

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

**RESFRIAMENTO A VÁCUO DE CORTES DE CARNES**  
**APÓS O COZIMENTO**

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

Orientador: Prof. Dr. João Borges Laurindo

**EDUARDO HUBER**  
Engenheiro Químico

Florianópolis, 30 de Janeiro de 2004.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor João Borges Laurindo, pela orientação, disponibilidade e atenção prestadas durante a execução deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora: professor Vivaldo Silveira Jr., professora Sandra Regina Salvador Ferreira e professor Haiko Hense. Obrigado pelas contribuições e sugestões oferecidas a este trabalho.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI): Leozão, Sabrina, Fabinho, Bruno, Léo, Dani, Silvia, Cris, Geovana, Patrícia, Gustavo e Giannini. Agradeço a prestatividade de todos; cada um de um modo muito especial e valioso.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos e à Ivana, pelo auxílio sempre que necessário.

Às amigas Dri e Mari, pela companhia em todos os momentos e, pela “vida em Floripa”. Aos demais amigos e colegas de Mestrado, Carlota, Nei, Mônica e Eliana, pelos divertidos momentos que passamos juntos.

Aos amigos que fiz na UFSC: Carlson, Kátia, Silmar, Zé Paulo e Cleomirio. Obrigado pela atenção em todas as horas que eu precisei.

Aos amigos que sempre acreditaram em meu potencial e sempre me incentivaram, mesmo de longe: Rodrigo, Rafa, Greice, Evair, Piola, Éverton, Alexandre, Rejane, Lisiane, Viviane, Shelly e Flávia. Aos demais, obrigado pelos conselhos e apoios.

À minha família, pela confiança e incentivo, seja em qualquer momento.

A Deus, sempre.

**Deus,  
Obrigado por dar-me serenidade,  
Para aceitar as coisas  
Que não posso mudar...  
Coragem,  
Para mudar as coisas que posso...  
E sabedoria,  
Para saber a diferença.**

***O Senhor é meu Pastor, nada me  
faltará.***

## SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b> .....	iii
<b>Lista de Tabelas</b> .....	vi
<b>Resumo</b> .....	vii
<b>Abstract</b> .....	viii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
2.1 O uso do frio .....	3
2.1.1 A influência da temperatura sobre os alimentos .....	4
2.1.2 Resfriamento de carnes cozidas .....	5
2.2 O resfriamento a vácuo .....	6
2.2.1 Vantagens e desvantagens do resfriamento a vácuo .....	10
2.3 Aplicações do resfriamento a vácuo .....	12
2.3.1 Resfriamento a vácuo de cortes de carnes cozidos .....	15
2.4 Estudos específicos envolvendo a técnica do resfriamento a vácuo .....	16
2.4.1 Influência da taxa de redução de pressão .....	16
2.4.2 Desenvolvimento de modelos matemáticos .....	17
2.4.3 Resfriamento a vácuo de peixes e frutos do mar .....	19
2.4.3.1 Cultivo e processamento de mexilhões .....	20
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
3.1 Montagem do dispositivo experimental de resfriamento a vácuo.....	23
3.2 Determinação da influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos .....	25
3.2.1 Preparação das amostras e cozimento .....	25
3.2.2 Resfriamento a vácuo .....	26
3.3 Determinação dos coeficientes de evaporação ( $k_S$ ) em cortes de carne pré-cozidos resfriados a vácuo .....	29

3.3.1	Preparação das amostras de carnes e cozimento .....	29
3.3.2	Resfriamento a vácuo .....	30
3.4	Resfriamento a vácuo de mexilhões cozidos .....	32
3.4.1	Preparação das amostras .....	32
3.4.2	Resfriamento a vácuo .....	33
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
4.1	Avaliação da influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos .....	36
4.1.1	Avaliação da perda de massa .....	36
4.1.2	Ciclo de resfriamento .....	39
4.2	Determinação dos coeficientes de evaporação ( $k_S$ ) em cortes de carne pré-cozidos resfriados a vácuo .....	45
4.3	Resfriamento a vácuo de mexilhões cozidos .....	52
4.3.1	Sistema experimental com bomba de vácuo .....	52
4.3.2	Sistema experimental com ejetores de água .....	57
4.3.3	Sistema utilizando a câmara de resfriamento a vácuo .....	58
4.3.4	Comparação entre os sistemas de resfriamento a vácuo .....	59
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>– Curvas de calibração dos sensores de temperatura .....</b>	<b>72</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 – Sistema básico de resfriamento a vácuo .....	9
Figura 2 – Curvas de resfriamento para cortes de carne cozidos (4-5 kg), resfriados por diferentes métodos .....	10
Figura 3 – Energia requerida por diferentes resfriadores .....	12
Figura 4 – O mexilhão <i>Perna perna</i> : (a) fresco e (b) cozido .....	20
Figura 5 – Fluxograma genérico do processamento de mexilhões .....	22
Figura 6 – Sistema experimental de resfriamento a vácuo: 1 – bomba de vácuo; 2 – dispositivo para controle da taxa de redução de pressão, com vazamentos calibrados; 3 – <i>trapping</i> ; 4 – condensador; 5 – vacuômetro; 6 – câmara de vácuo com amostra e termopares; 7 – sistema de aquisição de dados e microcomputador .....	24
Figura 7 – Fotografias de uma amostra de peito de frango: (a) antes do cozimento e (b) após o cozimento .....	26
Figura 8 – Dispositivo com vazamentos calibrados, para obtenção de diferentes taxas de redução de pressão .....	27
Figura 9 – Fotografias de amostras de carne utilizadas nos experimentos: (a) lombo bovino <i>in natura</i> e (b) cozido e (c) lombo suíno <i>in natura</i> e (d) cozido .....	30
Figura 10 – Fotografias de amostras de areia utilizadas nos experimentos de resfriamento a vácuo: (a) cilindros de PVC de diferentes tamanhos, (b) cilindros de PVC compactados com areia .....	32
Figura 11 – Curvas de vácuo utilizadas na realização dos experimentos de resfriamento de mexilhões .....	33
Figura 12 – Resfriamento a vácuo na câmara ILKA: (a) interior da câmara e (b) recipiente de cozimento com os mexilhões .....	34
Figura 13 – Calor específico do peito de frango cozido para diferentes temperaturas .....	38
Figura 14 – Evolução temporal da temperatura para o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango cozidos, com um valor $Y = 0,01828 \text{ s}^{-1}$ .....	40
Figura 15 – Evolução temporal da temperatura para o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango cozidos, com um valor $Y = 0,01123 \text{ s}^{-1}$ .....	40

Figura 16 – Curvas médias de resfriamento para diferentes taxas de redução de pressão, definidas pela variável $Y$ .....	41
Figura 17 – Algoritmo utilizado para o cálculo das evoluções temporais da massa de peitos de frango cozidos resfriados a vácuo .....	42
Figura 18 – Resultados das simulações numéricas das evoluções temporais das massas das amostras de peito de frango cozidos, para diferentes taxas de redução de pressão, definidas pela variável $Y$ .....	43
Figura 19 – Valores experimentais do produto $kS$ para diferentes volumes de amostras de peito de frango cozido .....	45
Figura 20 – Valores experimentais do produto $kS$ para diferentes volumes de amostras de lombo bovino cozido .....	46
Figura 21 – Valores experimentais do produto $kS$ para diferentes volumes de amostras de lombo suíno cozido .....	46
Figura 22 – Valores experimentais do produto $kS$ para diferentes volumes de amostras de filé suíno cozido .....	47
Figura 23 – Retas de regressão linear do produto $kS$ para diferentes volumes de amostras dos quatro tipos de cortes de carnes cozidos avaliados .....	48
Figura 24 – Detalhe do interior de amostras de cortes de carne cozidos, após o resfriamento a vácuo: (a) lombo bovino e (b) peito de frango .....	49
Figura 25 – Valores experimentais do produto $kS$ para diferentes volumes de amostras de areia com 10% e 20% de umidade inicial .....	49
Figura 26 – Esquema ilustrativo da evaporação da água durante o resfriamento a vácuo de um material poroso esférico .....	51
Figura 27 – Algoritmo utilizado para o cálculo das evoluções temporais da massa, das diferenças de pressão e do produto $kS$ de peitos de frango cozidos resfriados a vácuo .....	51
Figura 28 – Resultados das simulações numéricas das evoluções temporais da massa da amostra, da diferença $(P - P_{\text{sat}})$ e do produto $kS$ no resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango cozidos (valores adimensionais) .....	52
Figura 29 – Perfil de temperatura para quatro experimentos com mexilhões realizados com o sistema com a bomba de vácuo (curva de vácuo 1) .....	53
Figura 30 – Perfil de temperatura para quatro experimentos com mexilhões realizados com o sistema com a bomba de vácuo (curva de vácuo 2) .....	54

Figura 31 – Calores específicos da carne e da concha do mexilhão <i>Perna perna</i> cozido, para diferentes temperaturas .....	55
Figura 32 – Comparação das evoluções temporais da temperatura da carne e da concha de mexilhões resfriados a vácuo (curva de vácuo 1) .....	56
Figura 33 – Perfil de temperatura para três experimentos realizados com o sistema de resfriamento com ejetores de água (A e B: mexilhões monitorados) ...	57
Figura 34 – Perfil de temperatura para um experimento realizado na câmara de resfriamento ILKA, monitorando a temperatura de mexilhões de três regiões: topo, meio e fundo do recipiente .....	58
Figura 35 – Perfil médio de temperatura para os três experimentos de resfriamento a vácuo avaliados .....	59
Figura 36 – Curva de calibração do termopar AI0 .....	72
Figura 37 – Curva de calibração do termopar AI1 .....	72
Figura 38 – Curva de calibração do termopar AI2 .....	73
Figura 39 – Curva de calibração do termopar AI3 .....	73
Figura 40 – Curva de calibração do termopar AI4 .....	74

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades do vapor de água sob diferentes pressões .....	7
Tabela 2 – Taxas de redução de pressão utilizadas nos experimentos .....	28
Tabela 3 – Dimensões das amostras de carne utilizadas nos experimentos .....	29
Tabela 4 – Perdas de massa encontradas para os diferentes valores da variável $Y$ ( $P = P_i \cdot e^{-Yt}$ ) – Valores experimentais .....	37
Tabela 5 – Perdas de massa encontradas para os diferentes valores da variável $Y$ – Valores experimentais e teóricos (Equação 1) .....	39
Tabela 6 – Variação média de temperatura para diferentes taxas de redução de pressão .....	42
Tabela 7 – Perdas de massa encontradas para os diferentes valores da variável $Y$ – Valores experimentais e teóricos (Simulação numérica) .....	44
Tabela 8 – Influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a vácuo – Comparação com a literatura .....	44

## RESUMO

O resfriamento a vácuo é considerado um método de resfriamento rápido, sendo largamente aplicado em vegetais folhosos, além de ser também empregado para o pré-resfriamento de flores após a colheita. O resfriamento é obtido pela evaporação da água do próprio produto, quando este é submetido a uma baixa pressão em uma câmara hermética. Um dispositivo experimental foi montado para a realização deste trabalho e a aplicação da técnica de resfriamento a vácuo foi avaliada através da realização de três estudos. A influência da taxa de redução de pressão durante o resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos foi investigada no primeiro estudo. Através do controle da taxa de evacuação da câmara de vácuo, por um dispositivo de vazamentos calibrados, a perda de massa foi reduzida em 1,11%. Quando comparado com outros processos de resfriamento a vácuo, onde o controle da taxa de evacuação foi efetuado, o resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos mostrou ser a aplicação mais eficiente quanto à relação decréscimo de temperatura por perda percentual de massa. No segundo estudo foram realizados experimentos com diferentes cortes de carne pré-cozidos, obtendo-se dados que foram utilizados para determinar correlações empíricas entre o produto do coeficiente de transferência de massa e da área total de transferência de massa ( $kS$ ) com o volume das amostras avaliadas. Os resultados indicaram que a evaporação da água pode ocorrer em todo o volume das amostras, o que é fundamental para a obtenção de resfriamentos homogêneos. A aplicabilidade da técnica para o resfriamento de mexilhões após a etapa de cozimento foi avaliada no terceiro estudo. Os experimentos foram realizados em três diferentes sistemas de resfriamento. Os mexilhões pré-cozidos puderam ser resfriados de 90 a 40°C em menos de dois minutos. Além disso, os processos de cozimento e de resfriamento podem ser realizados em uma mesma câmara, reduzindo a manipulação do produto. Assim, o resfriamento a vácuo de cortes de carnes cozidos é uma alternativa viável de aplicação industrial, mas que deve ser acompanhada de análises sensoriais do produto resfriado, pois modificações de textura e suculência das carnes foram evidenciadas.

*Palavras-chave:* resfriamento a vácuo, carne, mexilhão, transferência de massa

## ABSTRACT

Vacuum cooling is considered a method of fast cooling, being widely applied for leafy vegetables, besides also being used for the precooling of flowers after harvest. Cooling is obtained by the evaporation of the water from the product itself, when it is submitted to a low pressure in an air-tight chamber. An experimental device was constructed for the accomplishment of this work and the application of the vacuum cooling technique was evaluated through three studies. The influence of the pressure reduction rate during the vacuum cooling of cooked cuts of chicken was investigated in the first study. Through the control of the evacuation rate of the vacuum chamber, by a device of calibrated leaks, the mass loss was reduced by 1,11%. When compared with other processes of vacuum cooling, where the control of the evacuation rate was effected, the vacuum cooling of cooked cuts of chicken revealed this to be the most efficient application when the relation of the decrease of temperature for the percentile loss of mass was compared. In the second study, experiments with different precooked cuts of meat were made, obtaining data which was used to determine empirical correlations between the product of the mass transfer coefficient and the mass transfer surface ( $kS$ ) with the volume of the evaluated samples. The results had indicated that the evaporation of water can occur in all volume of the samples, which is basic for the attainment of homogeneous coolings. The applicability of the technique for mussel cooling after the stage of cooking was evaluated in the third study. The experiments had been carried out in three different cooling systems. The precooked mussels were cooled from 90 to 40°C in less than two minutes. Moreover, the cooking and cooling processes can be carried out in the same chamber, reducing the manipulation of the product. Thus, the vacuum cooling of cooked cuts of meat is a viable alternative for industrial application, but it must be followed by sensorial analyses of the cooled product, because texture and juiciness changes on the meats had been observed.

*Keywords:* vacuum cooling, meat, mussel, mass transfer

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento pelo frio artificial constitui a técnica mais generalizada de conservação de carnes, quer preservando-as como recurso estacional, quer garantindo o seu transporte à distância ou possibilitando o seu uso para a industrialização ou para o consumo (PARDI et al., 2001). A diminuição da temperatura aos níveis compatíveis, atuando na inibição ou destruição de microrganismos de deterioração e no retardamento das atividades enzimáticas aumenta o prazo de vida comercial das carnes.

A utilização de cortes de carnes cozidos para a elaboração de produtos com um alto valor agregado (pratos prontos) deve ser vinculada a processos de fabricação eficientes e seguros, em relação às qualidades sensorial e microbiológica dos produtos. A indústria de processamento de carnes necessita resfriar rápida e homogênea os cortes de carne que são submetidos a processamentos térmicos, como o cozimento. As técnicas mais utilizadas são o resfriamento com ar frio e a aspensão ou imersão dos cortes cozidos em água (MC DONALD, SUN e KENNY, 2000). O resfriamento a vácuo é uma alternativa que vem sendo estudada para a aplicação do resfriamento de cortes de carne cozidos, pois se trata de um método rápido de resfriamento.

O resfriamento a vácuo é obtido através da remoção de calor do próprio produto, pela evaporação da água da sua superfície e dos poros conectados a ela (MC DONALD e SUN, 2000). A evaporação da água é realizada com a diminuição da pressão do interior de uma câmara, onde o produto é acondicionado. Esta técnica é freqüentemente utilizada para o resfriamento de hortaliças folhosas como alfaces, de cogumelos e de flores após a colheita.

Diversos estudos vêm sendo conduzidos com o objetivo de otimizar a aplicação da técnica de resfriamento a vácuo para o resfriamento de cortes de carnes após o cozimento (DESMOND, KENNY e SUN, 2000). A maior parte destas pesquisas vem procurando reduzir a perda de massa do produto (água evaporada), fator que muitas vezes pode comprometer a qualidade sensorial do mesmo (diminuição de textura e suculência).

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo do resfriamento a vácuo de cortes de carne pré-cozidos. Os objetivos específicos foram:

- montagem de um dispositivo experimental para o estudo de parâmetros importantes no resfriamento a vácuo de cortes de carne cozidos;
- avaliação da influência da taxa de redução de pressão (curva de vácuo) durante o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango cozidos;
- determinação do comportamento do coeficiente de transferência de massa de diferentes cortes de carne pré-cozidos, resfriados a vácuo, para diferentes volumes de amostras;
- avaliação da aplicação do resfriamento a vácuo para mexilhões pré-cozidos, através do uso de diferentes sistemas experimentais.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo está dividido em tópicos. No primeiro, é apresentado um breve histórico da utilização do frio, onde é enfocada a sua importância para a conservação dos alimentos, dentre eles os cortes de carne pré-cozidos.

O segundo tópico aborda a técnica de resfriamento a vácuo, suas vantagens e desvantagens. No terceiro tópico são relatadas as principais aplicações da técnica, com ênfase nas recentes pesquisas envolvendo o resfriamento de carnes e produtos cárneos após o cozimento.

No quarto tópico é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a baixas pressões, o desenvolvimento de modelos matemáticos para a melhor compreensão da técnica e a aplicação do resfriamento a vácuo em peixes e frutos do mar, particularmente em mexilhões cozidos.

### **2.1 O uso do frio**

Desde o início da humanidade, nossos remotos antepassados observaram que os alimentos que colhiam, caçavam ou pescavam eram mantidos aptos ao consumo por um maior tempo no inverno que no verão. Os antigos egípcios foram os primeiros a observar sistematicamente como a evaporação de um líquido resfria a sua vizinhança e, em particular, a si próprio. Tal fato era baseado no uso de moringas de cerâmica porosa para resfriar água, vinho ou cerveja e também na

circulação de ar ambiente sobre grandes vasos de água, para condicionar o interior das residências da alta nobreza (SARLÉ, 1999).

Os chineses utilizavam a neve para o resfriamento de bebidas, enquanto os romanos a armazenavam em cavernas para utilizá-la nos meses quentes. Mas em 1799, ocorreu um fato que impressionou o mundo e animou cientistas e pesquisadores a estudar a fundo um modo de produzir o frio artificial: a descoberta de um mamute, perfeitamente conservado nas neves perpétuas da foz do rio Lena, na Sibéria (SARLÉ, 1999). Logo foram produzidos alguns avanços científicos, em geral pouco difundidos e sem aplicações socialmente relevantes.

A primeira máquina de aplicação, verdadeiramente prática para a obtenção do frio (mediante um sistema de absorção) foi construída e patenteada por Ferdinand Carré em 1857. Em 1874, Charles Tellier, considerado o “pai do frio”, construiu o primeiro “armário conservador”, baseado em uma máquina de compressão mecânica com éter metílico. Porém, apenas dez anos mais tarde, Carré alcançou a sua maior meta: transportou, dos Estados Unidos à França, 80 toneladas de carne congelada, a  $-30^{\circ}\text{C}$ , utilizando uma máquina frigorífica de absorção à base de amoníaco (SARLÉ, 1999).

A generalização do uso do frio trouxe grandes benefícios à economia de muitas áreas agrícolas, permitindo que estas aumentassem suas produções e chegassem até os mercados urbanos e mundiais. Em 1916, são publicados os primeiros resultados referentes ao congelamento de pescados e nos anos 20 são comercializados nos Estados Unidos os primeiros alimentos congelados em porções individuais (SARLÉ, 1999). Desde então, as inovações e os avanços tecnológicos têm sido constantes, seja generalizando o uso do frio ou descobrindo-se novos métodos para a sua produção.

### **2.1.1 A influência da temperatura sobre os alimentos**

A refrigeração é uma operação unitária em que através da redução da temperatura de um alimento é possível reduzir a velocidade das transformações

microbiológicas e bioquímicas no mesmo, prolongando assim a sua vida útil (TOLEDO, 1991). Neste sentido, a refrigeração evita o crescimento de microrganismos termófilos (temperatura ótima de crescimento de 45 a 65°C) e de muitos mesófilos (temperatura ótima de crescimento de 25 a 40°C), dependendo da temperatura final atingida pelos produtos (FRANCO e LANDGRAF, 1996).

No caso dos vegetais, a refrigeração permite reduzir a velocidade de certos processos fisiológicos (como a respiração, a transpiração e o amadurecimento de frutas), aumentando assim o período de armazenamento destes produtos, com uma intensidade e amplitude característica para cada um deles (TOLEDO, 1991). Nos tecidos animais, além de reduzir o risco de contaminação microbiológica, o uso imediato do frio é indicado para retardar alterações físicas, como o *rigor mortis*, que alteram características sensoriais da carne (cor e textura) (WARRISS, 2000). Em certos processos de conservação de alimentos, é comum combinar a refrigeração com outras operações, como a fermentação e a pasteurização. O objetivo é o de prolongar a vida útil daqueles produtos que foram submetidos a tratamentos de conservação pouco severos (SARLÉ, 1999).

### **2.1.2 Resfriamento de carnes cozidas**

A qualidade de cortes de carne cozidos é importante não apenas para os consumidores finais, mas também para as indústrias que os utilizam como matéria-prima. As tecnologias de processamento deste tipo de alimento devem ser constantemente otimizadas em função da procura dos consumidores por qualidade, por segurança e por uma maior variedade de produtos. O sistema de resfriamento empregado em qualquer operação envolvendo alimentos perecíveis é muitas vezes considerado um ponto crítico de controle destas indústrias, pois está diretamente ligado à segurança microbiológica deste tipo de alimento (FRANCO e LANDGRAF, 1996).

Em muitas unidades processadoras, após os cortes de carne serem submetidos ao cozimento e posterior resfriamento, estes podem ser utilizados como matéria-prima para a elaboração de pratos prontos pela própria indústria, fornecidos

a cozinhas industriais e bufês, ou comercializados no varejo. A maior parte dos cortes de carnes cozidos é resfriada através de câmaras com circulação de ar forçada e de túneis de resfriamento (SUN e WANG, 2000). A imersão em água pode ser utilizada para este tipo de produto apenas quando o mesmo estiver embalado, para evitar o risco de contaminação microbológica. Esta prática é largamente utilizada para o resfriamento de produtos cárneos (presunto cozido) (SUN e WANG, 2000) ou de vegetais (cenouras) (MC DONALD, SUN e KENNY, 2000). No entanto, a necessidade de rápidos tempos de resfriamento, imediatamente após o cozimento, vem fazendo com que novas tecnologias estejam sendo propostas e avaliadas. Uma destas novas técnicas é o resfriamento a vácuo.

