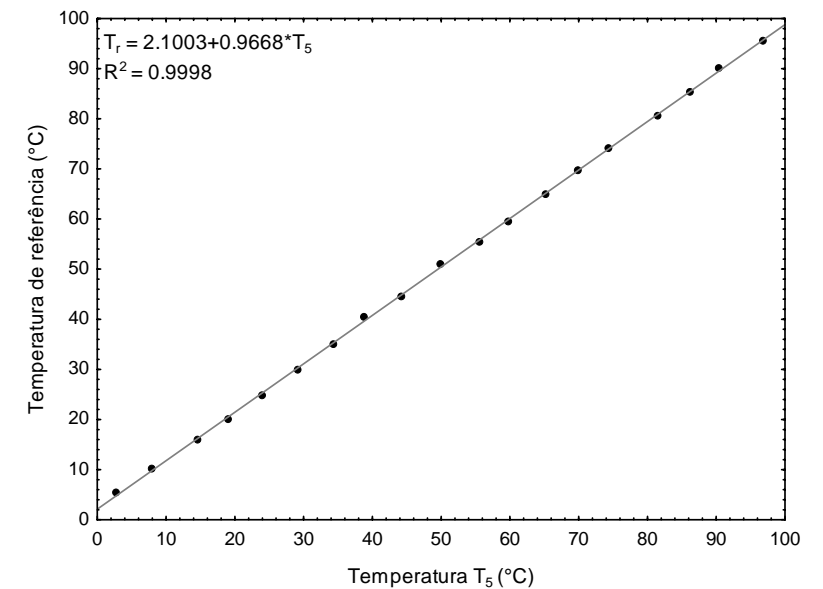


Figura A.5 - Curva de calibração do termopar 5.

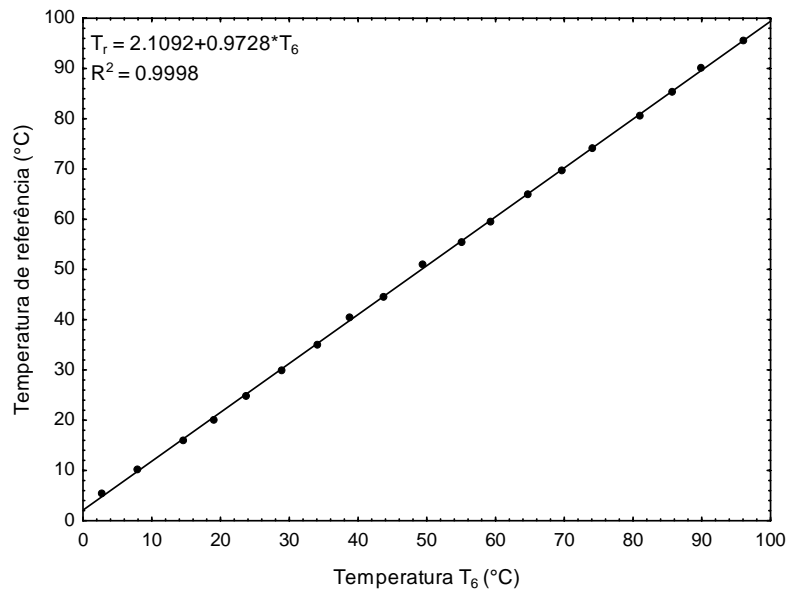
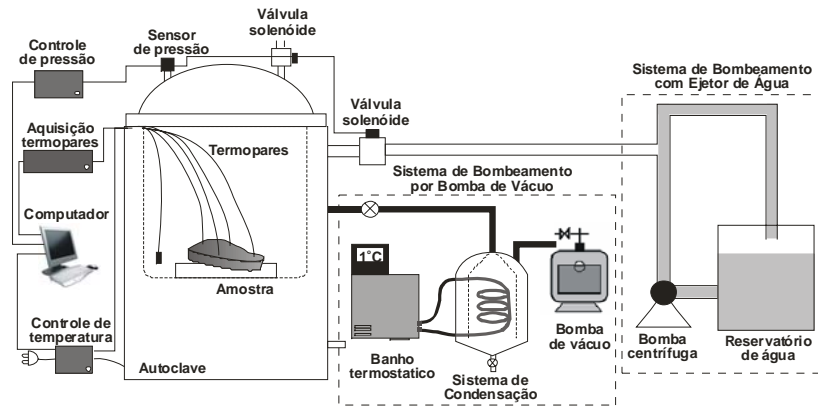


