

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Estudo das Propriedades Físicas de Polpas e  
Néctares de Pequenos Frutos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Daiana de Souza

Porto Alegre

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

# **Estudo das Propriedades Físicas de Polpas e Néctares de Pequenos Frutos**

Daiana de Souza

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.

**Orientadoras:**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ligia Damasceno Ferreira Marczak

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Isabel Cristina Tessaro

**Porto Alegre**

**2008**

*À minha amada família,  
Meus pais, Wilmar e Luíza, pelo apoio incondicional,  
Meu irmão, Tiago, pelos ensinamentos e pela amizade,  
Meu marido, Everton, pelo respeito e compreensão,  
Meu filho, João Pedro, pelo amor e carinho.*

### ***Agradecimentos***

*Às queridas Professoras Lígia e Isabel, pela presença e estímulo constantes, pela paciência e amizade, que tornaram tão agradável a tarefa de construção deste trabalho.*

*À amiga Taci, pelo auxílio do desenvolvimento dos experimentos.*

*Aos amigos do Laboratório, Aline e Maurício, cujas sugestões foram fundamentais na realização dos experimentos.*

*Aos técnicos do DEQUI, Fernando e Sirley, pelo auxílio em todos os momentos.*

*Aos demais professores, colegas e funcionários do DEQUI, pelo incentivo e carinho prestados ao longo da realização deste trabalho.*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFRGS e ao CNPq, pelo apoio contínuo.*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Estudo das Propriedades Físicas de Polpas e Néctares de Pequenos Frutos*, elaborada por Daiana de Souza, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Jacqueline Biancon Copetti

---

Prof. Dr. Javier Telis-Romero

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Talita Furlanetto Mendes

## Resumo

A produção brasileira dos pequenos frutos morango, amora, framboesa e mirtilo vem sendo incrementada nos últimos vinte anos devido ao interesse do consumidor por estes frutos, sobretudo graças às suas propriedades nutraceuticas. O processamento industrial destes frutos, para a obtenção de sucos e polpas, é uma alternativa para minimizar as perdas decorrentes da alta perecibilidade intrínseca aos mesmos. Para a obtenção de sucos e polpas de pequenos frutos com alta qualidade nutricional e sensorial, há a necessidade de se conhecer o comportamento das propriedades físicas destes produtos nas condições de processo, já que elas são de fundamental importância no projeto, otimização, simulação e automação das operações unitárias envolvidas no processamento industrial. A predição teórica destas propriedades não traz bons resultados, pois a estrutura física e composição química destes alimentos são bastante variáveis, sendo a experimentação a melhor alternativa para este fim. O objetivo deste trabalho é determinar as propriedades massa específica, condutividade elétrica, difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica de polpas e néctares de morango, framboesa, mirtilo e amora. Este estudo envolveu a variação da temperatura e da composição dos produtos, dada pela adição de açúcar aos mesmos em diversas proporções e pela variação do teor de polpa na formulação dos néctares. As polpas e os néctares foram processados em escala de bancada, a partir de frutos congelados. O teor de açúcar adicionado aos produtos variou de 0 a 10% e o teor de polpa dos néctares formulados variou de 25 a 100%. As massas específicas foram determinadas pelo método picnométrico, na faixa de 30 a 80°C; as difusividades térmicas, pelo método baseado na solução da difusão de calor em um cilindro longo, na faixa de 25 a 70°C; as condutividades elétricas, por condutivimetria, na faixa de 30 a 80°C; os calores específicos, pelo método de misturas modificado, a 30°C; e a condutividade térmica, a partir do conhecimento das demais propriedades. A partir dos dados obtidos, foram ajustados uma série de modelos quadráticos de regressão múltipla para a predição das propriedades destes produtos em função da temperatura, do teor de açúcar adicionado aos produtos e do teor de polpa empregado, quando na elaboração dos néctares. Estes modelos, em sua maioria, apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,98.