## **2.2 O resfriamento a vácuo**

O resfriamento a vácuo é um processo em batelada, onde produtos contendo água livre são resfriados pela evaporação desta sob baixas pressões (MC DONALD e SUN, 2000). A temperatura de ebulição da água varia em função da sua pressão de saturação, como é mostrado na Tabela 1. Para uma temperatura de 0°C, a pressão de saturação é aproximadamente igual a 5 mmHg. Com a redução da pressão na câmara de resfriamento, a água evapora, sendo a energia necessária para evaporá-la fornecida pelo próprio produto, que se resfria. Em outras palavras, a diferença entre a pressão de vapor da água no produto e a pressão da câmara causa uma vaporização de água para a atmosfera, reduzindo assim o calor sensível do produto (MC DONALD e SUN, 2000).

Antes da temperatura de saturação ter sido atingida, a ação da bomba de vácuo serve apenas para evacuar o ar do interior da câmara (quando o resfriamento é praticamente inexistente). Portanto, é necessário reduzir a pressão na câmara de vácuo até o ponto “flash” o mais rapidamente. 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 (MC DONALD e SUN, 2000).

Tabela 1 – Propriedades do vapor da água sob diferentes pressões  
(GEANKOPLIS, 1993).

Pressão de Vapor (mmHg)	Temperatura de Ebulição (°C)	Entalpia de Vaporização (kJ/kg)	Volume específico do vapor (m <sup>3</sup> /kg)
760,00	100	2257,06	1,67
355,45	80	2308,79	3,41
92,62	50	2382,77	12,03
23,77	25	2442,31	43,36
7,01	6	2487,20	137,73
4,58	0,01	2501,40	206,13

A quantidade de água evaporada do produto (perda de massa) durante o resfriamento a vácuo é dada pela Equação 1 (WANG e SUN, 2001):

$$\Delta m_w = \frac{cm_p \Delta T}{\Delta \hat{H}_v} \quad (1)$$

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

O vapor de água retirado do produto deve ser removido da linha de bombeamento, evitando que este atinja a bomba de vácuo. Mas a principal razão para eliminá-lo é o seu elevado volume específico a baixas pressões, como mostrado na Tabela 1. Em sistemas industriais de resfriamento a vácuo, é necessária a utilização de um sistema auxiliar de refrigeração, para condensar e remover este vapor.

Os sistemas de condensação em escala industrial podem utilizar refrigeração indireta com circulação de etileno glicol (CORTEZ, NEVES FILHO e CARDOSO, 2000), com desumidificadores por adsorção (AFONSO, 2000), com serpentinas de condensação ou por meio de condensadores barométricos (MC DONALD e SUN, 2000). Em resfriadores de menor porte, que possuem a característica de serem móveis (reboques) quando necessário, pode ser utilizado gelo para a condensação do vapor de água (AFONSO, 2000).

Um típico sistema de resfriamento a vácuo é ilustrado na Figura 1. Este sistema consiste basicamente em dois componentes: uma câmara de vácuo e um sistema de bombeamento (MC DONALD e SUN, 2000). A câmara de vácuo, que normalmente é horizontal e em formato cilíndrico ou retangular, deve possuir espaço adequado para a acomodação dos produtos. Durante o processo de resfriamento, a porta da câmara deve ser hermeticamente fechada e qualquer tipo de vazamento, que permita a entrada de ar no sistema, irá comprometer a eficiência da técnica. O sistema de bombeamento deve possuir dois elementos, que são 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 a pressão de saturação na temperatura inicial do produto. As bombas rotativas com óleo são as mais utilizadas para o resfriamento a vácuo (MC DONALD e SUN, 2000). A vazão de bombeamento necessária para a aplicação da técnica pode ser obtida de um balanço de massa em regime transiente na câmara de vácuo, ou seja:

$$-Q\rho_{ar} = \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

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

Considerando o ar da câmara como um gás ideal, tem-se que:

$$\rho_{ar} = \frac{PM}{RT} \quad (3)$$

e substituindo a Equação (3) em (2):

$$-Q \frac{PM}{RT} = \frac{d\left(\frac{PM}{RT}V\right)}{dt} \quad (4)$$

$$-\frac{Q}{V} \int_0^t dt = \int_{P_0}^{P_{fp}} \frac{dP}{P} \quad (5)$$

$$Q = \frac{V}{t} \ln \frac{P_0}{P_{fp}} \quad (6)$$

onde  $Q$  é vazão de bombeamento ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),  $V$  é o volume livre da câmara de vácuo ( $\text{m}^3$ ),  $t$  é o tempo de bombeamento (h),  $P_0$  é a pressão inicial (atmosférica) (mmHg) e  $P_{fp}$  é a pressão no ponto “flash” (mmHg). Para atingir maiores taxas de bombeamento, associações de bombas de vácuo em paralelo podem ser utilizadas.

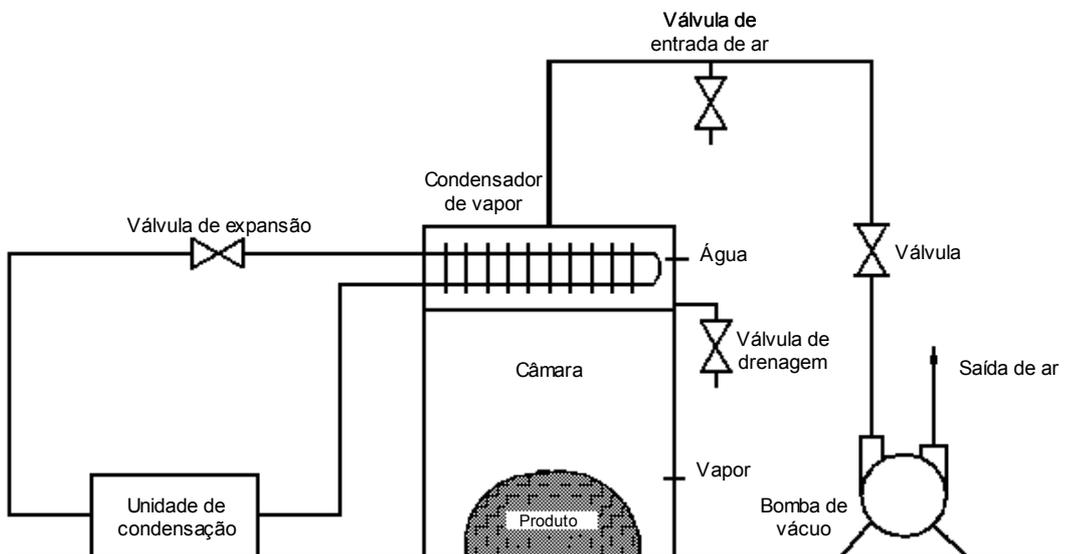


Figura 1 – Sistema básico de resfriamento a vácuo (WANG e SUN, 2001).

### 2.2.1 Vantagens e desvantagens do resfriamento a vácuo

A maior vantagem do resfriamento a vácuo sobre as outras técnicas de resfriamento é o curto tempo requerido para resfriar o produto. Na Figura 2 são comparados os decréscimos de temperatura de cortes de carne cozidos, submetidos a diferentes tipos de resfriamento. O tempo de resfriamento depende da relação da área superficial pelo volume do produto, da facilidade com que a água é retirada do mesmo e da taxa de bombeamento (MC DONALD e SUN, 2000). Destas, a vazão de evacuação é a única que pode ser controlada, seja pela potência de diferentes bombas ou pela associação em paralelo destas.

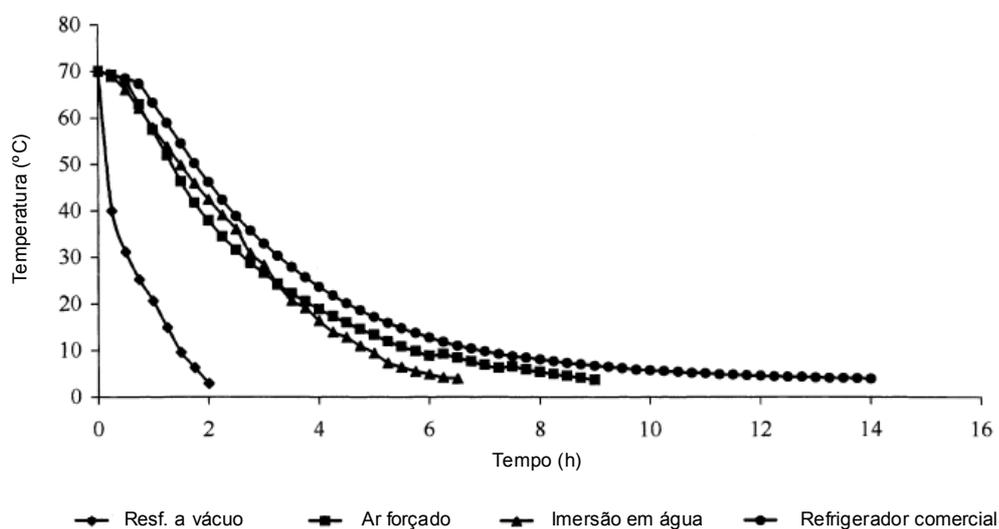


Figura 2 – Curvas de resfriamento para cortes de carne cozidos (4-5 kg), resfriados por diferentes métodos (MC DONALD e SUN, 2000).

Outra vantagem é que o resfriamento a vácuo é um processo estático, não provocando danos mecânicos (escoriações ou atritos) no produto, como pode ocorrer em outros métodos de resfriamento. Os produtos podem também ser resfriados na sua embalagem de comercialização, desde que providas de pequenos orifícios para saída do vapor produzido, pois a uniformidade do resfriamento não depende de seu arranjo na câmara (MC DONALD e SUN, 2000). Processos como cozimento e posterior resfriamento a vácuo podem ser realizados em um mesmo equipamento, evitando assim a manipulação do produto e o uso de água de resfriamento, além de diminuir o tempo de processamento (SELF et al., 1990).

Diversos estudos comprovaram aumentos significativos na vida útil de produtos resfriados rapidamente, imediatamente após a sua elaboração (MC DONALD e SUN, 2000).

A maioria dos equipamentos de resfriamento a vácuo opera em batelada, o que é uma limitação da técnica. Em alguns casos, torna-se necessário manter os produtos resfriados utilizando o próprio equipamento de resfriamento e, neste caso o tempo de espera pode ser grande. Porém, estudos recentes vêm tentando tornar o resfriamento a vácuo um processo contínuo. Os produtos a serem resfriados são acondicionados em *containers*, destinados a conservá-los a baixas temperaturas. Os *containers* são inseridos sucessivamente em um túnel cilíndrico para a aplicação do resfriamento a vácuo. O nível de vácuo nos *containers* é então aumentado, através de sucção por vários orifícios existentes nos mesmos, resfriando o produto (MC DONALD e SUN, 2000). Desta forma, uma maior quantidade de produto pode ser resfriada simultaneamente.

A maior desvantagem do resfriamento a vácuo é a perda de massa através da evaporação de água. A perda de massa é uma inevitável consequência do resfriamento a vácuo e está diretamente relacionada com a redução de temperatura e com o calor específico do produto, conforme a Equação 1. A área superficial disponível para a transferência de massa também possui influência na quantidade de água evaporada de um alimento. Aumentando-se esta área, a remoção de água é facilitada e conseqüentemente aumenta-se a perda de massa (WANG e SUN, 2001). Porém, a evaporação de água ocorre de uma maneira uniforme em todo o produto, e não apenas em regiões isoladas. Alguns procedimentos disponíveis são utilizados para prevenir a perda de massa, como a aspensão de água durante o resfriamento (Sistema *Hydro Vac*) (CORTEZ, NEVES FILHO e CARDOSO, 2000). Além de minimizar a perda de massa, a aspensão de água pode auxiliar em um resfriamento mais rápido. A umidificação do produto deve ser feita de forma uniforme em sua superfície, de forma que durante o resfriamento não haja locais preferenciais de evaporação e riscos de manchas localizadas no produto.

O custo dos equipamentos envolvidos no resfriamento a vácuo é elevado, restringindo a sua aplicação para muitos tipos de produtos. No entanto, este custo é

comparável com o de outros processos de resfriamento, mesmo com um investimento inicial elevado (MC DONALD e SUN, 2000). O consumo de energia no resfriamento a vácuo foi avaliado como sendo muito menor que outros métodos de resfriamento, com elevados coeficientes de energia (calor sensível / energia elétrica requerida), conforme apresentado na Figura 3.

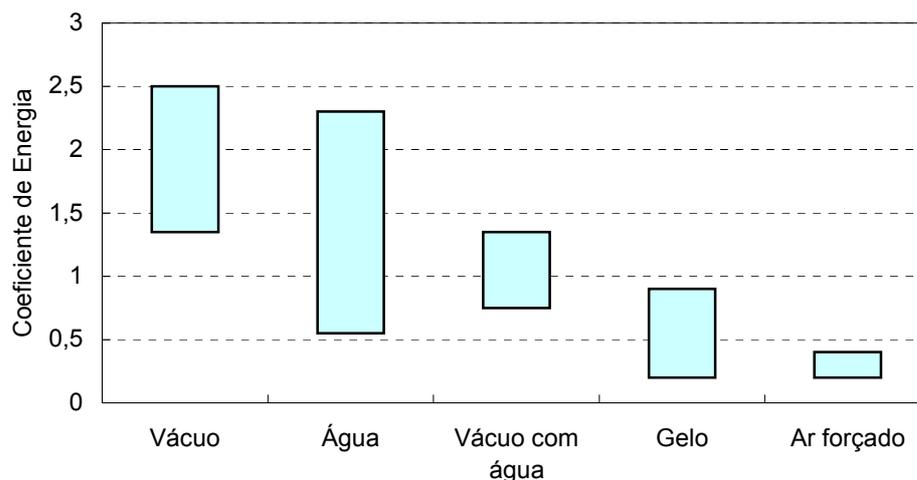


Figura 3 – Energia requerida por diferentes resfriadores (KADER, 1992).

### 2.3 Aplicações do resfriamento a vácuo

O resfriamento a vácuo foi inicialmente utilizado em 1948, quando 34 vagões de alface foram resfriados por este método em Salinas, Califórnia. As vantagens desta técnica foram tão evidentes que a partir de 1954, entre 40 e 85% da alface da Califórnia e do Arizona foram refrigerados a vácuo para depois, rapidamente, atingir 100% do produto comercializado. Hoje, na América do Norte, há locação e venda de equipamentos portáteis a vácuo, inclusive com sistemas de umidificação (CORTEZ, NEVES FILHO e CARDOSO, 2000).

A maior aplicação da técnica de resfriamento a vácuo é para vegetais, como hortaliças folhosas, legumes e frutas (MC DONALD e SUN, 2000). Quanto mais rapidamente a temperatura destes produtos for reduzida até a temperatura de armazenamento, maior será a vida pós-colheita dos mesmos (JOBLING, 2001). De

forma geral pode-se considerar que a cada 10°C na redução de temperatura, ter-se-á uma atividade respiratória de duas a quatro vezes menor (CORTEZ, NEVES FILHO e CARDOSO, 2000). Portanto, o resfriamento a vácuo é empregado como uma técnica de resfriamento rápido, que visa a rápida remoção do “calor de campo” de produtos agrícolas perecíveis. Sua aplicação ocorre antes que eles sejam transportados por longas distâncias ou armazenados. As hortaliças folhosas possuem uma alta relação entre a área superficial e o volume, logo são perfeitamente adequadas a este tipo de processo (GAST e FLORES, 1991; HAAS e GUR, 1987; RENNIE et al., 2002; SUSLOW, 2000; TAMBUNAN, SAGARA e SEO, 2000).

Alfaces estocadas à temperatura ambiente normalmente possuem uma vida útil de 3 a 5 dias. No entanto, estocadas a 1°C com UR de 90% esta vida útil pode aumentar para até 14 dias (ARTÉS e MARTÍNEZ, 1996). Utilizando o resfriamento a vácuo, vegetais como a alface podem ser resfriados de 25°C (temperatura ambiente) para 1°C em menos de 30 minutos (JACKSON et al., 1996; MC DONALD e SUN, 2000; RENNIE et al., 2001). O resfriamento a vácuo é o método comercial padrão utilizado para alface em muitos países europeus, assim como nos Estados Unidos (SANDERS, 2001). É empregado geralmente antes da etapa de embalagem em filmes de PVC ou após a embalagem em sacos perfurados de polipropileno (ARTÉS e MARTÍNEZ, 1996; MARTÍNEZ e ARTÉS, 1999). AFONSO (2000) avaliou a perda de massa durante o resfriamento a vácuo de alfaces com e sem pré-umidificação. Os resultados obtidos foram perdas de massa de 4,5% para alfaces sem pré-umidificação e 1,7% para as pré-umidificadas.

A técnica do resfriamento a vácuo é também aplicada para outros tipos de vegetais como couve-flor (SARGENT, 1999), pimentas (MAYBERRY, 2000), milho doce (KEMBLE e DANGLER, 2001), cebolas (SHANMUGASUNDARAM e KALB, 2001), brotos de feijão (DE ELL et al., 2002) e cenouras (ZHANG e SUN, 2003). Frutas, como morango, groselha, e melão, e legumes, como repolho, nabo, berinjela e pepino, também já foram objetos de estudo para a aplicação do resfriamento a vácuo (MC DONALD e SUN, 2000). DECKER (1990) 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.

Uma outra aplicação do resfriamento a vácuo é para cogumelos, pois além de possuírem cerca de 90% de água, a estrutura porosa dos mesmos permite que esta umidade seja removida com facilidade. Por este motivo, a técnica de resfriamento a vácuo tem sido adotada comercialmente nos Estados Unidos, na Inglaterra e em outras regiões da Europa (MC DONALD e SUN, 2000). Os efeitos do resfriamento a vácuo em cogumelos, foram investigados por BURTON, FROST e ATKEY (1987), onde as baixas pressões aplicadas nos experimentos não provocaram alterações na qualidade (coloração), porém elevada perda de massa.

Dentre os outros tipos de alimentos para os quais o resfriamento a vácuo tem sido estudado como técnica de resfriamento rápido, encontram-se produtos da indústria de panificação, como panetones, tortas salgadas e algumas variedades de pães. Segundo MC DONALD e SUN (2000), o resfriamento a vácuo de produtos de panificação tipicamente varre uma faixa de resfriamento de 98-30°C, resultando em perdas de peso próximas de 7,0%. O resfriamento a vácuo de molhos a base de carne, sopas e alguns tipos de pratos prontos também é relatado na literatura (MC DONALD e SUN, 2000).

Algumas variedades de folhagens e flores recém colhidas também podem ser resfriadas com a aplicação do vácuo. A “vida de vaso” de narcisos resfriados a vácuo imediatamente após a colheita foi avaliada por SUN e BROSNAN (1999). O tempo médio para a temperatura ambiente ser reduzida até 2°C foi de 65 segundos, enquanto que a vida útil das flores foi estendida de 3 para 4 dias. Utilizando aspersão de água antes do processo, o tempo de resfriamento foi reduzido para 40 segundos, e a perda de massa de 3% para 1,5%. Outros estudos concluíram que a aspersão de água antes do resfriamento a vácuo de lírios reduziu os percentuais de perda de massa de 5,4% para até 0%, porém não teve efeito na vida útil destas plantas (BROSNAN e SUN, 2001).

### 2.3.1 Resfriamento a vácuo de cortes de carnes cozidos

Diversos estudos vêm sendo conduzidos sobre a aplicação do resfriamento a vácuo em carnes e produtos cárneos cozidos (MC DONALD, SUN e KENNY, 2000; SUN e WANG, 2003; WANG e SUN, 2003). Trabalhos publicados têm relatado resultados da comparação do resfriamento a vácuo com outros métodos de resfriamento, concluindo que o resfriamento a vácuo é a técnica mais rápida para a redução de temperatura de presuntos e grandes peças de carne cozida (*meat joints*) (DESMOND et al., 2000; MC DONALD, SUN e KENNY, 2000). SUN e WANG (2000) mostraram que amostras de carne cozida, com aproximadamente 7 kg, tiveram a temperatura central reduzida de 70°C para 10°C em apenas 75 minutos. Os tempos obtidos através do resfriamento por ar forçado e imersão em água foram 570 e 465 minutos, respectivamente.

O efeito do resfriamento a vácuo sobre as propriedades termofísicas de cortes de carne cozidos também foi avaliado (MC DONALD, SUN e LYNG, 2002; SUN e MC DONALD, 2003). As amostras resfriadas a baixa pressão apresentaram valores de condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica inferiores àquelas resfriadas com ar forçado e imersão em água (MC DONALD, SUN e LYNG, 2002). Estes resultados estão diretamente relacionados à perda de água que ocorre durante o resfriamento a vácuo. O aumento da porosidade e a diminuição da densidade aparente também contribuíram para o decréscimo do valor da condutividade térmica.

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; MC DONALD e SUN, 2001a; MC DONALD, SUN e KENNY, 2001). Segundo MC DONALD, SUN e KENNY (2001), um aumento de 10% no nível de injeção de salmoura em amostras de carne bovina *in natura*, resultou num produto resfriado a vácuo com as mesmas características de um resfriado através de imersão em água. No entanto, os ingredientes da salmoura, particularmente o sal e o polifosfato de sódio, devem ser rigorosamente monitorados para prevenir resultados indesejáveis na qualidade sensorial do produto final. DESMOND, KENNY e WARD (2002) concluíram que um aumento no nível de injeção de salmoura em cortes de

carne suína, de 20% para 30%, resultou em um rendimento final do produto resfriado a vácuo, semelhante àqueles com 20% de salmoura, resfriados pelo método convencional.

HOUSKA et al. (2003b) realizaram estudos aplicando a técnica de resfriamento a vácuo em cortes cozidos de carne bovina (*cooked beef*) imersos em molho. Os resultados demonstraram que houve uma penetração do molho nos poros da carne ao final dos experimentos, quando a bomba de vácuo foi desligada e o ar ocupou lentamente o interior da câmara de resfriamento. Em alguns casos foi observado um aumento da massa das amostras, ao contrário da perda de água naturalmente provocada pelo processo. Este efeito pode ser utilizado como prática comercial para aromatização de cortes de carne através da impregnação de diferentes molhos (HOUSKA et al., 2003a).