Figura A.6 - Curva de calibração do termopar 6.

## APÊNDICE B

### *PROPOSTA DE UM DISPOSITIVO INTEGRADO PARA O COZIMENTO-RESFRIAMENTO A VÁCUO USANDO UM SISTEMA MISTO DE BOMBEAMENTO DE AR E VAPOR DE ÁGUA*

Na Figura B.1, o dispositivo experimental proposto no Capítulo 2 deste trabalho é apresentado em conjunto com um sistema complementar de bombeamento de ar e vapor de água. Tal sistema complementar de bombeamento é formado por um ejetor constituído por um tanque com circulação de água em circuito fechado, a qual é promovida por uma bomba centrífuga. Neste caso, o vácuo é produzido pela passagem de água pelo ejetor, succionando os vapores produzidos na câmara. Esse sistema possui como vantagem o seu baixo custo, além de não necessitar de um sistema adicional de condensação de vapores. Em testes preliminares, o sistema de bombeamento com ejetor possibilitou atingir uma pressão na câmara de cozimento-resfriamento de aproximadamente 105 mbar, o que corresponderia a uma temperatura final do produto em torno de 45 °C. Desta forma, esse sistema pode ser utilizado para o pré-resfriamento das amostras e para remoção dos vapores produzidos durante esse pré-resfriamento. Tal remoção de vapores pode contribuir para um resfriamento mais rápido das amostras com o subsequente acionamento da bomba de vácuo. Assim, pode ser possível a obtenção de taxas maiores de resfriamento sem a necessidade de um investimento em bombas de vácuo com maiores vazões e/ou em sistemas de condensação de maior capacidade.



**Figura B.1** - Esquema do dispositivo para a realização dos processos de cozimento-resfriamento a vácuo composto por um sistema misto de bombeamento (bomba de vácuo e ejetor de água).

## APÊNDICE C

### *MÉTODO DE REGRESSÃO POR MÍNIMOS QUADRADOS PARCIAIS (PLS)*

O método de regressão por mínimos quadrados parciais (*partial least-squares* – PLS) é um método de análise com múltiplas variáveis onde a relação entre uma variável independente X e uma variável dependente Y é estabelecida maximizando a covariância entre ambas (WOLD, SJÖSTRÖM e ERIKSSON, 2001). Tal método é particularmente interessante para casos onde a matriz de variáveis independentes X apresenta mais variáveis do que observações e um alto grau de correlação entre tais observações (por exemplo, 20 observações de espectros de impedância com 80 pontos cada), sendo esses os casos que apresentam maior grau de dificuldade para o uso de métodos de regressão convencionais. A regressão por PLS emprega uma série de fatores ortogonais chamados de variáveis latentes que capturam a máxima covariância possível, sendo que o modelo da relação entre as variáveis é obtido selecionando as variáveis latentes cuja covariância com as variáveis dependentes é máxima. Assim, um dos passos mais importantes para o uso do PLS é a escolha do número dessas variáveis latentes (componentes) que vão estabelecer a relação entre as variáveis X e Y. Essa escolha é normalmente feita usando um procedimento chamado validação cruzada (*cross validation*), no qual o erro mínimo de predição é determinado. Uma descrição detalhada do método é apresentada por Wold, Sjöström e Eriksson (2001).