**Palavras-chave:** pequenos frutos, néctares, polpas de frutas, propriedades físicas, condutividade elétrica.

# Abstract

The Brazilian production of strawberry, blackberry, red raspberry and blueberry has been increasing in the last twenty years mainly due to the interest in their nutraceutical properties. These small fruits have a short shelf life, and the industrial processing for the production of juices and purées is an alternative for this limitation. For the production of small fruits juices and purées with high nutritional and sensorial quality, is necessary to know the behavior of the physical properties of these products in the process conditions, since this knowledge is fundamental in the design, optimization, simulation and automation of the units operations for these industrial processes. Since the physical structure and chemical composition of these foods change very much, the theoretical prediction of their properties does not give good results and the experimentation is the only alternative. The objective of this work is to determine physical properties of purées and nectars of strawberry, red raspberry, blueberry and blackberry such as density, electrical conductivity, thermal diffusivity, specific heat and thermal conductivity. This study was carried out varying the temperature and the composition of the products, by adding sugar and changing pulp content in the formulation of the nectars. The pulps and the nectars were processed in a bench scale experiments, from frozen fruits. The sugar content added to the products varied between 0 and 10% and the pulp content of formulated nectars varied between 25 and 100%. The density was determined by the picnometric method, between 30 and 80°C; the thermal diffusivity was obtained using the solution of the heat diffusion in a long cylinder, between 25 and 70°C; the electrical conductivity was determined with a conductivity meter, between 30 and 80°C; the specific heat was measure through the modified mixtures method, at 30°C; and the thermal conductivity, from the knowledge of the other properties. Many multiple regression quadratic models for the prediction of these properties as a function of the temperature, the sugar content added to the products and the pulp concentration have been adjusted. Most of these models have presented correlation coefficients higher than 0,98.

**Key-words:** small fruits, nectars, fruit purées, physical properties, electrical conductivity.

# Sumário

<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>Os Pequenos Frutos – <i>Berries Fruits</i> .....</b>	<b>6</b>
2.1 Fundamentos Teóricos .....	6
2.1.1 Mercado .....	7
2.1.2 Caracteres Organolépticos .....	8
2.1.3 Composição Química e Propriedades Nutracêuticas .....	10
2.1.4 Fisiologia Pós-Colheita e Armazenamento .....	13
2.2 Metodologia .....	17
2.2.1 Aquisição dos Frutos .....	17
2.2.2 Caracterização dos Frutos .....	18
2.2.3 Análise dos Dados.....	18
2.3 Resultados .....	18
<b>Processamento de Néctares e Polpas de Frutas .....</b>	<b>20</b>
3.1 Fundamentos Teóricos .....	20
3.1.1 Aspectos de Legislação.....	20
3.1.2 Mercado de Sucos, Néctares e Polpas de Frutas.....	22
3.1.3 Processamento de Polpas de Frutas e Néctares .....	24
3.2 Metodologia de preparo das polpas e dos néctares .....	31
3.2.1 Formulações .....	31
3.2.2 Processamento das Polpas .....	32
3.2.3 Processamento dos Néctares .....	34
3.2.4 Caracterização dos Produtos .....	35
3.2.5 Análise dos Dados.....	35
3.3 Resultados .....	36
<b>Massa Específica.....</b>	<b>37</b>
4.1 Fundamentos Teóricos .....	37
4.1.1 Definições e Aplicações .....	37
4.1.2 Técnicas de Determinação da Massa Específica .....	38
4.1.3 Correlações Empíricas e Dados da Literatura.....	40
4.1.4 Massa Específica de Líquidos Impregnados com Bolhas de Ar.....	41
4.1.5 Estimativa da massa específica de ar em função da temperatura e da umidade relativa .....	42
4.2 Metodologia .....	47
4.2.1 Calibração dos picnômetros .....	47
4.2.2 Procedimento Experimental .....	48
4.2.3 Cálculo da Massa Específica .....	48
4.2.4 Análise dos Dados e Ajuste dos Modelos.....	48
4.3 Resultados e Discussão.....	49