## **2.4 Estudos específicos envolvendo a técnica do resfriamento a vácuo**

### **2.4.1 Influência da taxa de redução de pressão**

Poucos trabalhos têm sido publicados sobre os efeitos da taxa de redução de pressão (curva de vácuo) na perda de massa, na velocidade de resfriamento e na qualidade de produtos resfriados a vácuo. Na indústria de panificação, o resfriamento a vácuo modulado (com controle da taxa de redução de pressão) tem sido utilizado para garantir a qualidade dos produtos (BRADSHAW, 1979). RENNIE et al. (2001) avaliaram os efeitos de diferentes taxas de redução de pressão na qualidade de alfaces resfriadas a vácuo. Os resultados obtidos para a perda de massa e qualidade das alfaces, avaliada por fluorescência de clorofila, não apresentaram diferenças para as três taxas de redução aplicadas. BROSANAN e SUN (2003) realizaram um estudo semelhante para o resfriamento a vácuo de lírios pós-colheita. Quatro diferentes taxas de redução de pressão foram analisadas e os resultados mostraram um aumento da perda de massa com o aumento da taxa de evacuação da câmara. Não foram encontradas diferenças significativas para os resultados de temperatura final do produto e vida de vaso das flores.

O efeito da pressão de cozimento e da taxa de redução de pressão sobre a qualidade e rendimento de cortes de frango resfriados a vácuo foi estudado por SELF et al. (1990). Os resultados de perda de massa provocada pelo resfriamento a vácuo não são indicados, porém foi relatado que as pressões de cozimento e de resfriamento não afetaram a maciez da carne de frango. MC DONALD e SUN (2001b) avaliaram o efeito de seis diferentes taxas de redução de pressão no percentual de perda de massa, na velocidade de resfriamento e no rendimento final de cortes de carne bovina pré-cozidos resfriados a vácuo. A taxa de evacuação teve um efeito significativo na perda de água e no rendimento final do produto, com a menor taxa de redução de pressão apresentando a menor perda de massa. No entanto, na medida em que houve um aumento da taxa de evacuação, houve um decréscimo do tempo de resfriamento de até 50 minutos.

#### **2.4.2 Desenvolvimento de modelos matemáticos**

Recentes estudos têm mostrado o interesse na modelagem matemática do processo de resfriamento a vácuo. A predição da temperatura de alimentos líquidos, como sopas e molhos, durante o resfriamento a vácuo tem sido o principal objetivo de algumas destas pesquisas (DOSTÁL e PETERA, 2002, 2003; HOUSKA et al., 1996). Também foram desenvolvidos modelos visando descrever o sistema de resfriamento a vácuo (redução de pressão) e os processos simultâneos de transferência de calor e de massa em cortes de carne pré-cozidos (WANG e SUN, 2002a, b, c).

HE e LI (2003) desenvolveram um algoritmo computacional para estimar os históricos da temperatura e da massa de alimentos esféricos durante o ciclo de resfriamento a vácuo. Através desta simulação, as variáveis como as mudanças temporais de pressão, temperatura e massa do alimento podem ser preditas, tendo como parâmetros conhecidos a vazão de bombeamento, o volume da câmara, as temperaturas iniciais do produto e do ar e o coeficiente de transferência de massa. Simulações numéricas utilizando códigos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) foram conduzidas por SUN e HU (2002, 2003). Os modelos foram validados através de comparação com dados experimentais do resfriamento a vácuo de cortes de carne bovina pré-cozidos (*cooked beef*).

LANDFELD et al. (2002) relataram que o processo de resfriamento a vácuo pode ser precisamente simulado e seu perfil de temperatura predito, desde que parâmetros específicos sejam conhecidos. O produto do coeficiente de transferência de massa e da superfície de transferência de massa é um destes parâmetros.

Um modelo teórico de resfriamento a vácuo de alimentos líquidos foi descrito por HOUSKA et al. (1996), que também pode ser empregado para alimentos sólidos. A taxa de resfriamento do produto ( $dT/dt$ ) pode ser calculada com base na taxa de transferência de massa ( $dm/dt$ ), segundo a Equação 7 (DOSTÁL et al., 1999):

$$\frac{dm}{dt} = kS (P - P_{sat}) \quad (7)$$

onde  $k$  é um coeficiente de evaporação (coeficiente de transferência de massa) ( $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Pa}^{-1}$ ),  $S$  é a superfície de transferência de massa ( $\text{cm}^2$ ),  $P$  é a pressão total na câmara (Pa) e  $P_{sat}$  é a pressão de saturação do vapor de água na temperatura do alimento (Pa).

Considerando-se que a evaporação da água pode ocorrer na superfície e nos poros internos conectados à superfície, a área efetiva para evaporação é proporcional ao volume do alimento ( $V$ ), ou seja:

$$S = k_s V \quad (8)$$

onde  $k_s$  é uma constante de proporcionalidade ( $\text{cm}^{-1}$ ). Assim, a Equação 7 pode ser reescrita na forma da Equação 9:

$$\frac{dm}{dt} = k k_s V (P - P_{sat}) \quad (9)$$

Segundo MC DONALD e SUN (2001a), a superfície dos poros internos é um importante parâmetro que pode controlar a eficiência do resfriamento a vácuo. Desta forma, considera-se que ocorre um fluxo de massa não apenas pela superfície

externa do alimento, mas por todos os poros distribuídos pelo volume total do produto (LANDFELD et al., 2002).

ZHANG e SUN (2003) avaliaram o resfriamento a vácuo de cenouras cozidas. Os resultados relatados mostraram que as perdas de massa de cenouras fatiadas (20,04%) foram muito superiores às de cenouras similares inteiras (12,14%). Neste caso foi verificado que, para a cenoura, a evaporação de água durante o resfriamento a vácuo ocorreu preferencialmente na superfície externa e não nos poros da mesma. LANDFELD et al. (2002) realizaram experimentos com o objetivo de determinar o produto  $kS$  de vegetais pré-cozidos, como cenoura, salsa e batata, carne suína e peito de frango. Os resultados obtidos demonstraram a falta de correlação entre  $kS$  e o volume das amostras de vegetais e também de carne suína.

#### **2.4.3 Resfriamento a vácuo de peixes e frutos do mar**

O resfriamento a vácuo tem tido aplicação limitada nas indústrias pesqueiras. Pesquisas avaliaram o uso do resfriamento a vácuo no processamento industrial de atum (MC DONALD e SUN, 2000). Normalmente, após o atum ser retirado do mar, o mesmo é imediatamente congelado em salmoura até ser transportado para a indústria de processamento. Lá, primeiramente ele é descongelado e posteriormente cozido até 65°C em vasos cilíndricos, sendo então resfriado até 35-40°C através do resfriamento a vácuo, o que resulta numa perda de massa da ordem de 3-4%.

MC DONALD e SUN (2000) relataram resultados que indicam a possibilidade da aplicação do resfriamento a vácuo para pequenos peixes ou crustáceos, como o camarão. Testes realizados para o resfriamento de filés de hadoque, mostraram perdas de massa superiores a 21%. Não foram encontradas publicações científicas sobre a aplicação do resfriamento a vácuo para mexilhões que foi um dos objetos deste estudo.

### 2.4.3.1 Cultivo e processamento de mexilhões

O cultivo de mexilhões vem crescendo significativamente no Brasil. No estado de Santa Catarina, o maior produtor nacional de mexilhões cultivados do país, a produção anual aumentou dez vezes na última década (CEPA, 2002). Dentre as espécies mais cultivadas encontra-se o mexilhão *Perna perna* (L.).

Como o restante dos moluscos bivalves, os mexilhões *Perna perna* são animais que não possuem esqueleto interno, com o corpo contido em uma concha formada por duas partes iguais (valvas) unidas medianamente por uma estrutura chamada ligamento (ANTONIOLLI, 1999). É uma espécie dióica, ou seja, com os indivíduos apresentando sexos distintos. Os machos e as fêmeas não podem ser identificados por suas características externas, mas após a abertura das conchas é possível a diferenciação devido a uma diferença de coloração das gônadas em animais sexualmente maduros. Nos machos, as gônadas apresentam coloração branco-leitosa e nas fêmeas, vermelho-alaranjado (ANTONIOLLI, 1999). Na Figura 4 estão ilustradas amostras de mexilhões *Perna perna* frescos e cozidos. Quanto à composição nutricional, os mexilhões possuem um baixo valor calórico, em comparação com outros tipos de carne, pois possuem baixos níveis de gordura (EPAGRI, 1994). Segundo a FAO (2002), a composição centesimal da carne de mexilhão cozido é: 78% de umidade, 15,9% de proteínas, 2,1% de gorduras, 2,1% de cinzas e 1,9% de carboidratos.



Figura 4 – O mexilhão *Perna perna*: (a) fresco e (b) cozido.

O método de cultivo do mexilhão *Perna perna* mais empregado no Brasil é o de estruturas flutuantes (espinhéis). Este método consiste basicamente na utilização de uma extensa corda, de comprimento inferior a cem metros, mantida na superfície com bóias, e presa nas extremidades por âncoras. Neste cabo são penduradas as cordas, com aproximadamente dois metros de comprimento, para o crescimento dos mexilhões. Esta estrutura possibilita o cultivo de mexilhões em litorais sujeitos às ações dos ventos e das ondas, pois apresenta boa adaptação às condições de mar agitado (EPAGRI, 1994). Os resultados positivos alcançados no cultivo da espécie *Perna perna*, facilitados pelas áreas protegidas na costa litorânea catarinense, vêm motivando as famílias pesqueiras e produtores na busca de novas e econômicas técnicas de conservação dos mexilhões produzidos.

Na Figura 5 é apresentado um fluxograma de alternativas para o processamento e conservação de mexilhões (EPAGRI, 1994). O tratamento térmico é sempre utilizado para a conservação dos mexilhões. Os mexilhões são tratados com vapor d'água por um tempo que varia de acordo com o tamanho dos mesmos e das condições de aquecimento. A relação entre o tempo e a temperatura para garantir a destruição das bactérias coliformes é de 4 minutos e 30 segundos, a uma temperatura de 70°C (WOOD, 1979). Após o tratamento térmico, os mexilhões são desconchados manualmente, o que requer uma temperatura inferior à 40°C. A carne cozida de mexilhão pode ser destinada à fabricação de conservas (enlatamento em salmoura) ou passar por processos de resfriamento e/ou congelamento, seguida de embalagem e comercialização.

Para facilitar o desconchamento dos mexilhões após o cozimento, duas práticas são comumente utilizadas por pequenas unidades produtoras e processadoras: aspersão ou imersão em água gelada. As duas práticas oferecem o risco da contaminação microbiológica pela água de resfriamento, além de elevar o consumo de água no processamento. A busca contínua por produtos seguros para o consumo humano exige que o resfriamento seja rápido e seja aplicado imediatamente após o cozimento. O resfriamento a vácuo é uma técnica que atende a este objetivo, pois o resfriamento pode ser realizado no mesmo recipiente de cozimento, imediatamente após essa etapa.

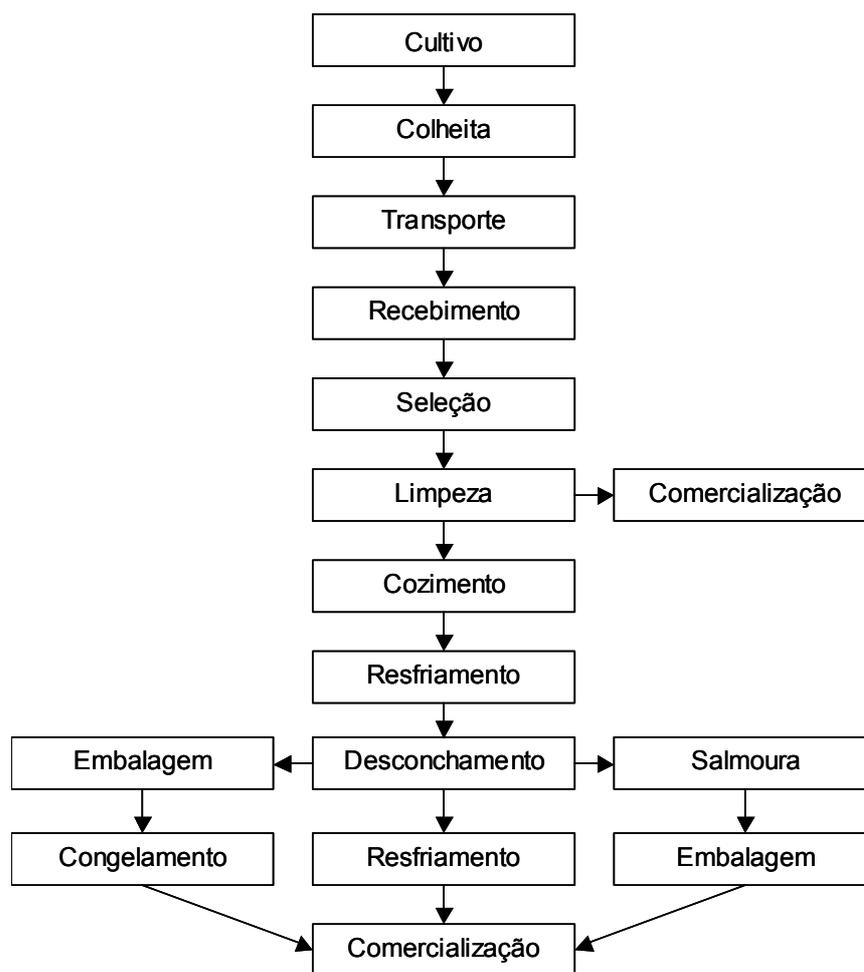


Figura 5 – Fluxograma genérico do processamento de mexilhões.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

No primeiro tópico deste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia utilizada para a montagem do dispositivo experimental de resfriamento a vácuo.

Três diferentes estudos foram realizados, procurando avaliar o comportamento de cortes de carnes cozidos submetidos ao resfriamento a vácuo. O segundo tópico descreve os procedimentos empregados para avaliar a influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos.

No terceiro tópico são descritas a preparação das amostras e a metodologia experimental utilizada para a determinação de coeficientes de evaporação, análogos a coeficientes de transferência de massa, de diferentes cortes de carne cozidos resfriados a vácuo.

A preparação das amostras e os sistemas de resfriamento a vácuo que foram utilizados para avaliar a aplicabilidade da técnica no resfriamento de mexilhões cozidos são descritos no quarto tópico.

#### **3.1 Montagem do dispositivo experimental de resfriamento a vácuo**

O dispositivo experimental de resfriamento a vácuo utilizado neste trabalho foi montado e instrumentalizado com sensores de temperatura e pressão. Também foi instalado, próximo à câmara, um sistema de aquisição de dados ligado a um microcomputador. Na Figura 6 é ilustrado um esquema simplificado do sistema experimental montado.

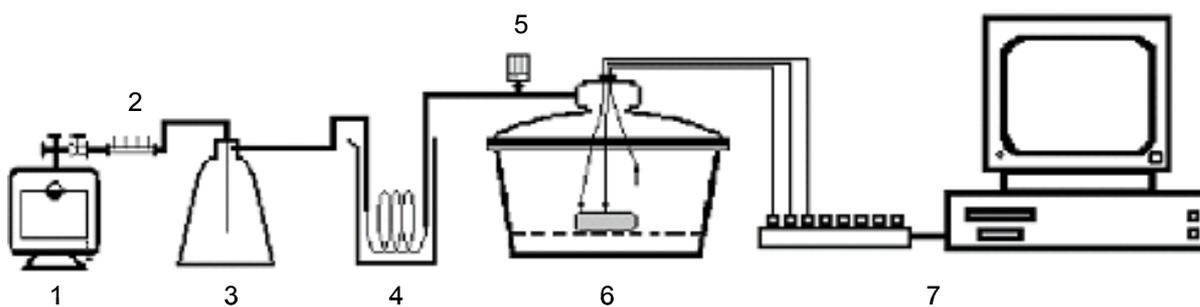


Figura 6 – Sistema experimental de resfriamento a vácuo: 1 – bomba de vácuo; 2 – dispositivo para controle da taxa de redução de pressão, com vazamentos calibrados; 3 – *trapping*; 4 – condensador; 5 – vacuômetro; 6 – câmara de vácuo com amostra e termopares; 7 – sistema de aquisição de dados e microcomputador.

Um dessecador de vidro, com volume interno de 13,35 litros, foi adaptado como câmara de resfriamento a vácuo. Um pequeno orifício foi aberto na tampa do dessecador, para a passagem dos cabos dos sensores de temperatura, o qual foi vedado com silicone. A base interna da câmara foi revestida com uma placa de poliestireno, com a finalidade de evitar trocas térmicas entre as superfícies do alimento e da câmara.

Foi utilizada uma bomba de vácuo rotativa da marca JB, modelo DV-200N, com vazão nominal, fornecida pelo fabricante, de 200 l/min. Uma serpentina de condensação, imersa em um banho com gelo, foi utilizada como desumidificador da linha de bombeamento. Um recipiente (erlenmeyer com volume de 2 litros) foi empregado como armadilha (*trapping*) de gotículas de água, evitando que as mesmas atingissem a bomba de vácuo. Os sistemas foram conectados através de mangueiras, de diâmetro interno de 10 mm, fixadas e vedadas com o auxílio de braçadeiras de metal.

O sistema de aquisição de dados foi composto por uma placa de aquisição com 12 bits de resolução e 8 canais de entrada analógica, da COMPUTER BOARDS INC., modelo CIO-DAS08/Jr-AO, remota a um microcomputador. Os sinais dos sensores de temperatura foram convertidos através de interfaces, marca COEL,

modelo AI-1002. Um aplicativo desenvolvido para o software Elipse SCADA (HMI/SCADA Software), permitiu a visualização e o registro dos dados de interesse.

Para as medidas de pressão, foi utilizado um vacuômetro (Active Linear Pirani Gauge) da marca BOC EDWARDS, modelo APGX-M-NW16 AL. Este equipamento registra pressões na faixa de 760 a 0,75 mmHg, com a calibração realizada pelo fabricante. O sensor foi interligado a um microcomputador através de uma porta serial e um programa de aquisição, desenvolvido em Delphi, permitiu o registro dos dados de pressão.

Os sensores de temperatura utilizados foram termopares tipo “T”, bitola de 2 x 24 AWG, da marca IOPE, com as juntas quentes inseridas no interior de agulhas hipodérmicas com diâmetro externo de 1,5 mm, as quais foram preenchidas com pasta térmica. Os termopares foram calibrados utilizando-se um banho termostaticado com circulação, da marca MICROQUÍMICA, modelo MQBMP-01, e a faixa de temperatura calibrada foi de 0°C a 70°C. Termômetros de mercúrio aferidos (INCOTERM) foram utilizados como sensores de temperatura padrão. Todos os sensores foram calibrados utilizando-se o mesmo arranjo de fios, o mesmo microcomputador e a mesma placa de aquisição de dados que foram utilizados durante os experimentos. Este procedimento foi realizado para evitar possíveis erros de leitura nas temperaturas. As curvas de calibração dos termopares utilizados no sistema experimental encontram-se no Apêndice A.

### **3.2 Determinação da influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos**

#### **3.2.1 Preparação das amostras e cozimento**

Cortes de peito de frango *in natura*, sem osso e sem pele, provenientes da mesma unidade produtora e adquiridos no mercado de Florianópolis/SC, foram utilizados para a preparação das amostras. Cada amostra foi cortada em formato cilíndrico, com dimensões de 6,5 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura. O peso médio de cada amostra foi de 54,0 gramas.

As amostras foram submetidas ao cozimento com vapor a pressão atmosférica, por 10 minutos, garantindo uma temperatura no centro geométrico na faixa entre 90 e 100°C. O peso médio das amostras após o cozimento foi de 44,5 gramas. São apresentadas na Figura 7, fotografias de uma amostra de peito de frango antes e após o cozimento. As amostras foram retiradas do recipiente de cozimento e drenadas, para a retirada da água aderida à superfície. A pesagem das amostras foi realizada imediatamente e, em seguida, fez-se a inserção de termopares nos centros das mesmas.

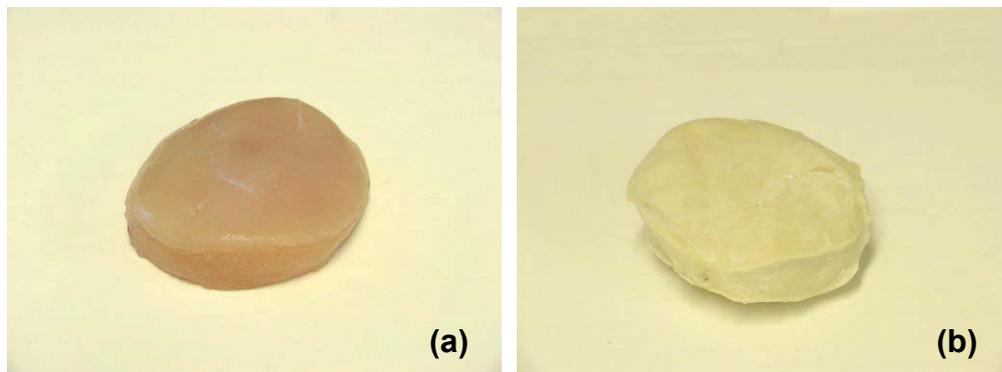


Figura 7 – Fotografias de uma amostra de peito de frango: (a) antes do cozimento e (b) após o cozimento.

### 3.2.2 Resfriamento a vácuo

Os cortes de peito de frango cozidos foram resfriados no sistema de resfriamento a vácuo descrito no tópico 3.1. O intervalo de aquisição dos dados foi de 10 segundos. O tempo total de cada experimento foi de 10 minutos e ao final dos mesmos, as amostras foram novamente pesadas para a determinação da perda de massa.

Nos experimentos de resfriamento a vácuo, a pressão da câmara foi primeiramente reduzida até uma pressão inicial de trabalho,  $P_i = 270$  mmHg, através do acionamento da bomba de vácuo (vazão nominal de 200 l/min). Após esta etapa, a variação da pressão da câmara foi cuidadosamente regulada, utilizando um

dispositivo com vazamentos calibrados, ilustrado na Figura 8. O dispositivo consistiu de um tubo de vidro com quatro agulhas hipodérmicas instaladas (vazamentos), o qual foi conectado à linha de vácuo. Escolhendo-se os vazamentos apropriados, obteve-se diferentes taxas de evacuação, até a pressão final ser atingida na câmara ( $P_f = 6 \text{ mmHg}$ ).



Figura 8 – Dispositivo com vazamentos calibrados, para obtenção de diferentes taxas de redução de pressão.

Deste modo, quatro diferentes taxas de redução de pressão foram utilizadas para baixar a pressão da câmara de 270 a 6 mmHg, como mostrado na Tabela 2. Cada experimento foi realizado em triplicata e em ordem aleatória.

Um balanço de massa na câmara de vácuo mostra que a redução da pressão segue uma função exponencial, conforme a Equação 10:

$$P = P_i e^{-Yt} \quad (10)$$

onde  $P$  e  $P_i$  são as pressões final e inicial da câmara (mmHg), respectivamente,  $t$  é o tempo (s) e  $Y$  é o coeficiente que caracteriza a taxa na qual ocorre a redução de pressão na câmara ( $\text{s}^{-1}$ ).

Tabela 2 – Taxas de redução de pressão utilizadas nos experimentos.

<b>P<sub>i</sub></b> <b>(mmHg)</b>	<b>P<sub>f</sub></b> <b>(mmHg)</b>	<b>t</b> <b>(s)</b>	<b>Taxa de redução de</b> <b>pressão (mmHg/s)</b>	<b>Y</b> <b>(s<sup>-1</sup>)</b>
270	6	212	1,25	0,01828
270	6	240	1,10	0,01570
270	6	300	0,90	0,01292
270	6	350	0,76	0,01123

A perda de massa teórica durante o resfriamento a vácuo foi estimada utilizando a Equação 1 para ser comparada com a perda de massa experimental. Para o cálculo da perda de massa teórica, o calor específico do peito de frango cozido foi determinado experimentalmente em um calorímetro de mistura. Para isso, uma determinada massa de água foi mantida no calorímetro até a temperatura ser estabilizada. Em seguida, foi adicionada uma massa conhecida de amostra, a uma temperatura determinada, e aguardou-se o equilíbrio da temperatura do sistema. Os valores experimentais dos calores específicos ( $c_p$ ) foram obtidos através da Equação 11, que representa a conservação da energia no sistema composto pelo calorímetro, água e amostra:

$$c_p = \frac{(T_m - T_w)(m_w c_w + m_c c_c)}{(T_p - T_m)m_p} \quad (11)$$

onde  $m$  é a massa (kg),  $T$  é a temperatura (°C) e  $c$  é o calor específico (kJ/kg°C). Os subscritos  $c$ ,  $m$ ,  $w$  e  $p$  referem-se, respectivamente, ao calorímetro, à mistura, à água e ao produto.

Os dados de perda percentual de massa e temperatura média final para cada triplicata foram analisados utilizando a Análise de Variância de um fator, com o valor  $Y$  sendo utilizado como fator de tratamento. Os resultados foram considerados estatisticamente significativos ao nível de 5% ( $P < 0,05$ ). Para comparação das médias foi utilizado o teste de Tukey.

### 3.3 Determinação dos coeficientes de evaporação ( $k_S$ ) em cortes de carne pré-cozidos resfriados a vácuo

#### 3.3.1 Preparação das amostras de carnes e cozimento

Amostras de diferentes tipos de carnes foram utilizadas nos experimentos de resfriamento a vácuo, ou seja: peito de frango, lombo de carne bovina, lombo de suíno e filé de suíno. As amostras foram cortadas em formato retangular e com diferentes dimensões, conforme mostrado na Tabela 3 e ilustrado na Figura 9. Foram preparadas 18 amostras para cada tipo de carne avaliado.

Tabela 3 – Dimensões das amostras de carne utilizadas nos experimentos.

Amostra	Dimensões (cm)	
	Menor	Maior
Peito de frango	1,5 x 1,5 x 2,0	3,5 x 3,5 x 4,0
Lombo bovino	1,5 x 2,0 x 2,0	2,5 x 5,0 x 5,5
Lombo suíno	1,5 x 2,0 x 2,5	3,0 x 3,5 x 5,0
Filé suíno	1,5 x 2,0 x 3,0	2,0 x 3,0 x 6,5

Cada amostra foi submetida a um cozimento com vapor a pressão atmosférica, até que a temperatura no centro geométrico atingisse aproximadamente 95°C. Após o cozimento, cada amostra foi rapidamente drenada para a remoção de água superficial e pesada. Em seguida, termopares foram inseridos nos centros geométricos das mesmas, para a determinação da evolução temporal da temperatura durante os experimentos de resfriamento a vácuo.

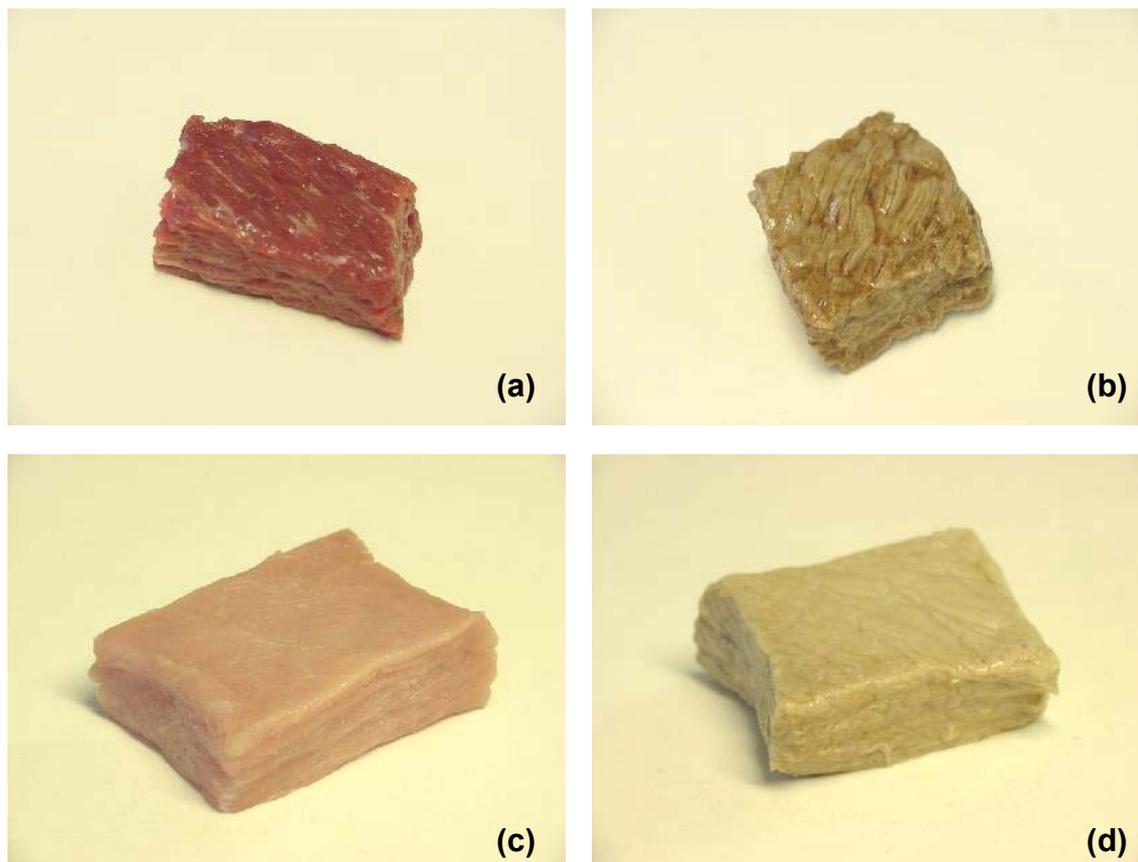


Figura 9 – Fotografias de amostras de carne utilizadas nos experimentos: (a) lombo bovino *in natura* e (b) cozido e (c) lombo suíno *in natura* e (d) cozido.

### 3.3.2 Resfriamento a vácuo

Os ensaios de resfriamento a vácuo foram conduzidos no sistema experimental descrito no tópico 3.1. Os resfriamentos foram conduzidos até a temperatura no centro geométrico da amostra atingir 23°C. A temperatura inicial das amostras foi utilizada para o cálculo da pressão de saturação. Foram realizados 69 experimentos, sendo cada amostra de carne submetida ao resfriamento a vácuo individualmente.

No final de cada experimento, as amostras foram novamente pesadas para a determinação da perda de massa ocorrida durante o resfriamento a vácuo. A densidade aparente das amostras foi determinada através de picnometria, sendo a água o fluido picnométrico. O volume total das amostras foi determinado a partir da massa e da densidade aparente das mesmas.

O valor do produto  $kS$  para cada experimento foi calculado pela Equação 7, utilizando os dados de perda de massa das amostras durante os experimentos de resfriamento a vácuo, as diferenças de pressão e os intervalos de tempo. O produto do coeficiente de evaporação ( $k$ ) pela superfície de transferência de massa ( $S$ ) foi correlacionado com o volume da amostra, para verificar a validade das Equações 8 e 9.

Leitos de areia empacotados no interior de tubos de PVC foram utilizados como meio modelo para estudar o comportamento do produto  $kS$  com o volume da amostra submetida ao resfriamento a vácuo. Isso se justifica pelo fato do leito de areia ter toda a porosidade conectada à sua superfície. Esse não é necessariamente o caso dos alimentos.

Quatro cilindros de PVC, de diâmetros internos iguais a 3,72 cm e com volumes de 32,61 cm<sup>3</sup>, 48,91 cm<sup>3</sup>, 65,21 cm<sup>3</sup> e 97,82 cm<sup>3</sup> foram preenchidos e compactados com areia, com umidades de 10% e 20%. A porosidade dos leitos de areia foi de 0,39 para o leito com 10% de umidade e 0,33 para o leito com 20% de umidade.

Sendo os cilindros abertos nas duas bases, a área externa disponível para a transferência de massa foi igual a 21,74 cm<sup>2</sup>. O mesmo procedimento utilizado para o resfriamento dos cortes de carnes cozidos foi utilizado para os experimentos de resfriamento dos cilindros de areia, com exceção das temperaturas iniciais e finais das amostras. Os resfriamentos foram realizados com as amostras inicialmente à temperatura ambiente, que foram resfriadas até ser atingida uma temperatura constante no centro geométrico das mesmas, tendo cada ensaio sido realizado em triplicata. Na Figura 10 estão ilustrados os diferentes cilindros de PVC preenchidos com areia e com os termopares inseridos nos centros dos mesmos.

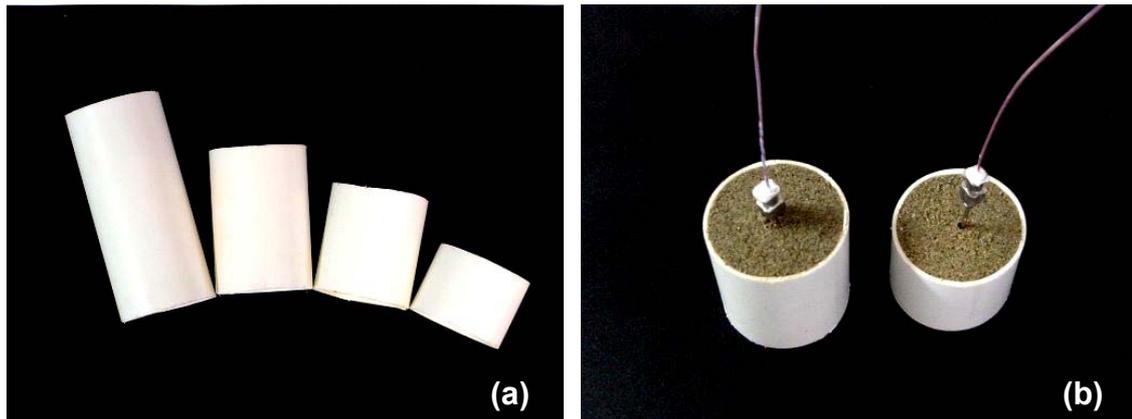


Figura 10 – Fotografias de amostras de areia utilizadas nos experimentos de resfriamento a vácuo: (a) cilindros de PVC de diferentes tamanhos, (b) cilindros de PVC compactados com areia.

### 3.4 Resfriamento a vácuo de mexilhões cozidos

#### 3.4.1 Preparação das amostras

As amostras utilizadas para a realização dos experimentos foram de mexilhões da espécie *Perna perna*, com oito meses de cultivo no litoral de Florianópolis/SC, fornecidas pelo Laboratório de Cultivo de Moluscos Marinhos da Universidade Federal de Santa Catarina. Após serem retirados das cordas de cultivo, os mexilhões foram escovados e lavados com água do mar, para a remoção do material aderido.

Antes de cada experimento, realizou-se uma drenagem da água aderida à superfície dos mexilhões, que foram então pesados individualmente e submetidos ao cozimento. O peso médio individual dos mexilhões utilizados, com concha, foi de 42 gramas. O cozimento foi efetuado durante 10 minutos com vapor à pressão atmosférica. As amostras de mexilhões foram novamente pesadas e acondicionadas na câmara de vácuo do sistema utilizado.

### 3.4.2 Resfriamento a vácuo

Os experimentos com mexilhões foram realizados em três diferentes sistemas de resfriamento a vácuo:

a) *Sistema experimental com bomba de vácuo*: O dispositivo utilizado foi o mesmo descrito no tópico 3.1. Em uma parte dos ensaios neste dispositivo, foram utilizadas amostras com dois mexilhões (com concha) para cada experimento realizado. Para observar a influência da massa da amostra sobre os resultados, foram realizados outros experimentos de resfriamento a vácuo com amostras de 2,45 kg.

Na Figura 11 são apresentadas as curvas de vácuo utilizadas nos experimentos com as amostras de dois mexilhões. Em quatro experimentos, a pressão foi reduzida até 5 mmHg e mantida constante até o final dos mesmos, após 420 segundos (curva de vácuo 1). Outros quatro experimentos foram realizados, com redução da pressão da câmara até 117 mmHg, manutenção da mesma por 120 segundos, seguida de sua redução até 5 mmHg e de sua manutenção até o final dos experimentos (curva de vácuo 2). Os experimentos com as amostras de 2,45 kg foram realizados com a curva de vácuo 1.

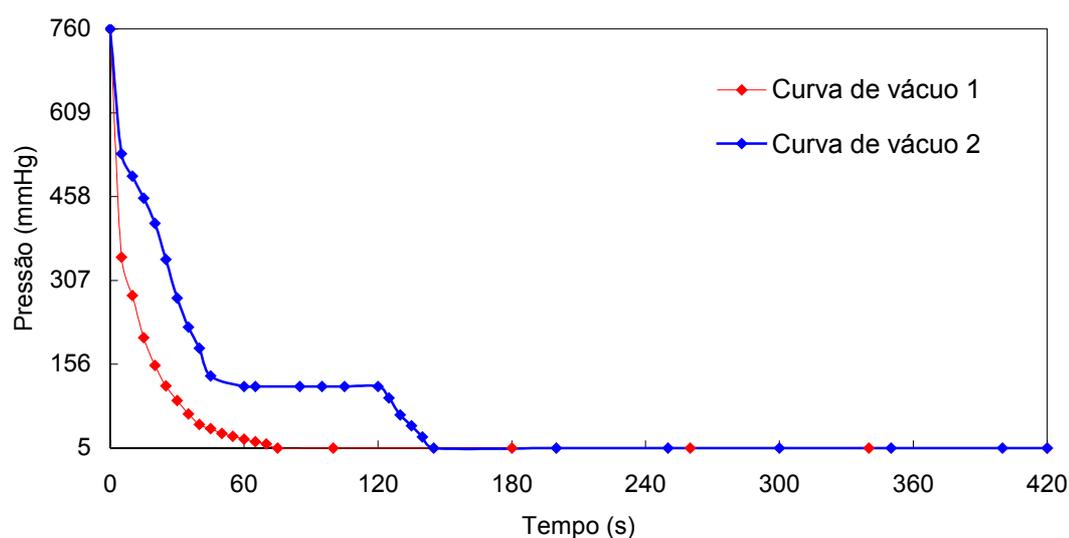


Figura 11 – Curvas de vácuo utilizadas na realização dos experimentos de resfriamento de mexilhões.

b) *Sistema experimental com ejetores de água*: Semelhante ao sistema anterior, substituindo a bomba de vácuo por um ejetor de água. O equipamento foi constituído por um tanque com circulação de água em circuito fechado, promovida por uma bomba centrífuga (marca SCHNEIDER, modelo BC-91SSC, potência de 0,5 cv). O vácuo foi produzido através da passagem de água pelo ejetor, o qual succiona os vapores produzidos na câmara de resfriamento. As amostras de mexilhões utilizadas para os experimentos neste sistema tiveram peso médio de 2,45 kg.

c) *Câmara de resfriamento a vácuo (marca ILKA, modelo TBV 1000 – V)*: Possui volume interno de aproximadamente 1000 litros, sendo revestida externamente com isolamento de lã de vidro de 10 cm de espessura. Seu fechamento é realizado por meio de uma porta com borrachas de vedação, munida de travas mecânicas. Uma bomba de vácuo, com vazão nominal de 333 l/min e medidores de temperatura e de pressão internas equipam o sistema. As amostras de mexilhões utilizadas para os experimentos neste sistema tiveram peso médio de 7,50 kg e foram acondicionadas no próprio recipiente utilizado para o cozimento (panela de 50 litros). Na Figura 12 é apresentado o interior da câmara de resfriamento a vácuo e o interior do recipiente utilizado para o cozimento.

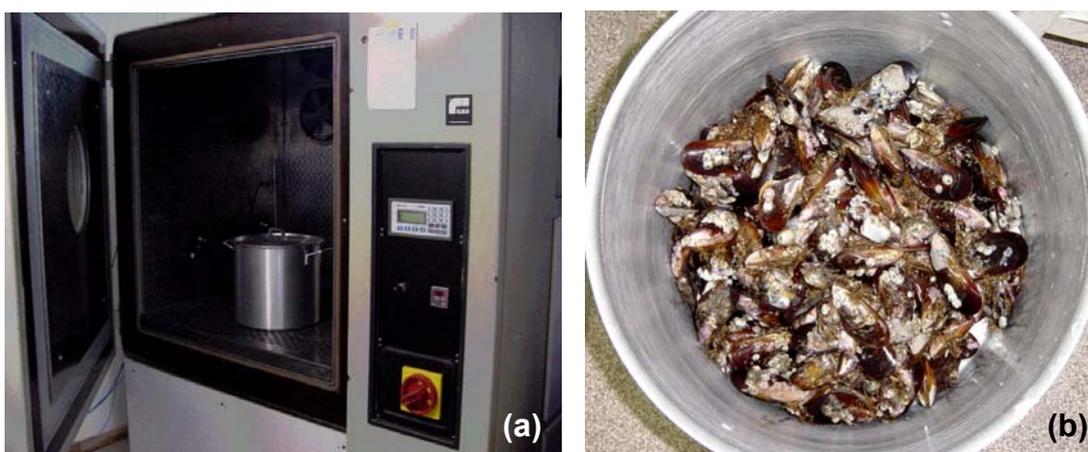


Figura 12 – Resfriamento a vácuo na câmara ILKA: (a) interior da câmara e (b) recipiente de cozimento com os mexilhões.

Os resfriamentos foram conduzidos até a temperatura interna dos mexilhões atingir um valor constante. O intervalo de aquisição dos dados foi de 10 segundos. Após o resfriamento, os mexilhões foram novamente pesados para avaliação da perda de massa experimental.

Para o cálculo da perda de massa teórica, através da Equação 1, os calores específicos da carne e da concha do mexilhão *Perna perna* foram determinados experimentalmente através de um calorímetro de mistura, conforme metodologia descrita no tópico 3.2.2.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

No primeiro tópico deste capítulo são apresentados os resultados referentes à avaliação da influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos.

No segundo tópico são discutidos os resultados obtidos nos experimentos para a determinação de coeficientes de evaporação de diferentes cortes de carne cozidos resfriados a vácuo.

Os resultados dos estudos da aplicação da técnica de resfriamento a vácuo de mexilhões cozidos são descritos no terceiro tópico.

### **4.1 Avaliação da influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos**

#### **4.1.1 Avaliação da perda de massa**

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados das perdas de massa e das reduções médias de temperatura por percentual de perda de massa ( $\eta_T$ ), para as diferentes curvas de redução de pressão aplicadas. Os dados indicam que a perda de massa relativa aumentou com o aumento da taxa de redução da pressão da câmara de vácuo ( $P < 0,05$ ).

Tabela 4 – Perdas de massa encontradas para os diferentes valores da variável  $Y$   
 $(P = P_i.e^{-Yt})$  – Valores experimentais.

$Y$ (s <sup>-1</sup> )	Perda de massa (%)	Desvio padrão (%)	$\eta_T$ (°C/1%)
0,01828 (sem vazamentos)	10,83	0,05	6,82
0,01570 (um vazamento)	10,43	0,46	6,98
0,01292 (dois vazamentos)	10,21	0,21	6,99
0,01123 (três vazamentos)	9,72	0,33	7,36

Os resultados mostraram que para  $Y$  igual a 0,01828 s<sup>-1</sup>, foi obtido o maior percentual de perda de massa (10,83%, com desvio padrão de 0,05%). Esta maior perda de massa foi resultado da exposição da amostra por um maior tempo a pressões reduzidas. Os menores resultados para a perda de massa (9,72%) foram encontrados para uma taxa de evacuação caracterizada por  $Y$  igual a 0,01123 s<sup>-1</sup>.

Vários resultados publicados na literatura corroboram os resultados obtidos no presente trabalho. BROSANAN e SUN (2003) observaram que no resfriamento a vácuo de lírios, com controle da taxa de redução de pressão, as menores perdas de massa foram atribuídas ao menor valor de  $Y$ . Para o resfriamento a vácuo de cortes cozidos de carne bovina, MC DONALD e SUN (2001b) obtiveram uma redução dos percentuais de perda de massa na medida em que houve uma redução do valor  $Y$ . SELF et al. (1990) correlacionaram a perda de massa com a pressão de cozimento e com a taxa de evacuação durante o resfriamento a vácuo de peitos de frango cozidos. Os resultados mostraram um aumento da perda de massa nos experimentos onde os maiores tempos de cozimento e de resfriamento foram empregados.