4.3.1 Massa específica das polpas em função da temperatura.....	49
4.3.2 Massa específica das polpas em função da temperatura e do teor de açúcar adicionado .....	54
4.3.3 Comparação entre as polpas dos diferentes frutos .....	55
4.3.4 Determinação da fração gasosa das polpas.....	57
4.3.5 Massa específica dos néctares.....	58
4.4 Conclusão .....	59
<b>Condutividade Elétrica .....</b>	<b>61</b>
5.1 Fundamentos Teóricos .....	61
5.1.1 Definições e Aplicações .....	61
5.1.2 Técnicas de Determinação da Condutividade Elétrica.....	64
5.1.3 Correlações Empíricas e Dados da Literatura.....	65
5.2 Metodologia .....	68
5.2.1 Procedimento Experimental .....	68
5.2.2 Análise dos Dados e Ajuste dos Modelos.....	68
5.3 Resultados e Discussão.....	69
5.3.1 Condutividade elétrica das polpas e dos néctares em função da temperatura.....	69
5.3.2 Comportamento da condutividade elétrica dos produtos devido à diluição .....	75
5.3.3 Condutividade elétrica dos produtos em função do teor de polpa, o teor de açúcar e a temperatura.....	76
5.3.4 Comparação entre as condutividades elétricas dos diferentes frutos .....	77
5.4 Conclusão .....	79
<b>Difusividade Térmica.....</b>	<b>81</b>
6.1 Fundamentos Teóricos .....	81
6.1.1 Definições e Aplicações .....	81
6.1.2 Técnicas de Determinação da Difusividade Térmica.....	83
6.1.3 Correlações Empíricas e Dados da Literatura.....	92
6.2 Metodologia .....	97
6.2.1 Procedimento Experimental .....	97
6.2.2 Cálculo da Difusividade Térmica .....	100
6.2.3 Validação do Experimento.....	101
6.2.4 Análise dos Dados.....	102
6.3 Resultados e Discussão.....	103
6.3.1 Difusividade térmica aparente das polpas em função da temperatura e do teor de açúcar adicionado.....	103
6.3.2 Difusividade térmica dos néctares.....	106
6.4 Conclusão .....	106
<b>Calor Específico .....</b>	<b>108</b>
7.1 Fundamentos Teóricos .....	108

7.1.1 Definições e Aplicações .....	108
7.1.2 Técnicas de Determinação do Calor Específico .....	109
7.1.3 Correlações Empíricas e Dados da Literatura.....	113
7.2 Metodologia .....	115
7.2.1 Procedimento Experimental .....	115
7.2.2 Cálculo do Calor Específico .....	118
7.2.3 Validação do Experimento.....	119
7.2.4 Análise dos Dados.....	119
7.3 Resultados e Discussão.....	120
7.3.1 Variação do calor específico aparente das polpas com o teor de açúcar adicionado .....	120
7.3.2 Calor específico dos néctares.....	122
7.4 Conclusão .....	123
<b>Condutividade Térmica .....</b>	<b>124</b>
8.1 Fundamentos Teóricos .....	124
8.2 Metodologia .....	126
8.3 Resultados e Discussão.....	127
8.3.1 Condutividade térmica aparente das polpas .....	127
8.3.2 Variação da condutividade térmica aparente das polpas com o teor de açúcar adicionado .....	128
8.4 Conclusão .....	129
<b>Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>130</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>132</b>
<b>Correlações para Massa Específica de Sucos e Polpas .....</b>	<b>138</b>
<b>Correlações para Condutividade Elétrica de Frutos, Sucos e Polpas .....</b>	<b>142</b>
<b>Correlações para Calor Específico de Sucos e Polpas .....</b>	<b>144</b>
<b>Dados complementares - Massa específica .....</b>	<b>146</b>
A.1 Volumes Reais dos Picnômetros .....	146
A.2 Resultados da determinação da massa específica das polpas .....	147
A.3 Gráficos estatísticos.....	149
A.4 Superfícies de Resposta e Curvas de Contorno .....	153
<b>Dados complementares - Condutividade Elétrica.....</b>	<b>156</b>
B.1 Resultados da determinação da condutividade elétrica das polpas e dos néctares .....	156
B.2 Gráficos estatísticos .....	159
<b>Dados complementares - Difusividade Térmica.....</b>	<b>161</b>