A redução média de temperatura por percentual de perda de massa,  $\eta_T$ , é o quociente entre a redução total da temperatura e a perda de massa percentual observada. Através desta relação pode se avaliar a eficiência do resfriamento a vácuo realizado. Observou-se que  $\eta_T$  aumentou de 6,82°C/1%, para um valor  $Y$  de

0,01828 s<sup>-1</sup>, para 7,36°C/1%, para um valor Y de 0,01123 s<sup>-1</sup>, o que indicou que a menor taxa de redução de pressão foi o mais eficiente programa de resfriamento quanto à redução da temperatura das amostras.

Na Figura 13 são apresentados os valores dos calores específicos das amostras de peito de frango cozidos, para diferentes temperaturas, juntamente com a reta e a equação de regressão linear. Observa-se a pequena influência da temperatura sobre os valores dos calores específicos encontrados. O calor específico médio utilizado para o cálculo da perda de massa teórica, através da Equação 1, foi de 3,507 kJ/kg°C. Para fins de comparação, o calor específico da carne de peito de frango cozido foi estimado a partir da composição centesimal da mesma (0,5% de carboidratos, 28% de proteínas, 2% de gorduras, 1,1% de cinzas e 68,4% de umidade (FAO, 2002)) e da correlação empírica proposta por SINGH e HELDMAN (2001), dada pela Equação 12

$$c = 1,424x_c + 1,549x_p + 1,675x_g + 0,837x_z + 4,187x_w \quad (12)$$

onde  $x$  é a fração mássica e os subscritos são,  $c$ , carboidratos;  $p$ , proteínas;  $g$ , gordura;  $z$ , cinzas; e  $w$ , água. O calor específico médio da carne estimado pela correlação foi igual a 3,347 kJ/kg°C, que difere em aproximadamente 4% do valor determinado experimentalmente.

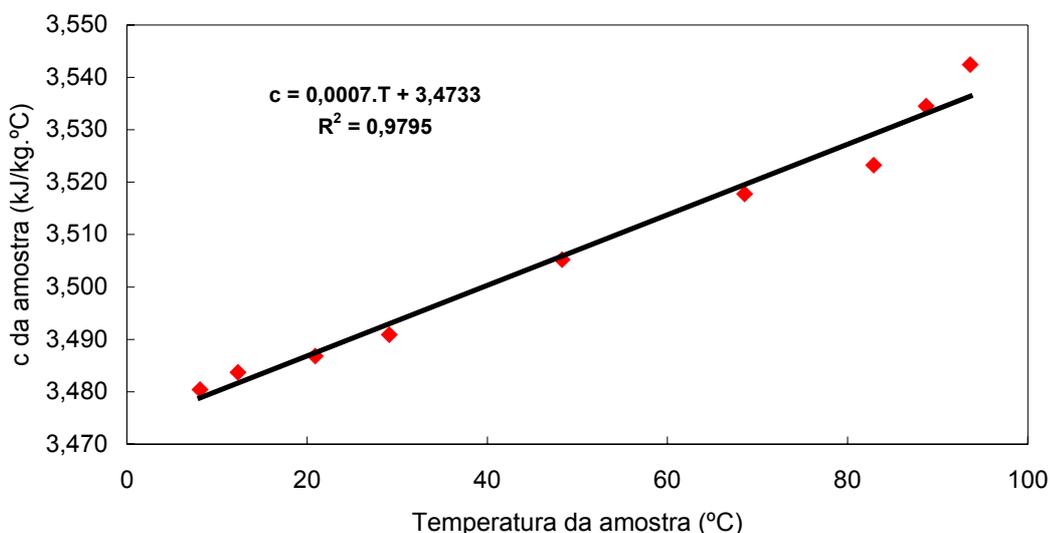


Figura 13 – Calor específico do peito de frango cozido para diferentes temperaturas.

Na Tabela 5 são apresentados os valores experimentais e estimados para a perda de massa percentual. As diferenças entre os valores calculados (Equação 1) e os determinados experimentalmente são pequenas, indicando que, do ponto de vista energético, o resfriamento a vácuo pode ser considerado como um processo isoentálpico.

Tabela 5 – Perdas de massa encontradas para os diferentes valores da variável  $Y$  – Valores experimentais e teóricos (Equação 1).

$Y$ ( $s^{-1}$ )	PM experimental (%)	PM teórica (%)	Erro absoluto (%)
0,01828	10,83	10,39	0,44
0,01570	10,43	10,24	0,19
0,01292	10,21	10,04	0,17
0,01123	9,72	10,06	-0,34

#### 4.1.2 Ciclo de resfriamento

Nas Figuras 14 e 15 são mostradas comparações entre as evoluções temporais de temperatura para três repetições, relativas à maior e à menor taxa de redução de pressão, respectivamente. Observa-se uma queda mais gradual da temperatura quando a menor taxa de redução de pressão é aplicada, se comparada à maior taxa.

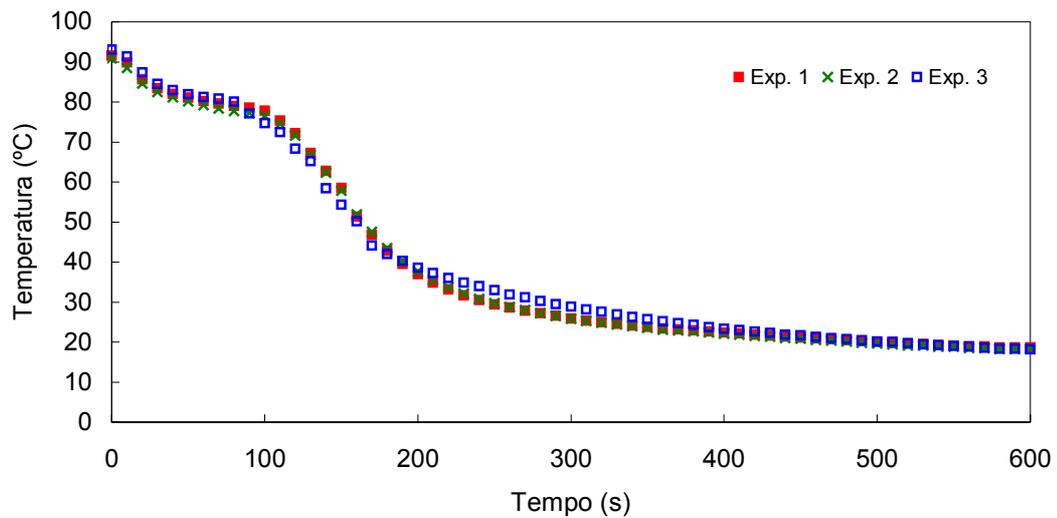


Figura 14 – Evolução temporal da temperatura para o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango cozidos, com um valor  $Y = 0,01828 \text{ s}^{-1}$ .

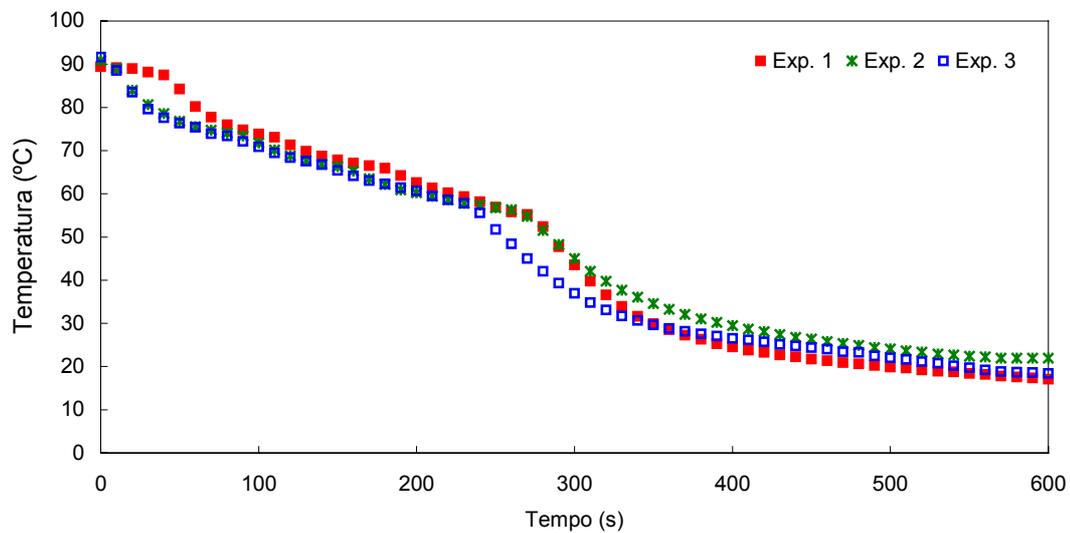


Figura 15 – Evolução temporal da temperatura para o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango cozidos, com um valor  $Y = 0,01123 \text{ s}^{-1}$ .

Na Figura 16 apresenta-se uma comparação entre as curvas médias de resfriamento para as diferentes taxas de redução de pressão analisadas. Diferentes taxas de redução de temperatura foram observadas a partir do momento em que a

pressão inicial de trabalho foi atingida (instante a partir do qual os vazamentos calibrados foram acionados).

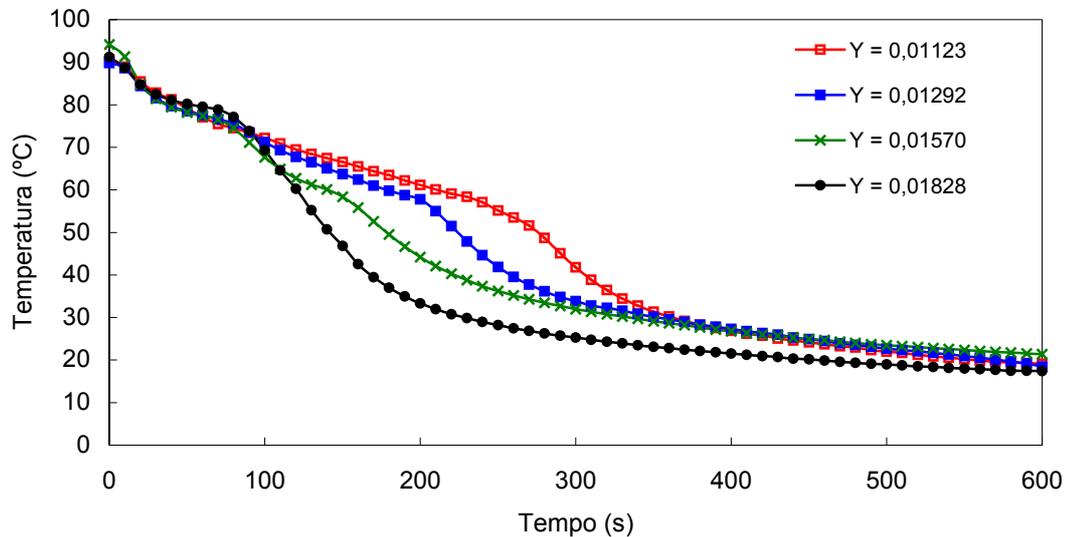


Figura 16 – Curvas médias de resfriamento para diferentes taxas de redução de pressão, definidas pela variável  $Y$ .

A maior redução de temperatura ocorreu nos primeiros 300 segundos de aplicação do vácuo, para todos os experimentos, quando houve a evaporação da maior parte da água livre das amostras. Segundo MC DONALD e SUN (2000), a taxa de resfriamento pode ser reduzida ou cessada a partir do momento em que a água livre disponível é evaporada. Conforme esperado, o resfriamento mais rápido ocorreu para maior taxa de redução de pressão.

As variações médias de temperatura para os quatro experimentos realizados são mostradas na Tabela 6. Os resultados obtidos indicaram que a taxa de redução de pressão utilizada não teve influência significativa na variação da temperatura final atingida ( $P > 0,05$ ), o que está associado ao fato da entalpia ser uma propriedade de estado (não dependendo do “caminho” entre o início e o final do processo).

Tabela 6 – Variação média de temperatura para diferentes taxas de redução de pressão.

Y (s <sup>-1</sup> )	ΔT (°C)	Desvio padrão (°C)
0,01828	73,84	1,27
0,01570	72,77	0,28
0,01292	71,36	0,77
0,01123	71,50	2,28

A variação temporal da massa da amostra pode ser prevista através do conhecimento da massa inicial da mesma, de sua umidade inicial, do seu calor específico a pressão constante (cujo valor é função do seu teor de umidade e da temperatura) e da evolução temporal da temperatura. Na Figura 17 é apresentado o algoritmo utilizado para a obtenção das curvas de decréscimo de massa.

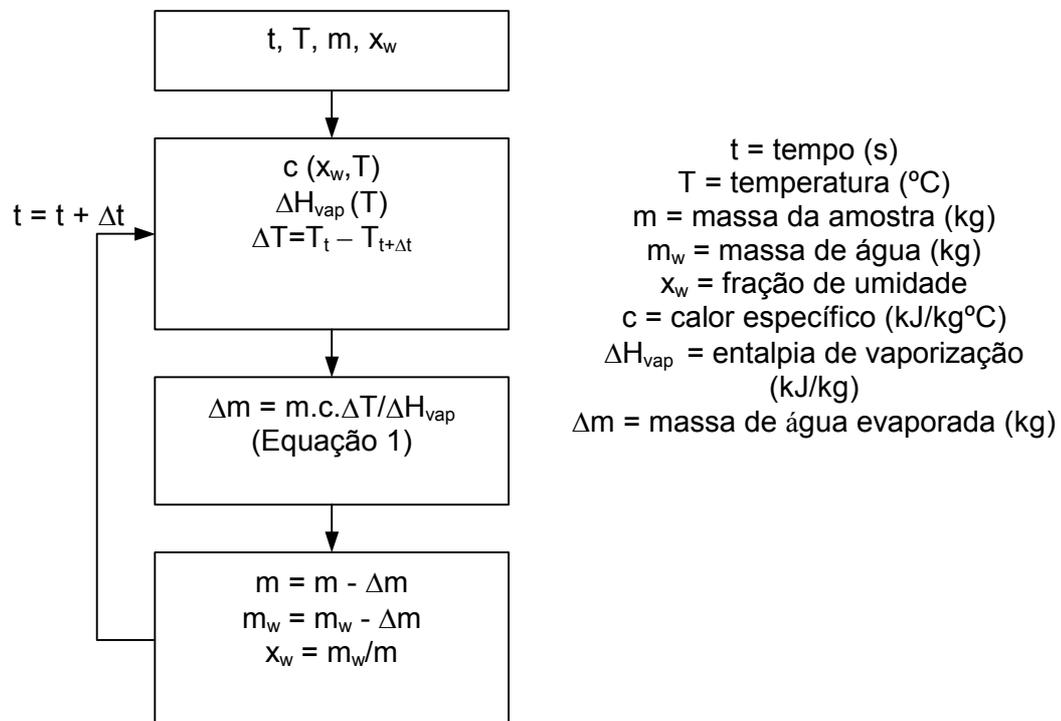


Figura 17 – Algoritmo utilizado para o cálculo das evoluções temporais da massa de peitos de frango cozidos resfriados a vácuo.

Na Figura 18 são apresentados os resultados obtidos através das simulações numéricas realizadas. Observou-se um comportamento semelhante às curvas de redução de temperatura (Figura 16). Através dos valores finais obtidos, pode-se prever a perda de massa do produto. Os resultados obtidos mostraram-se semelhantes aos experimentais e se encontram na Tabela 7. Isto demonstra novamente que através da Equação 1, aplicada ao longo do processo, se pode calcular a evolução da massa da amostra através da evolução da temperatura da mesma. Isso facilita a realização dos experimentos, pois não é necessária a pesagem da amostra durante o resfriamento para conhecer a sua evolução temporal.

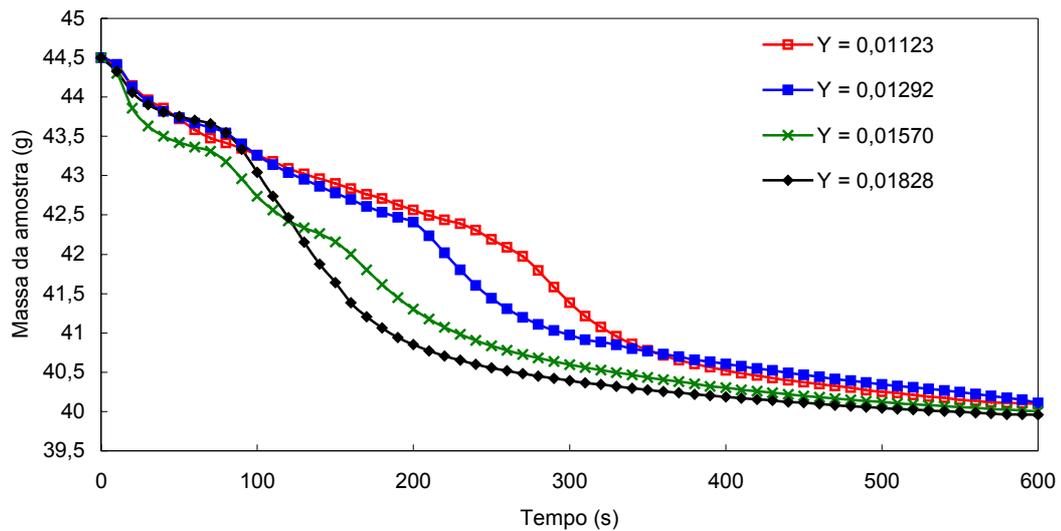


Figura 18 – Resultados das simulações numéricas das evoluções temporais das massas das amostras de peito de frango cozidos, para diferentes taxas de redução de pressão, definidas pela variável  $Y$ .

Tabela 7 – Perdas de massa encontradas para os diferentes valores da variável Y – Valores experimentais e teóricos (Simulação numérica).

Y (s <sup>-1</sup> )	PM experimental (%)	PM simulação (%)	Erro absoluto (%)
0,01828	10,83	10,21	0,62
0,01570	10,43	10,11	0,32
0,01292	10,21	9,87	0,34
0,01123	9,72	9,90	-0,18

Na Tabela 8 são apresentados dados da influência da curva de vácuo no resfriamento de flores (BROSNAN e SUN, 2003), cortes de carne bovina (MC DONALD e SUN, 2001b) e alface (RENNIE et al., 2001), além dos resultados obtidos no presente trabalho.

Tabela 8 – Influência da taxa de redução de pressão no resfriamento a vácuo – Comparação com a literatura.

Produto	Taxa de redução de pressão* (mmHg/s) *Faixa investigada	Número de taxas de redução de pressão avaliadas	Diferença da perda de massa entre a maior e menor taxa de redução de pressão aplicada (%)	$\eta_T$ na menor taxa de redução de pressão (°C/1%)
<b>Peito de frango cozido</b> (Este trabalho)	0,76 – 1,25	4	1,11	7,36
<b>Flores (lírios)</b> (BROSNAN e SUN, 2003)	0,11 – 4,67	4	1,70	3,40
<b>Alface</b> (RENNIE et al., 2001)	0,005 – 0,02	3	0	5,30
<b>Cortes de carne bovina</b> (MC DONALD e SUN, 2001b)	0,02 – 0,11	6	1,74	6,20

Em três dos quatro casos apresentados na Tabela 8, os resultados indicam que, para um determinado produto, maiores taxas de evacuação da câmara implicam em maiores perdas de massa relativas. Os dados do resfriamento da alface não apresentaram o mesmo comportamento, o que pode ter sido resultado das baixas taxas de redução aplicadas e da pequena faixa em que o estudo foi conduzido.

Para os quatro casos, as diferentes taxas de redução de pressão não exerceram influência na temperatura final obtida após o resfriamento (processos isoentálpicos). Por outro lado, em todos os estudos, os maiores valores de  $\eta_T$  foram encontrados para as menores taxas de evacuação. Os dados do cortes de peito de frango mostraram a maior eficiência de resfriamento quanto à redução de temperatura por percentual de perda de massa observado ( $\eta_T$ ).

#### 4.2 Determinação dos coeficientes de evaporação ( $kS$ ) em cortes de carne pré-cozidos resfriados a vácuo

Nas Figuras 19 a 22 são apresentados os resultados experimentais e as equações obtidas por regressão linear do produto  $kS$  em função do volume das amostras de cortes de carne pré-cozidos utilizados nos ensaios de resfriamento a vácuo.

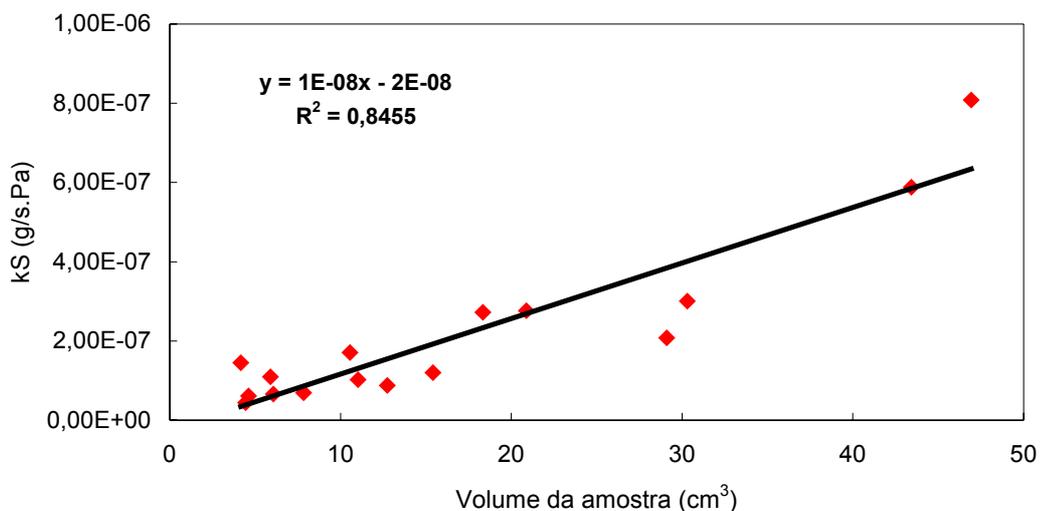


Figura 19 – Valores experimentais do produto  $kS$  para diferentes volumes de amostras de peito de frango cozido.