C.1 Calibração dos sensores de temperatura .....	161
C.2 Resultados da determinação da difusividade térmica de água, aditivada com 0,3% de goma xantana.....	162
C.3 Resultados da determinação da difusividade térmica aparente das polpas.....	163
C.4 Gráficos estatísticos.....	164
C.5 Superfícies de Resposta e Curvas de Contorno .....	166
<b>Dados complementares - Calor Específico .....</b>	<b>168</b>
D.1 Capacidade calorífica do calorímetro.....	168
D.2 Resultados da determinação do calor específico aparente das polpas ...	169
D.4 Gráficos dos modelos .....	171
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xvi</b>
<b>Lista de Símbolos .....</b>	<b>xviii</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Fotografias dos frutos <i>in natura</i> relativos ao presente trabalho (a) Morango, (b) Amora-preta, (c) Mirtilo, (d) Framboesa vermelha.....	10
<b>Figura 2.2:</b> Estrutura química das antocianinas. Fonte: Malacrida e Motta (2006).....	12
<b>Figura 3.1:</b> Fluxograma simplificado do processamento de diversos tipos de polpas de fruta para armazenamento à temperatura ambiente ou sob congelamento. Fonte: Adaptado de Silva (1995); Vendruscolo e Vendruscolo (2005); Lima <i>et al.</i> (2002) e Toralles e Vendruscolo (2007).....	25
<b>Figura 3.2:</b> Fluxograma simplificado do processamento de néctares para armazenamento à temperatura ambiente. Fonte: Adaptado de Silva (1995); Maeda <i>et al.</i> (2006) e Lima <i>et al.</i> (2002).....	29
<b>Figura 3.3:</b> Fluxograma do processamento das polpas em escala de bancada.....	33
<b>Figura 3.4:</b> Fotografia do sistema para desaeração das polpas. ....	34
<b>Figura 3.5:</b> Fluxograma simplificado do processamento dos néctares em escala de bancada.....	35
<b>Figura 4.1:</b> Picnômetro de tampa perfurada. ....	39
<b>Figura 4.2:</b> Representação do sistema físico composto por um líquido viscoso impregnado com bolhas de ar.....	42
<b>Figura 4.3:</b> Massa específica de ar úmido como uma função da temperatura tendo-se a umidade relativa como parâmetro de curva, entre o ar seco (curva superior, RH=0%) e condições de saturação (curva inferior, RH=100%). Fonte: Tsilingiris (2008). ....	46
<b>Figura 4.4:</b> Massa específica aparente das polpas e da água em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de açúcar adicionado; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango. ....	50
<b>Figura 4.5:</b> Massa específica das polpas desaeradas, tendo-se como parâmetro de curva o teor de.....	51
açúcar adicionado; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango. ....	51
<b>Tabela 4.2:</b> Parâmetros <i>a</i> , <i>b</i> , e <i>c</i> dos modelos para a massa específica aparente e da massa específica [kg m <sup>-3</sup> ] em função da temperatura, e os respectivos coeficientes de correlação.....	53
<b>Figura 4.6:</b> Comparação entre as massas específicas das polpas dos frutos em estudo, sem açúcar; (a) massa específica aparente das polpas, (b) massa específica das polpas desaeradas.....	55
<b>Figura 5.1:</b> Desenho esquemático da sonda para medição da condutividade elétrica. ....	64
<b>Figura 5.2:</b> Fotografia da sonda utilizada para medição da condutividade elétrica de néctares e polpas e sua especificação fornecida pelo fabricante. ....	68
<b>Figura 5.3:</b> Condutividade elétrica das polpas e néctares de framboesa em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de polpa do produto; (a) sem açúcar, (b) com 5% de açúcar e (c) com 10% de açúcar.....	70
<b>Figura 5.4:</b> Condutividade elétrica das polpas e néctares de amora em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de polpa do produto; (a) sem açúcar, (b) com 5% de açúcar e (c) com 10% de açúcar.....	71