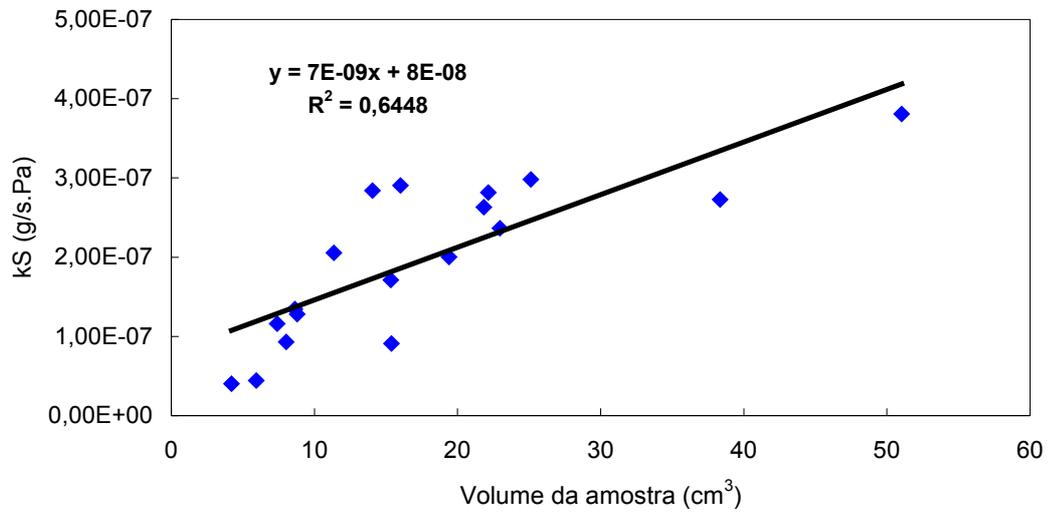


Figura 20 – Valores experimentais do produto  $kS$  para diferentes volumes de amostras de lombo bovino cozido.

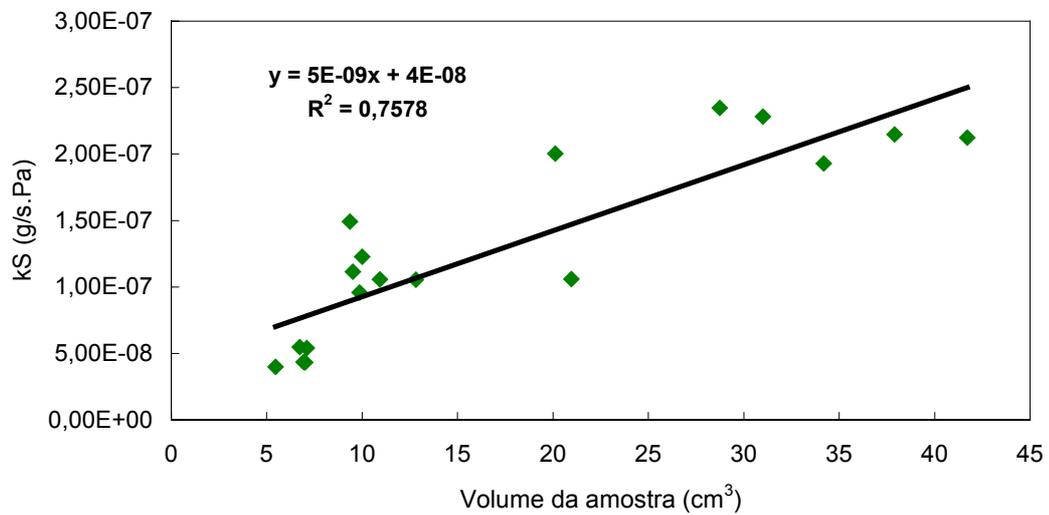


Figura 21 – Valores experimentais do produto  $kS$  para diferentes volumes de amostras de lombo suíno cozido.

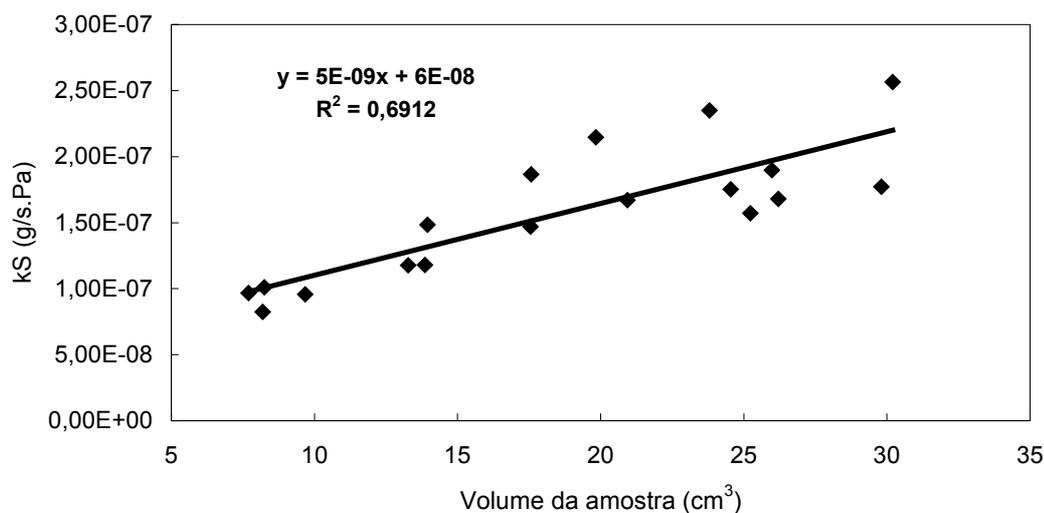


Figura 22 – Valores experimentais do produto  $kS$  para diferentes volumes de amostras de filé suíno cozido.

Em todos os tipos de cortes de carne cozidos, houve tendência de correlação entre o produto  $kS$  e o volume da amostra, sendo a maior correlação obtida para os resultados dos ensaios realizados com cortes de peito de frango cozidos ( $R^2=0,8455$ ). Esses resultados indicam que há evaporação da água presente no interior do tecido das carnes, o que tem duas conseqüências imediatas. A primeira delas é positiva. Trata-se da homogeneidade do resfriamento das peças, o que não se pode obter com o uso do resfriamento com ar frio, cujos perfis de temperatura dependem das propriedades térmicas do alimento (condutividade térmica, calor específico e massa específica do material). A segunda pode ser negativa, dependendo da quantidade de massa evaporada, que pode provocar mudanças de textura e redução da suculência da carne, fato esse não desejável.

Os resultados indicaram que para amostras de carne de mesma origem (mesmo animal), mas provenientes de cortes diferentes, como lombo e filé de suíno, o comportamento de  $kS$  não foi o mesmo. Isto se deve ao fato de cortes de regiões distintas de um mesmo animal possuírem composições e estruturas físicas diferentes. Como a evaporação no resfriamento a vácuo depende da quantidade de água disponível e da facilidade para a remoção da mesma, isso pode ser uma

explicação para os resultados obtidos. Na Figura 23 é apresentada uma comparação entre as regressões lineares obtidas para os quatro tipos de carnes avaliados.

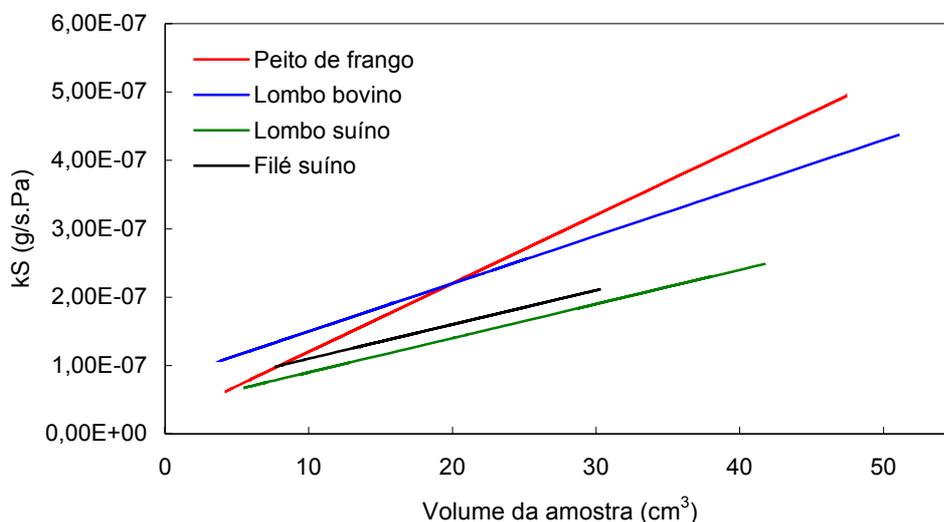


Figura 23 – Retas de regressão linear do produto  $kS$  para diferentes volumes de amostras dos quatro tipos de cortes de carnes cozidos avaliados.

LANDFELD et al. (2002) não encontraram dependência entre o produto  $kS$  e o volume das amostras cozidas de cenouras, de salsão, de batatas e de filé de suíno resfriados a vácuo. O maior coeficiente de correlação encontrado por estes autores foi para cortes de frango cozidos ( $R^2=0,7003$ ).

Segundo LANDFELD et al. (2002), a consideração de que a área de evaporação disponível (ou área de transferência de massa) de uma amostra é diretamente proporcional ao volume da mesma não é válida para todos os alimentos. Os vegetais cozidos tiveram comportamentos diferentes dos cortes de carne cozidos durante o processo, por serem menos porosos. Nos produtos amiláceos, o cozimento promove a gelatinização do amido, o que forma um material não poroso. Como conseqüência, a evaporação ocorre quase que exclusivamente na superfície da amostra, implicando em um valor de  $kS$  proporcional à área superficial e não ao volume da amostra.

Na Figura 24 é ilustrada a aparência final de duas amostras de cortes de carne cozidos após o resfriamento a vácuo. Visualmente foi observada uma maior exposição das fibras das amostras, ocasionada pela remoção de água do interior do produto.

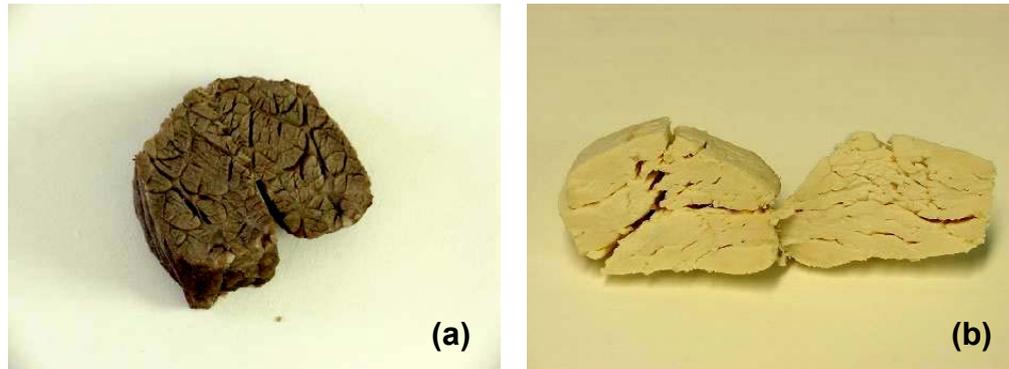


Figura 24 – Detalhe do interior de amostras de cortes de carne cozidos, após o resfriamento a vácuo: (a) lombo bovino e (b) peito de frango.

Na Figura 25 são apresentados os resultados obtidos para a dependência de  $kS$  com o volume durante o resfriamento de amostras de areia com 10 e 20% de umidade inicial.

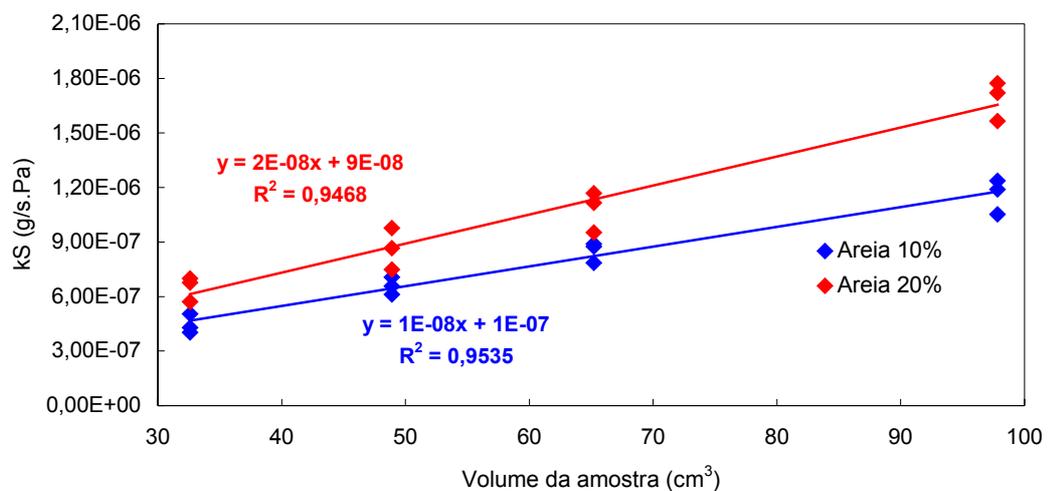


Figura 25 – Valores experimentais do produto  $kS$  para diferentes volumes de amostras de areia com 10% e 20% de umidade inicial.

Os experimentos com os cilindros de PVC preenchidos com areia apresentaram altos coeficientes de correlação linear, indicando uma grande dependência do produto  $kS$  com o volume das amostras. Como a superfície externa de transferência de massa foi idêntica para todas as amostras, os resultados permitiram concluir que uma grande parte da evaporação de água ocorreu do interior das amostras.

Alimentos com porosidade interna acessível facilitam a aplicação da técnica do resfriamento a vácuo, pois apresentam grande área de evaporação e, conseqüentemente, um menor tempo de processo requerido, além de uma maior uniformidade no resfriamento (MC DONALD e SUN, 2001a; WANG e SUN, 2001). Os valores médios de  $kS$  para os experimentos com areia foram  $7,781 \cdot 10^{-7}$  g/s.Pa para as amostras com 10% de umidade e  $1,069 \cdot 10^{-6}$  g/s.Pa para as amostras com 20% de umidade. Esses dados demonstram que o valor de  $kS$  depende da quantidade de água disponível para a evaporação, pois as amostras com maior percentual de umidade apresentaram os maiores valores de  $kS$ .

Na Figura 26 apresenta-se um modelo esquemático para explicar o comportamento da evaporação durante o resfriamento a vácuo de um material poroso esférico. No início do processo, a água próxima à superfície é evaporada, disponibilizando espaços vazios para que a água livre interna possa sair do produto, também por evaporação. As setas ilustram a saída de água do produto no decorrer do processo de resfriamento a vácuo, promovendo um aumento da área disponível para evaporação.

A partir da variação temporal da massa da amostra e das diferenças temporais entre a pressão da câmara e a pressão de saturação do vapor d'água no produto, pode-se prever a variação temporal de  $kS$ . Na Figura 27 é apresentado o algoritmo utilizado para a obtenção das curvas que representam estas variações para o resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango cozidos. As curvas obtidas através da simulação numérica são apresentadas na Figura 28. Para fins de comparação das evoluções das variáveis importantes envolvidas, os resultados foram adimensionalizados.

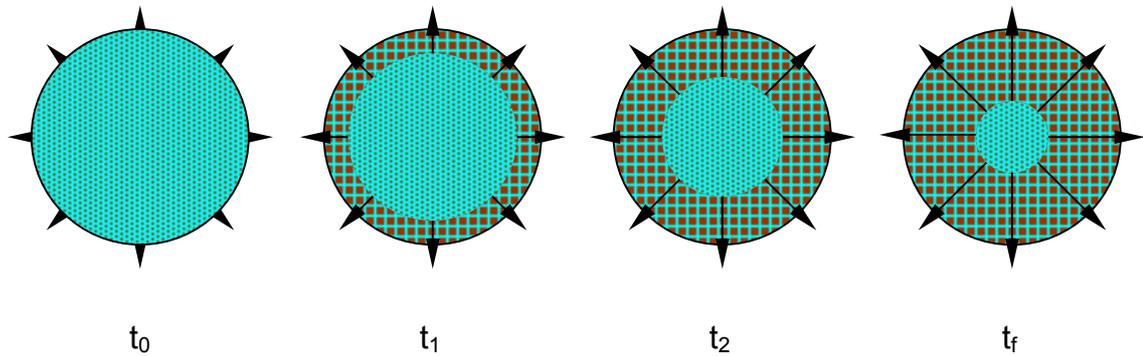


Figura 26 – Esquema ilustrativo da evaporação da água durante o resfriamento a vácuo de um material poroso esférico.

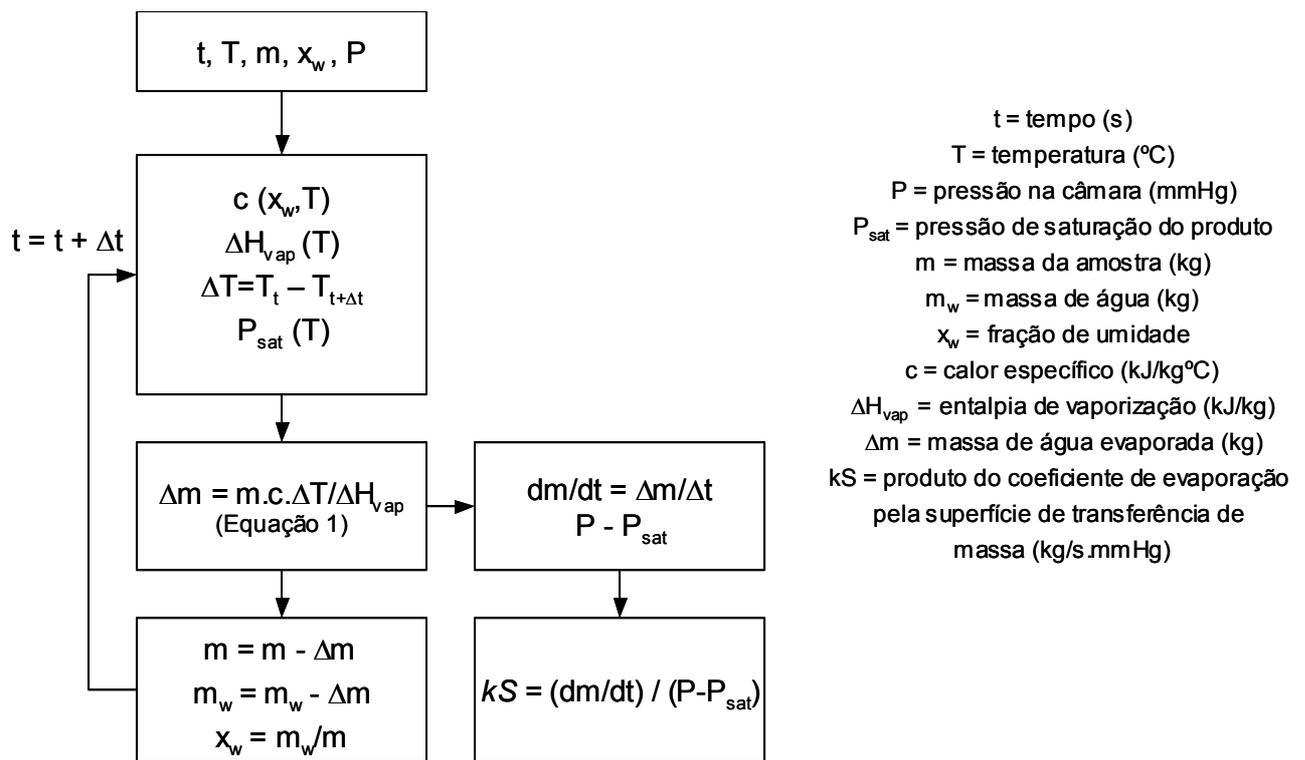


Figura 27 – Algoritmo utilizado para o cálculo das evoluções temporais da massa, das diferenças de pressão e do produto  $kS$  de peitos de frango cozidos resfriados a vácuo.

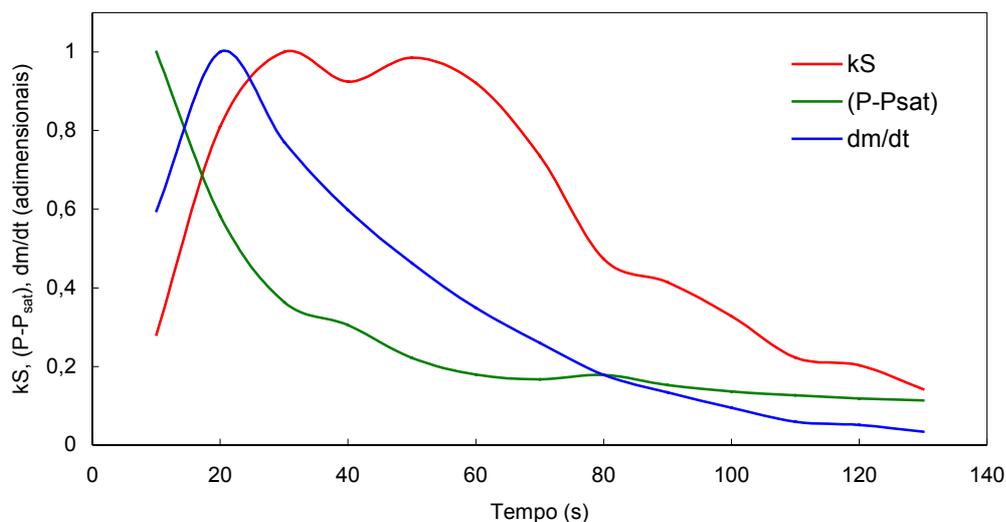


Figura 28 – Resultados das simulações numéricas das evoluções temporais da massa da amostra, da diferença ( $P - P_{sat}$ ) e do produto  $kS$  no resfriamento a vácuo de cortes de peito de frango cozidos (valores adimensionais).

Observa-se na Figura 28, as evoluções de  $kS$ , da força motriz ( $P - P_{sat}$ ) e da taxa de evaporação ( $dm/dt$ ). No início do resfriamento, quando ocorre uma rápida redução da pressão e as taxas de evaporação são elevadas (devido ao rápido decréscimo da temperatura) o valor do produto  $kS$  aumenta rapidamente, atingindo um valor máximo. Na medida em que a redução da pressão da câmara ocorre a uma taxa menor, a taxa de evaporação diminui, o que resulta em uma diminuição de  $kS$ , mesmo com o aumento da área de evaporação (Figura 26). No final do processo a força motriz da mudança de fase ( $P - P_{sat}$ ) tende a zero, o que faz cessar a evaporação.

### 4.3 Resfriamento a vácuo de mexilhões cozidos

#### 4.3.1 Sistema experimental com bomba de vácuo

Na Figura 29 são apresentadas as evoluções temporais das temperaturas dos centros de dois mexilhões monitorados (A e B), para quatro experimentos com aplicação da curva de vácuo 1. As amostras apresentaram um decréscimo médio de

temperatura de aproximadamente 71°C em 420 segundos. A temperatura do ar da câmara é representada pela linha pontilhada da figura.

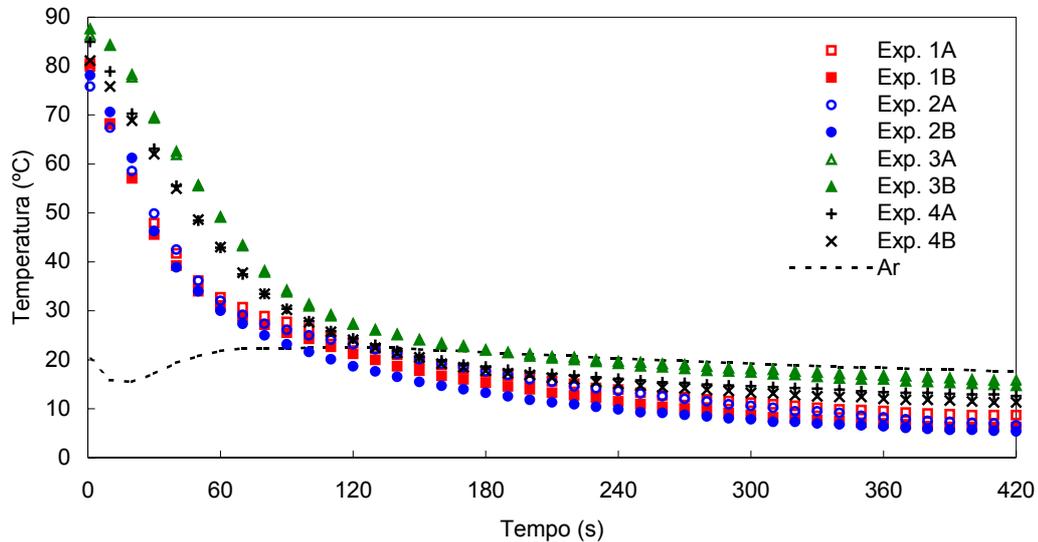


Figura 29 – Perfil de temperatura para quatro experimentos com mexilhões realizados com o sistema com a bomba de vácuo (curva de vácuo 1).

As diferenças nas temperaturas dos mexilhões no final dos experimentos (420 segundos) existiram devido às diferentes temperaturas iniciais dos mesmos. A variabilidade do tamanho das amostras e as imprecisões no posicionamento dos termopares no interior destas também contribuíram para essa diferença.

Os decréscimos das temperaturas com o tempo para quatro experimentos realizados com a curva de vácuo 2 são apresentados na Figura 30. O resfriamento total foi de aproximadamente 73°C em 420 segundos. A temperatura média do ar da câmara está representada pela linha pontilhada.

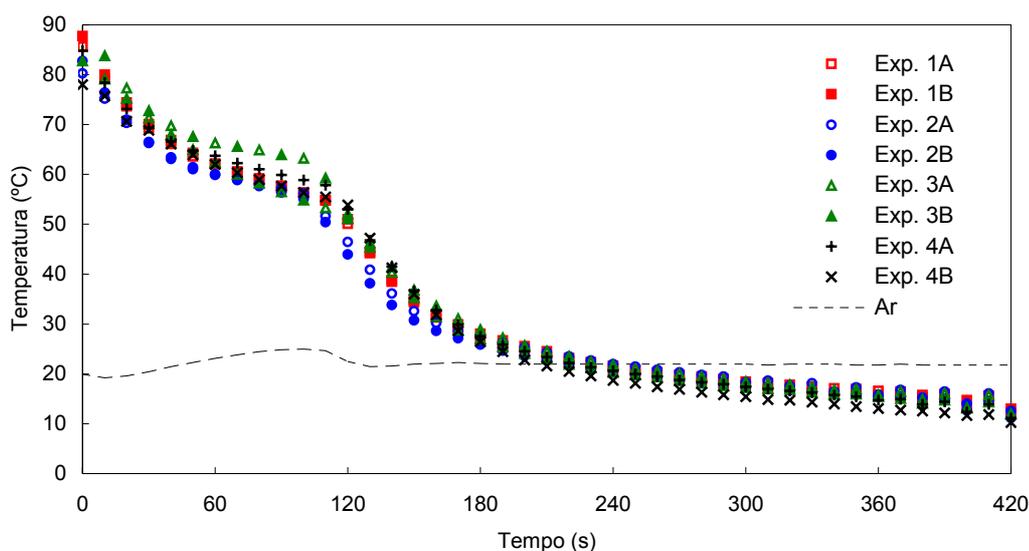


Figura 30 – Perfil de temperatura para quatro experimentos com mexilhões realizados com o sistema com a bomba de vácuo (curva de vácuo 2).

Para os experimentos relativos à curva de vácuo 1, as temperaturas das amostras atingiram 40°C (temperatura ideal para desconchamento) em 80 segundos, enquanto nos experimentos relativos à curva de vácuo 2, a mesma temperatura só foi atingida após 140 segundos. Assim, pode-se facilmente controlar a taxa de resfriamento do material pela modificação da curva de redução de pressão.

Na Figura 31 são apresentados os resultados experimentais dos calores específicos da concha e da carne do mexilhão *Perna perna* cozidos, os quais são pouco influenciados pela temperatura, no intervalo de 0 a 100°C. As equações e as retas de regressão linear também são apresentadas na figura.

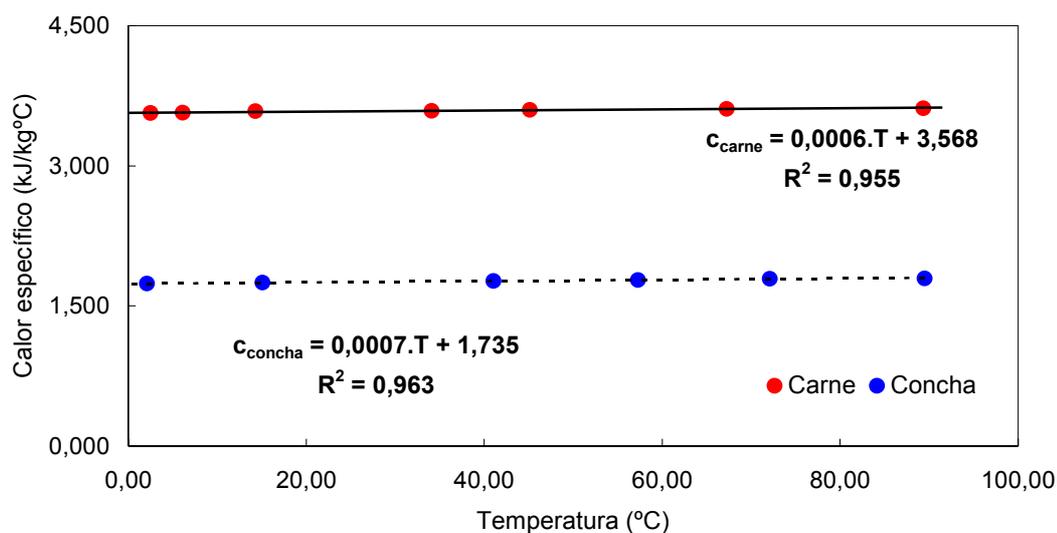


Figura 31 – Calores específicos da carne e da concha do mexilhão *Perna perna* cozido, para diferentes temperaturas.

Para fins de comparação, o calor específico da carne de mexilhão cozido foi estimado a partir da composição centesimal da mesma (78% de umidade, 15,9% de proteínas, 2,1% de gorduras, 2,1% de cinzas e 1,9% de carboidratos (FAO, 2002)) e da correlação empírica proposta por SINGH e HELDMAN (2001), dada pela Equação 12. O calor específico médio da carne, estimado pela correlação, foi igual a 3,591 kJ/kg°C, enquanto que o experimental, para a temperatura de 20°C, foi de 3,580 kJ/kg°C.

Foi determinada a proporção entre as quantidades de carne e concha, para 10 amostras de mexilhão. As massas médias de carne e de concha encontradas representaram, respectivamente, 21,3% e 78,7% da massa total. As curvas representativas dos resfriamentos da carne e das conchas dos mexilhões cozidos são apresentadas na Figura 32. A diferença inicial entre as temperaturas da carne e da concha deveu-se ao rápido resfriamento da concha, quando exposta à temperatura ambiente, durante a pesagem e inserção dos termopares. Ao final de 420 segundos, ambas apresentaram temperaturas muito próximas.

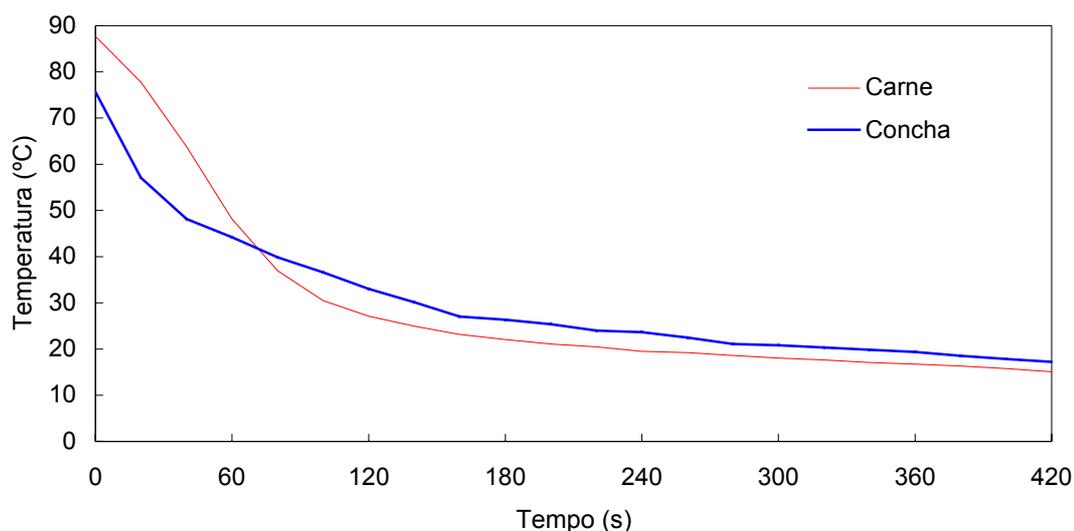


Figura 32 – Comparação das evoluções temporais da temperatura da carne e da concha de mexilhões resfriados a vácuo (curva de vácuo 1).

A capacidade térmica ( $C = m \times c$ ) de 1 kg de amostra (carne + concha) pode ser decomposta nas capacidades térmicas dos constituintes da amostra. Para a concha a 20°C,  $C_{\text{concha}} = m_{\text{concha}} \times c_{\text{concha}} = 0,787 \times 1,75 \cong 1,38 \text{ kJ}/^{\circ}\text{C}$ , enquanto para a carne,  $C_{\text{carne}} = m_{\text{carne}} \times c_{\text{carne}} = 0,213 \times 3,58 \cong 0,76 \text{ kJ}/^{\circ}\text{C}$ . Assim, para uma mesma redução de temperatura, 35,5% do calor total retirado é relativo ao resfriamento da carne e 64,5% é relativo ao resfriamento da concha de mexilhão.

A perda de massa provocada pela evaporação de água das amostras de mexilhões com concha durante o resfriamento a vácuo foi de aproximadamente 8% para os experimentos realizados com aplicação das curvas de vácuo 1 e 2. A relação entre o decréscimo de temperatura e a perda de massa após o resfriamento a vácuo foi de aproximadamente 9°C/1%.

Experimentos realizados com amostras de carne desconchadas apresentaram uma perda de massa igual a 9,6%, enquanto as conchas separadas perderam aproximadamente 4,5% de água durante o resfriamento. Estes valores estão de acordo com os valores teóricos calculados pela Equação 1, para a carne e para a concha de mexilhão, iguais a 10,2 e 4,1 %, respectivamente, os quais foram

calculados usando os valores dos calores específicos determinados para amostras de carne de mexilhão com 78% de umidade e para conchas sem água líquida aparente aderida à superfície. De acordo com os resultados experimentais de resfriamento e de perda de massa, uma redução de 7,4°C na temperatura da carne dos mexilhões gera uma perda de massa de 1%. A presença de uma maior ou menor quantidade de água no interior da concha (proveniente do cozimento), a qual também é resfriada junto com a amostra (carne + concha), modifica esse valor. Como o calor específico da água é alto (4,18 kJ/kg °C), a massa de água presente no interior da concha aumenta proporcionalmente o calor específico efetivo do conjunto formado pela carne, concha e água de cozimento.

#### 4.3.2 Sistema experimental com ejetores de água

Os comportamentos temporais das temperaturas, para três experimentos realizados no sistema com ejetores são apresentados na Figura 33. Observou-se um lento decréscimo de temperatura em comparação com o sistema com bomba de vácuo, ocasionado pela baixa vazão de evacuação proporcionada pelo ejetor de água. O sistema com ejetor atingiu uma pressão final de 75 mmHg e a variação média de temperatura foi de 64°C em 1800 segundos.

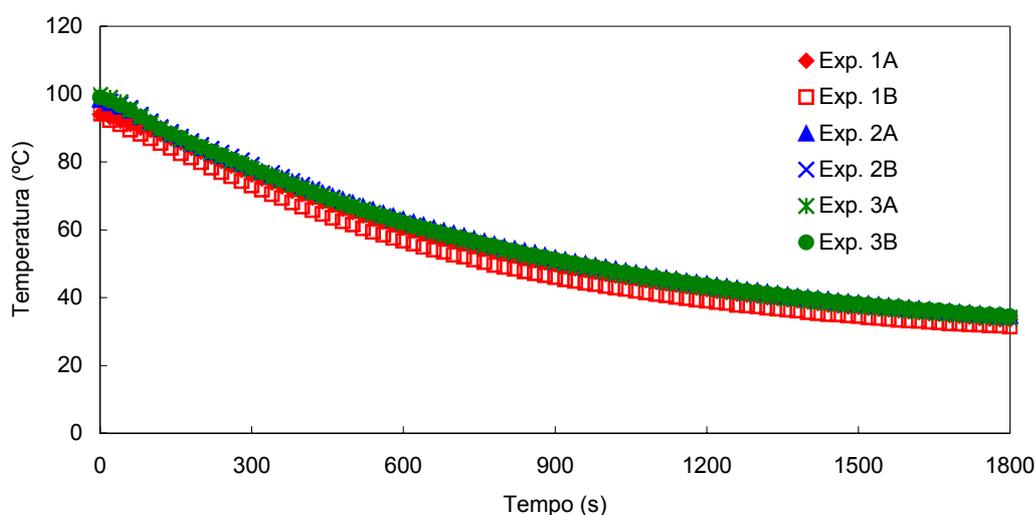


Figura 33 – Perfil de temperatura para três experimentos realizados com o sistema de resfriamento com ejetores de água (A e B: mexilhões monitorados).

### 4.3.3 Sistema utilizando a câmara de resfriamento a vácuo

Na Figura 34 são apresentadas as evoluções temporais das temperaturas das amostras para um experimento realizado na câmara de vácuo ILKA. Cada curva está relacionada a uma diferente posição da amostra no recipiente colocado no interior da câmara: topo, meio e fundo do recipiente. Observa-se, ao final do experimento, uma uniformidade de temperatura das amostras, independente da posição das mesmas no recipiente. Isto mostra que, como o vácuo atinge todos os pontos da câmara, todas as amostras estão suscetíveis à evaporação de água e ao conseqüente resfriamento. Foi necessário um maior tempo para o resfriamento das amostras em decorrência da câmara possuir um grande volume para evacuação e a bomba do sistema não proporcionar altas vazões. A pressão final atingida pela câmara de vácuo foi de 20 mmHg e a variação média de temperatura foi de 53°C em 1260 segundos.

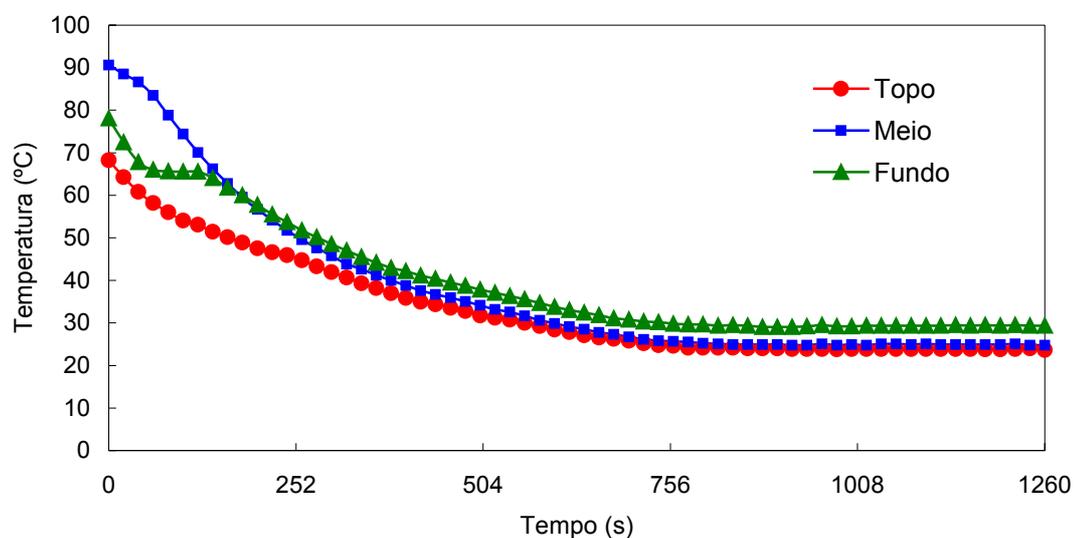


Figura 34 – Perfil de temperatura para um experimento realizado na câmara de resfriamento ILKA, monitorando a temperatura de mexilhões de três regiões: topo, meio e fundo do recipiente.

#### 4.3.4 Comparação entre os sistemas de resfriamento a vácuo

Em todos os casos, o rápido decréscimo da temperatura das amostras foi função da razão de bombeamento ( $r = \text{vazão da bomba} / \text{volume da linha de bombeamento}$ ), indicando que o resfriamento a vácuo pode ser utilizado com sucesso após a etapa de cozimento dos mariscos.

Na Figura 35 são comparados os resultados obtidos para os três procedimentos experimentais avaliados. Os pontos assinalados indicam o tempo necessário para se resfriar a amostra até 40°C. Observou-se que para o sistema experimental com bomba de vácuo ( $r = 12,7 \text{ min}^{-1}$ ) a temperatura necessária foi rapidamente atingida (80 segundos). Isto foi decorrente do pequeno volume da câmara de resfriamento (dessecador), associado à alta vazão de sucção da bomba de vácuo. Para os experimentos com o sistema com ejetores de água, o tempo médio em que a temperatura de 40°C foi atingida foi de 1320 segundos, e com a câmara ILKA ( $r = 0,33 \text{ min}^{-1}$ ), 380 segundos.

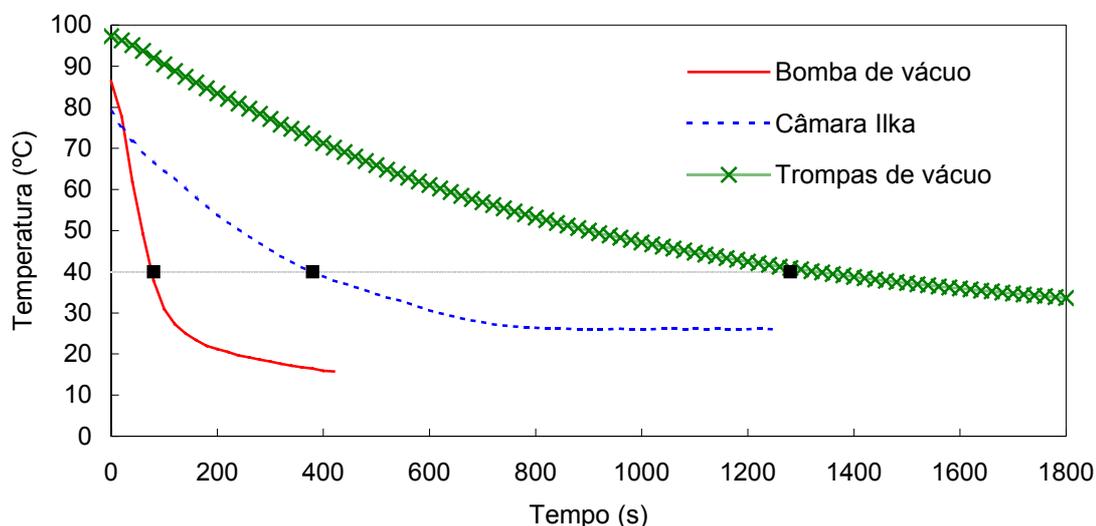


Figura 35 – Perfil médio de temperatura para os três experimentos de resfriamento a vácuo avaliados.

A perda de massa provocada pela evaporação de água das amostras de mexilhões com concha durante o resfriamento a vácuo foi de aproximadamente 8,1% para os experimentos realizados no sistema com bomba de vácuo. Para os experimentos realizados com trompas de vácuo e na câmara de resfriamento a vácuo ILKA, as perdas percentuais de massa foram 8,6% e 8,8% respectivamente. Assim, todos os experimentos realizados apresentaram perda de massa na faixa de 8,0-9,0%, indicando que para o resfriamento a vácuo de mexilhões, a taxa de redução de pressão não exerceu grande influência no percentual de água evaporada.

A relação média entre o decréscimo de temperatura e o percentual de perda de massa, para os três experimentos realizados, situou-se na faixa entre 7,0-9,0°C para cada 1% de água evaporada. SELF et al. (1990), estudando o resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos, encontraram uma redução de 5,83°C para cada 1% de perda de massa. Para alfaces, cada 1% de perda de massa (água evaporada) faz baixar em aproximadamente 6°C a temperatura do produto (CORTEZ, NEVES FILHO e CARDOSO, 2000). Observa-se que em comparação com os dados de literatura sobre resfriamento a vácuo, os resultados obtidos para a aplicação da técnica em mexilhões após o cozimento são bastante satisfatórios.