<b>Figura 5.5:</b> Condutividade elétrica das polpas e néctares de mirtilo em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de polpa do produto; (a) sem açúcar, (b) com 5% de açúcar e (c) com 10% de açúcar.....	72
<b>Figura 5.6:</b> Condutividade elétrica das polpas e néctares de morango em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de polpa do produto; (a) sem açúcar, (b) com 5% de açúcar e (c) com 10% de açúcar.....	73
<b>Figura 5.7:</b> Condutividades elétricas das polpas sem açúcar em função da temperatura, onde o parâmetro de curva é o tipo de fruto e resultados de Castro (2003) para polpa de morango.....	77
<b>Figura 6.1:</b> Esquema do aparato de Dickerson.....	86
<b>Figura 6.2:</b> Evolução das temperaturas com o tempo, na superfície externa e no centro do aparato de Dickerson para a determinação da difusividade térmica de materiais. Fonte: Moura <i>et al.</i> (2003).....	86
<b>Figura 6.3:</b> Cilindro considerado no método de Baïri, Laraqi e García de María (2007). Fonte: Baïri, Laraqi e García de María (2007). ....	87
<b>Figura 6.4:</b> Evolução temporal da temperatura (centro da célula) para uma amostra de água, em um experimento de resfriamento. Fonte: Baïri, Laraqi e García de María (2007).....	90
<b>Figura 6.5:</b> Evolução temporal da temperatura adimensional para uma amostra de água. Fonte: Baïri, Laraqi e García de María (2007). ....	91
<b>Figura 6.6:</b> Difusividade térmica aparente de géis de alginato impregnados com bolhas de ar em função da temperatura. Fonte: Sakiyama <i>et al.</i> (1999).....	97
<b>Figura 6.7:</b> Fotografias das células para determinação da difusividade térmica; (a) célula aberta, sensor de temperatura preso ao fio de nylon, (b) célula fechada com as rolhas de silicone nas extremidades e o conector de fios prendendo o fio de nylon em uma das extremidades da célula. ....	98
<b>Figura 6.8:</b> Fotografia do banho de medição com isolamento térmico. ....	99
<b>Figura 6.9:</b> Exemplo de curva de penetração de calor na célula obtida experimentalmente. ....	100
<b>Figura 6.10:</b> Exemplo de curva da temperatura adimensional linearizada, obtida nos experimentos de determinação da difusividade térmica. ....	101
<b>Figura 6.11:</b> Difusividade térmica da água em função da temperatura; dados da literatura (INCROPERA, 2003) e resultados obtidos durante a validação do experimento. ....	102
<b>Figura 6.12:</b> Difusividade térmica das polpas de mirtilo, morango, amora e framboesa sem açúcar em função da temperatura; difusividade térmica da água em função da temperatura e modelos de Riedel (1969) e Martens (1980) para um alimento com 85% de umidade. ....	104
<b>Figura 7.1:</b> Fotografia do calorímetro de mistura disposto no 'shaker'.....	116
<b>Figura 7.2:</b> Fotografia do acondicionamento das amostras de polpa em pequenos sacos de PEBD, para a determinação do calor específico.....	117
<b>Figura 7.3:</b> Variação da temperatura do calorímetro com o tempo. Experimento com o produto B-100-10 (Polpa de mirtilo com 9,08% de açúcar). ....	118
<b>Figura 7.4:</b> Calor específico aparente das polpas em função do teor de açúcar adicionado, para a temperatura de 30°C, tendo-se como parâmetro de curva o tipo de produto. ....	121
<b>Figura 8.1:</b> Condutividade térmica aparente das polpas em função do teor de açúcar adicionado, para a temperatura de 30°C, tendo-se como parâmetro de curva o tipo de produto. ....	128

<b>Figura A.1:</b> Gráficos de significâncias dos parâmetros dos modelos de regressão múltipla, para a predição da massa específica das polpas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango ...	149
<b>Figura A.2:</b> Gráficos de significâncias dos parâmetros dos modelos de regressão múltipla, para a predição da massa específica das polpas desaeradas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango .....	150
<b>Figura A.3:</b> Relação entre valores observados <i>vs</i> preditos pelos modelos de regressão múltipla para predição da massa específica de polpas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango ...	151
<b>Figura A.4:</b> Relação entre valores observados <i>vs</i> preditos pelos modelos de regressão múltipla para predição da massa específica de polpas desaeradas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango .....	152
<b>Figura A.5:</b> Massa específica aparente das polpas em função da temperatura e do teor de açúcar; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango. ....	154
<b>Figura A.6:</b> Massa específica das polpas desaeradas em função da temperatura e do teor de açúcar adicionado; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango. ....	155
<b>Figura B.1:</b> Gráficos de significâncias dos parâmetros dos modelos de regressão múltipla, para a predição da condutividade elétrica dos néctares, em função da temperatura, do teor de açúcar adicionado, e do teor de polpa cujos parâmetros são apresentados na Tabela 5.6; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.....	159
<b>Figura B.2:</b> Relação entre valores observados <i>vs</i> preditos pelos modelos de regressão múltipla, para a predição da condutividade elétrica dos néctares, em função da temperatura, do teor de açúcar adicionado e do teor de polpa, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 5.5; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.....	160
<b>Figura C.1:</b> Gráficos de significâncias dos parâmetros dos modelos de regressão múltipla, para a predição da difusividade térmica aparente das polpas, em função da temperatura e do teor de açúcar, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 6.5; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.....	164
<b>Figura C.2:</b> Relação entre valores observados <i>vs</i> preditos pelos modelos de regressão múltipla, para a predição da difusividade térmica aparente das polpas, em função da temperatura e do teor de açúcar, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 6.5; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.....	165
<b>Figura C.3:</b> Superfícies de resposta e curvas de contorno dos modelos para a predição da difusividade térmica aparente das polpas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango. ..	167
<b>Figura D.1:</b> Gráficos de significâncias dos parâmetros do modelo linear, para a predição do calor específico aparente das polpas; (a) Polpa de Amora, (b) Polpa de Mirtilo.....	170
<b>Figura D.2:</b> Relação entre valores observados <i>vs</i> preditos pelo modelo linear para predição do calor específico aparente das polpas; (a) Polpa de Amora, (b) Polpa de Mirtilo.....	170

<b>Figura D.3:</b> Variação do calor específico da polpa de amora em função do teor de açúcar adicionado. ....	171
<b>Figura D.4:</b> Variação do calor específico da polpa de mirtilo em função do teor de açúcar adicionado. ....	171

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1:</b> Composição química de amora, mirtilo, framboesa e morango. ....	11
<b>Tabela 2.2:</b> Resultados de umidade, teor de sólidos solúveis, acidez total titulável, resíduo mineral fixo e teor de sólidos insolúveis para os frutos framboesa, amora, mirtilo e morango utilizados neste estudo.....	19
<b>Tabela 3.1:</b> Classificação das bebidas de frutas segundo a Legislação Brasileira.....	21
<b>Tabela 3.2:</b> Formulações dos produtos testados para cada uma das frutas estudadas. ...	31
<b>Tabela 3.3:</b> Caracterização das formulações das polpas e dos néctares de framboesa, amora, mirtilo e morango em relação ao pH e aos sólidos solúveis totais (TSS)..	36
<b>Tabela 4.1:</b> Massa específica dos principais constituintes dos alimentos. Fonte: Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995). ....	40
<b>Tabela 4.3:</b> Parâmetros <i>a, b, c, d, e</i> e <i>f</i> dos modelos do comportamento da massa específica aparente e da massa específica com a temperatura e com o teor de açúcar adicionado às polpas, e dos coeficientes de correlação e variabilidade. ...	54
<b>Tabela 4.4:</b> Comparação de médias das massas específicas aparentes e das massas específicas das polpas dos diferentes frutos a 30 e 80°C e diferença média relativa ( <i>DMR</i> ) das massas específicas das polpas em relação à massa específica da água. ....	56
<b>Tabela 4.5:</b> Fração gasosa das polpas.....	58
<b>Tabela 5.1:</b> Parâmetros <i>a</i> e <i>b</i> dos modelos da condutividade elétrica [ $\text{mS cm}^{-1}$ ] em função da temperatura para as polpas e néctares de framboesa e mirtilo com os respectivos coeficientes de correlação, $R^2$ .....	74
<b>Tabela 5.2:</b> Parâmetros <i>a</i> e <i>b</i> dos modelos da condutividade elétrica [ $\text{mS cm}^{-1}$ ] em função da temperatura para as polpas e néctares de amora e morango e os respectivos coeficientes de correlação, $R^2$ .....	75
<b>Tabela 5.3:</b> Parâmetros <i>a, b, c, d, e, f, g, h, i,</i> e <i>j</i> dos modelos da condutividade elétrica de néctares em função do teor de polpa, o teor de açúcar e a temperatura, com os respectivos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) e de variabilidade ( <i>CV</i> ). ....	76
<b>Tabela 5.4:</b> Comparação entre os valores de condutividade elétrica das polpas dos quatro frutos, nas temperaturas de 30 e 80°C. ....	78
<b>Tabela 6.1:</b> Resultados experimentais da determinação da difusividade térmica de polpa de <i>Annona muricata</i> L nas diversas faixas de temperaturas analisadas; valores de pH e TSS das polpas ensaiadas. Fonte: Jaramillo-Flores e Hernandez-Sanchez (2000). ....	94
<b>Tabela 6.2:</b> Difusividade térmica dos principais constituintes dos alimentos. Fonte: Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995). ....	96
<b>Tabela 6.3:</b> Temperatura de ambientação, temperatura do banho de medição e temperatura na qual a difusividade térmica é determinada, nos quatro experimentos de difusividade térmica realizados. ....	100
<b>Tabela 6.4:</b> Difusividade térmica das polpas de framboesa, amora, mirtilo e morango com 0, 5 e 10% de açúcar e difusividade térmica da água (determinada experimentalmente) em função da temperatura. ....	103
<b>Tabela 6.5:</b> Parâmetros <i>a, b, c, d, e</i> e <i>f</i> , $R^2$ e <i>CV</i> dos modelos da difusividade térmica aparente como função da temperatura e com o teor de açúcar adicionado às polpas.....	105