Assim, o cozimento e o resfriamento de mexilhões em um mesmo equipamento podem ser realizados com eficiência através do resfriamento a vácuo. Este processo reduz a manipulação do produto, além de evitar o risco de contaminação cruzada pela água de resfriamento. Porém, visando reduzir o custo de investimento para a aplicação desta técnica por pequenos e médios produtores de mexilhão, devem ser estudadas formas alternativas e eficientes para a obtenção de baixas pressões. A proposta de utilizar um sistema de vácuo composto por ejetores de água (trompas de vácuo) parece ser uma excelente alternativa, devido ao baixo custo de investimento.

Uma vantagem deste sistema é que a água em circulação atua como agente condensador dos vapores provenientes da evaporação da água do alimento durante o resfriamento. Ao entrar em contato com a trompa de vácuo, a água que por ela circula arrasta o vapor e promove a condensação do mesmo.

Estudos adicionais devem ser realizados, com o objetivo de otimizar o sistema e buscar menores tempos de operação, através do uso de ejetores mais eficientes.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da montagem de um sistema experimental de resfriamento a vácuo foi possível a realização de experimentos em escala laboratorial, que mostraram resultados semelhantes aos de trabalhos publicados, porém realizados em maior escala. A realização de novos experimentos, como o resfriamento de mexilhões após o cozimento, também foi oportunizada .

Apesar do resfriamento a vácuo ser uma técnica em que as perdas de massa são superiores às obtidas nos processos convencionais, este efeito não traz impactos econômicos em cortes de carnes após o cozimento, pois a água residual do processo pode compensar as perdas de umidade do produto. No entanto, ficou evidente a modificação da textura dos cortes de carne devido à saída da água interna, o que pode diminuir a suculência dos mesmos. Se a carne cozida for destinada a formular um outro produto, o problema da perda de massa durante o resfriamento torna-se ainda menos importante. Caso contrário, essas perdas podem ser reduzidas através do controle da taxa de redução de pressão. Durante o resfriamento a vácuo de cortes de frango cozidos, a perda de massa foi reduzida em 1,11% através do controle da taxa de evacuação da câmara de vácuo por um dispositivo com vazamentos calibrados. Essa redução pode ser importante quando grandes quantidades de produtos são resfriadas e a perda de água representar um problema tecnológico ou econômico.

A taxa de redução de pressão também teve influência na relação entre o decréscimo de temperatura e a perda percentual de massa, com os melhores resultados sendo obtidos quando a menor taxa foi aplicada.

Através da realização de experimentos com diferentes cortes de carne pré-cozidos, foram obtidos dados que podem ser utilizados na elaboração de modelos matemáticos para descrever o processo de transferência de massa durante o resfriamento a vácuo. Ficou evidenciada uma correlação entre o produto do coeficiente de transferência de massa e da área total de transferência de massa ( $kS$ ) com o volume das amostras avaliadas. A maior dependência encontrada foi para os cortes de peito de frango cozidos, demonstrando ser este um produto com boa aplicabilidade para a técnica de resfriamento a vácuo.

Experimentos com cilindros de PVC preenchidos com areia permitiram concluir que em amostras porosas e com água disponível para a evaporação, o valor do produto  $kS$  possui uma maior correlação com o volume das mesmas, em relação aos cortes de carnes. Experimentos com diferentes leitos, como micro-esferas de vidro, e com diferentes percentuais de umidade (até o nível de saturação) poderiam esclarecer melhor o comportamento do processo de transferência de massa durante o resfriamento a vácuo e serão realizados no futuro, como continuação deste trabalho.

Foi verificado que o resfriamento a vácuo de mexilhões cozidos pode ser utilizado como uma alternativa tecnicamente viável para o processamento de mariscos. Os três sistemas avaliados neste trabalho demonstraram a aplicabilidade da técnica. Além do resfriamento rápido proporcionado por este método, a ausência de contato com água de resfriamento implica em um menor risco de contaminação microbológica. Outra vantagem é que os processos de cozimento e de resfriamento podem ser realizados em uma mesma câmara (tanque), reduzindo a manipulação do produto. Pesquisas devem ser conduzidas com a finalidade de elaborar um equipamento conjugado para o cozimento e o resfriamento a vácuo para pequenos produtores e processadores de mexilhões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, M. R. A. **Resfriamento Rápido a Vácuo em Alfaces (*Lactuca Sativa L.*)**. Campinas: UNICAMP, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2000.
- ANTONIOLLI, M. A. **Vida Útil do Mexilhão *Perna perna* (L.) Processado e Mantido sob Refrigeração**. Florianópolis: UFSC, 1999. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- 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.
- BRADSHAW, W. Modulated Vacuum Cooling for Bakery Products. **Bakers Digest**, v. 50, p. 26-31, 1979
- BROSNAN, T.; SUN, D. W. Compensation for Water Loss in Vacuum-Precooled Cut Lily Flowers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 79, n. 3, p. 299-305, 2001.
- BROSNAN, T.; SUN, D. W. Influence of Modulated Vacuum Cooling on the Cooling Rate, Mass Loss and Vase Life of Cut Lily Flowers. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 1, p.45-49, 2003.

- 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.
- CEPA. **Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina 2001-2002**. Florianópolis: Instituto de Planejamento e Economia Agrícola de Santa Catarina, 2002, p. 135-137.
- 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.
- DECKER, L. Vacuum Cooling Boosts Quality, Efficiency for Salad Packer. **Chilton's Food Engineering**, v. 62, n. 10, p. 130, 1990.
- DE ELL, J. R.; VIGNEAULT, C.; FAVRE, F.; RENNIE, T.; KHANIZADEH, S. Effects of Vacuum Cooling and Storage Temperature on the Quality of Bean Sprouts. **Agriculture and Agri-Food Canada Research Summary 1999-2000**. Canada, 2002.
- 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.
- 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.
- DOSTÁL, M.; KÝHOS, K.; HOUSKA, M.; GRÉE, R. Vacuum Cooling of Solid Foods. **Czech Journal of Food Sciences**, v. 17, p. 103-112, 1999.
- DOSTÁL, M.; PETERA, K. Vacuum Cooling of Liquids. In: **15<sup>o</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering**, Conference CHISA, Praga, 2002.

- DOSTÁL, M.; PETERA, K. Vacuum Cooling of Liquids: Mathematical Model. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 533-539, 2003.
- EPAGRI. **Manual de Cultivo do Mexilhão *Perna perna***. Florianópolis: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Difusão de Tecnologia de Santa Catarina, 1994. 115 p.
- FAO. **Tabla de Composición de Alimentos da America Latina**. VA: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002. Disponível em: <<http://www.rlc.fao.org/bases/alimento/>>. Acesso em: 13 de dezembro de 2003.
- FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. **Microbiologia dos Alimentos**. São Paulo: Atheneu, 1996. 182 p.
- GAST, K. L. B.; FLORES, R. Precooling Produce: Fruits & Vegetables. **Postharvest Management of Commercial Horticultural Crops**. Cooperative Extension Service, Kansas State University. Publ. n. MF-1002, 1991.
- GEANKOPLIS, M. R. A. **Transport Processes and Unit Operations**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1993. 921 p.
- 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.
- HE, S. Y.; LI, Y. F. Theoretical Simulation of Vacuum Cooling of Spherical Foods. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, p. 1489-1501, 2003.
- HOUSKA, M.; LANDFELD, A.; ZHANG, Z.; SUN, D. W. Vacuum Cooling of Meat for Catering Systems. In: **21º IIR International Congress of Refrigeration**, Washington, DC USA, p. ICR0635, 2003a.
- HOUSKA, M.; PODLOUCKÝ, S.; ZITNÝ, R.; GRÉE, R.; SESTÁK, J.; DOSTÁL, M.; BURFOOT, D. Mathematical Model of the Vacuum Cooling of Liquids. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 339-348, 1996.

- HOUSKA, M.; SUN, D. W.; LANDFELD, A.; ZHIHANG ZHANG. Experimental Study of Vacuum Cooling of Cooked Beef in Soup. **Journal of Food Engineering**, v. 59, p. 105-110, 2003b.
- JACKSON, L.; MAYBERRY, K. S.; LAEMMLEN, F.; KOIKE, S.; SCHULBACH, K.; CHANEY, W. Leaf Lettuce Production in California. **Vegetable Production Series**, Division of Agriculture and Natural Resources, University of California. Publ. n. 7216, 1996.
- JOBLING, J. Correct Cool Chain Management is Essencial for all Fruit and Vegetables. **Sidney Postharvest Laboratory Information Sheet**, Food Science Australia, 2001.
- KADER, A. A. **Postharvest Technology of Horticultural Crops**. 2<sup>nd</sup> Edition, Cooperative Extension Unit of California Division of Agriculture and Natural Resources. Universidade da Califórnia, Publ. 3311, 1992. 295 p.
- KEMBLE, J. M.; DANGLER, J. M. **Commercial Sweet Corn Handling**. Alabama Cooperative Extension System, ANR584, Alabama A&M and Auburn Universities, 2001.
- LANDFELD, A.; HOUSKA, M.; KÝHOS, K.; JIANG-QIBIN. Mass Transfer Experiments on Vacuum Cooling of Selected Pre-cooked Solid Foods. **Journal of Food Engineering**, v. 52, p. 207-210, 2002.
- 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.
- MAYBERRY, K. S. Sample Cost to Establish and Produce Bell Peppers. **Imperial County Vegetable Crops Guidelines**, UC Cooperative Extension, 2000.
- MC DONALD, K.; SUN, D. W. Vacuum Cooling Technology for the Food Processing Industry: a Review. **Journal of Food Engineering**, v. 45, p. 55-65, 2000.

- MC DONALD, 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.
- MC DONALD, 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.
- MC DONALD, 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.
- MC DONALD, 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.
- MC DONALD, 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.
- PARDI, M. C.; SANTOS, I. A.; SOUZA, E. R.; PARDI, H. S. **Ciência, Higiene e Tecnologia da Carne**. Goiânia: UFG, 2001. 624 p.
- 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.
- RENNIE, T. J.; VIGNEAULT, C.; RAGHAVAN, G. S. V.; AMESSE, Y.; DEELL, J. Effect of Vacuum Cooling on Precooling of Lettuce. **Agriculture and Agri-Food Canada Research Summary 1999-2000**. Canada, 2002.
- SANDERS, D. C. Lettuce Production. **Horticulture Information Leaflet**. NC State University, n. 11, 2001.

- SARGENT, S. **Handling Florida Vegetables: Cauliflower**. Institute of Food and Agriculture Sciences, University of Florida. Document SS-VEC924, 1999.
- SARLÉ, J. G. El Frío y los Alimentos. In: **Ponencia del “II Curs D’Especialització sobre Disseny D’Instal·lacions Frigorífiques en la Indústria Agroalimentària”**, Universitat de Lleida, Espanha, 1999.
- 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, n. 6, 1531-1535, 1551, 1990.
- SHANMUGASUNDARAM, S.; KALB, T. **Suggested Cultural Practices for Onion**. AVRDC Training Guide, Asian Vegetable Research and Development Center, Taiwan, 2001.
- SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. **Introduction to Food Engineering**. London, UK: Academic Press, 2001. 599 p.
- 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.; HU, Z. CFD predicting the Effects of various Parameters on Core Temperature and Weight Loss Profile of Cooked Meat during Vacuum Cooling. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 34, p. 111-127, 2002.
- SUN, D. W.; HU, Z. CFD Simulation of Coupled Heat and Mass Transfer through Porous Foods during Vacuum Cooling Process. **International Journal of Refrigeration**, v. 26, p. 19-27, 2003.
- SUN, D. W.; MC DONALD, K. Thermal Properties of Cooked Beef as Affected by Vacuum Cooling and Conventional Cooling. In: **21º IIR International Congress of Refrigeration**, Washington, DC USA, p. ICR0439, 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.
- SUN, D. W.; WANG, L. Experimental Investigation of Performance of Vacuum Cooling for Commercial Large Cooked Meat Joints. **Journal of Food Engineering**, *In press.*, 2003.
- SUSLOW, T. **Postharvest Handling for Organic Crops**. University of California: Division of Agriculture and Natural Resources. Publ. n 7254, 2000.
- TAMBUNAN, A. H.; SAGARA, Y.; SEO, Y. Image Analysis for Precise Study on Temperature Distribution during Vacuum Cooling of Lettuce. In: **International Conference on Engineering and Technological Sciences – ICETS2000**, Beijing, China, p. 223-228, 2000.
- TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. New York, USA: Chapman & Hall, 1991. p. 398-436. cap. 10.
- 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.
- WANG, L.; SUN, D. W. Modelling three Conventional Cooling Processes of Cooked Meat by Finite Element Method. **International Journal of Refrigeration**, v. 25, p. 100-110, 2002a.
- 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, 2002b.
- 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, 2002c.

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.

WARRISS, P. D. **Meat Science: an Introductory Text**. Oxon, UK: CABI Publishing, 2000. 311 p.

WOOD, P. C. **Manual de Higiene de los Mariscos**. Zaragoza: Acribia, 1979. 79 p.

ZHANG, Z.; SUN, D. W. Experimental Study on Temperature and Weight Loss Profiles of Vacuum Cooling of Sliced Cooked Carrot. In: **21º IIR International Congress of Refrigeration**, Washington, DC USA, p. ICR0470, 2003.

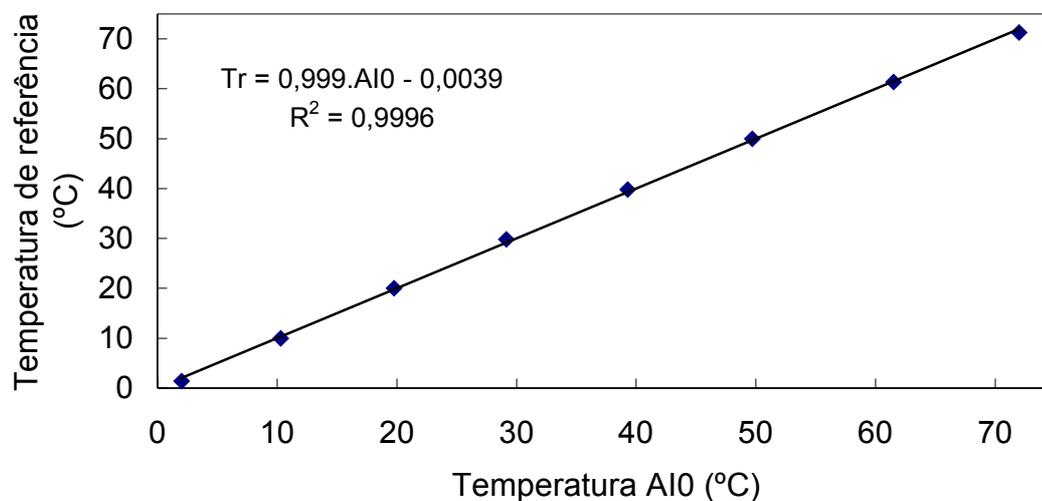
**APÊNDICE A – Curvas de Calibração dos Sensores de Temperatura**

Figura 36 – Curva de calibração do termopar AI0.

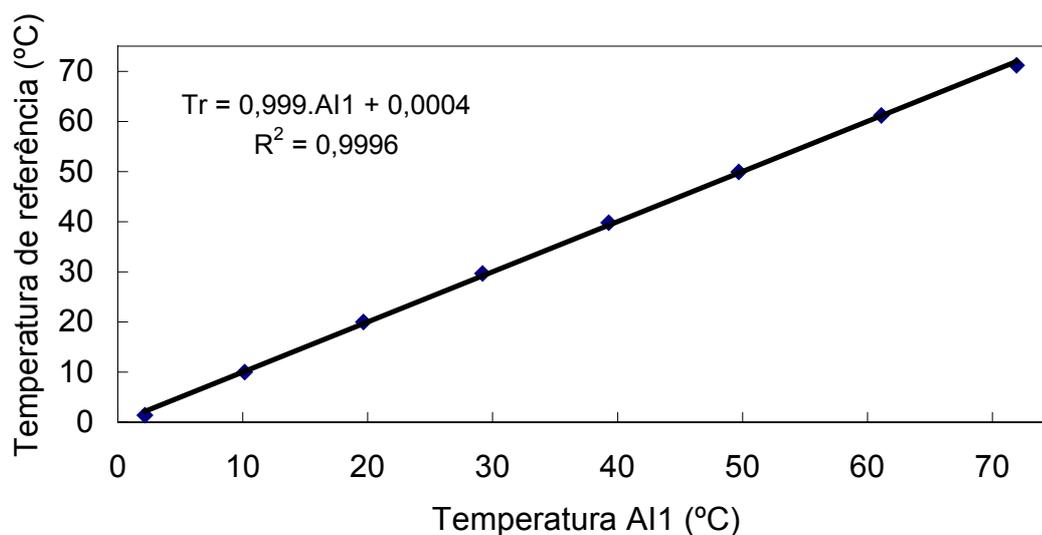


Figura 37 – Curva de calibração do termopar AI1.

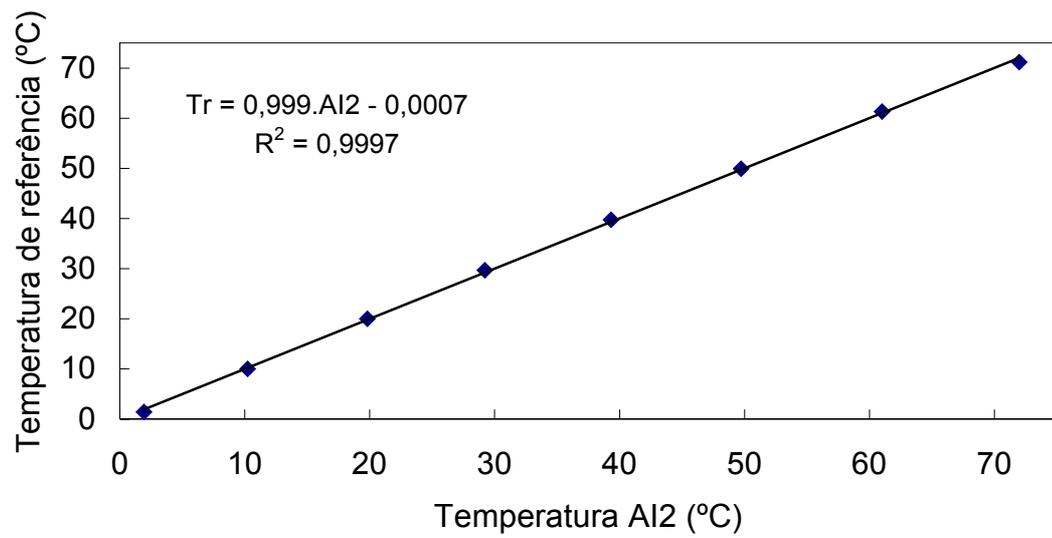


Figura 38 – Curva de calibração do termopar AI2.

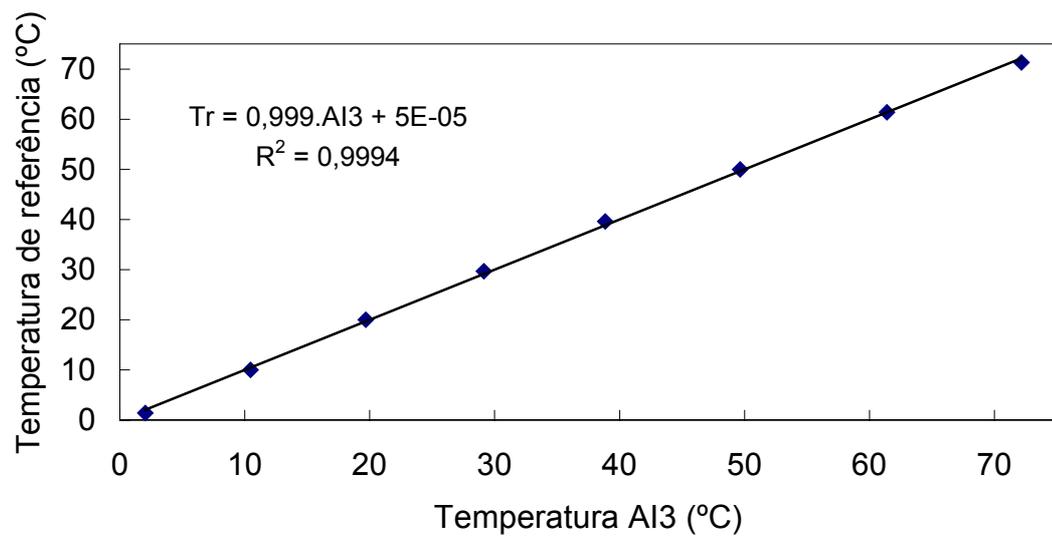


Figura 39 – Curva de calibração do termopar AI3.

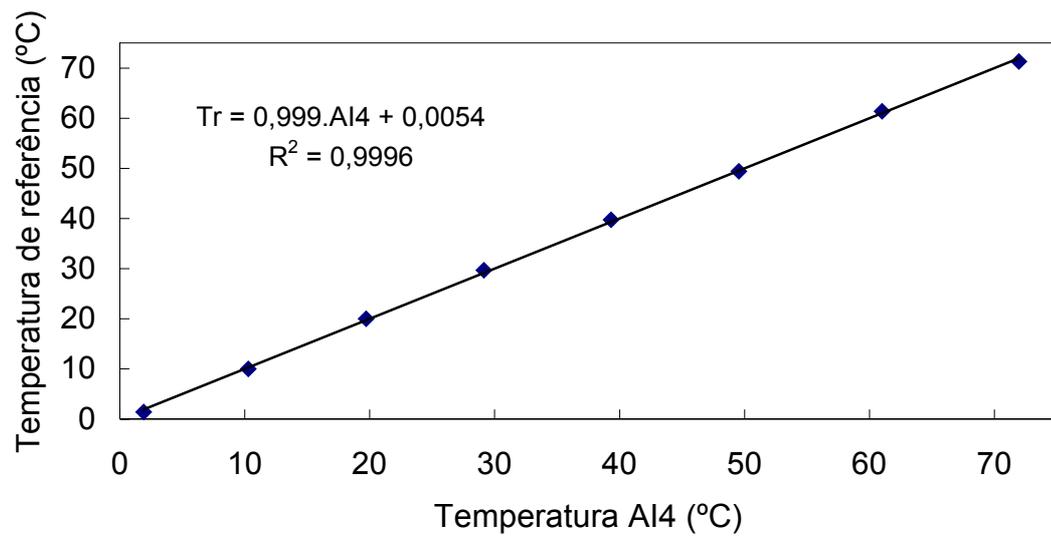


Figura 40– Curva de calibração do termopar AI4.