<b>Tabela 7.1:</b> Modelos para o cálculo do calor específico dos principais constituintes dos alimentos. Fonte: Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995).....	114
<b>Tabela 7.2:</b> Calor específico de polpa de morango em função do conteúdo de água. Fonte: Alvarado (1991), citado por Rahman (1995).....	115
<b>Tabela 7.3:</b> Dados de $C_p$ da água a partir da literatura e os obtidos neste trabalho como função da temperatura para os ensaios de validação do experimento.....	119
<b>Tabela 7.4:</b> Médias do calor específico aparente das polpas em função do teor de açúcar adicionado, para a temperatura de 30°C.....	121
<b>Tabela 7.5:</b> Parâmetros $a$ , $b$ , $R^2$ e $CV$ para os modelos da variação do calor específico das polpas com o teor de açúcar adicionado [ $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ].....	122
<b>Tabela 8.1:</b> Condutividades térmicas, $k$ [ $Wm^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ], em função do teor de sólidos solúveis (TSS) para as polpas estudadas e para outros sucos, a 30°C.....	127
<b>Tabela AA.1:</b> Correlações para predição da massa específica de sucos, publicadas até 1993 .....	139
<b>Tabela AA.2:</b> Correlações para predição da massa específica de sucos, publicadas após 1993. ....	140
<b>Tabela AA.3:</b> Correlações para predição da massa específica de polpas de fruta .....	141
<b>Tabela BB.1:</b> Correlações para predição da condutividade elétrica de frutos.....	142
<b>Tabela BB.2:</b> Correlações para predição da condutividade elétrica de sucos e polpas..	143
<b>Tabela CC.1:</b> Correlações para predição do calor específico à pressão constante de sucos e polpas .....	145
<b>Tabela A.1:</b> Volumes reais dos picnômetros.....	146
<b>Tabela A.2:</b> Massa específica aparente das polpas. ....	147
<b>Tabela A.3:</b> Massa específica das polpas desaeradas. ....	148
<b>Tabela B.1:</b> Condutividades elétricas das polpas.....	156
<b>Tabela B.2:</b> Condutividades elétricas dos néctares com 75 e 50% de polpa.....	157
<b>Tabela B.3:</b> Condutividades elétricas dos néctares com 25% de polpa. ....	158
<b>Tabela C.1:</b> Equações de correção da temperatura dos termopares tipo T. ....	161
<b>Tabela C.2:</b> Difusividade térmica da água. ....	162
<b>Tabela C.3:</b> Difusividades térmicas das polpas de framboesa e amora.....	163
<b>Tabela C.4:</b> Difusividades térmicas das polpas de mirtilo e morango. ....	163
<b>Tabela D.1:</b> Capacidade calorífica.....	168
<b>Tabela D.2:</b> Calores específicos aparentes das polpas de framboesa e amora.....	169
<b>Tabela D.3:</b> Calores específicos aparentes das polpas de mirtilo e morango. ....	169

# Lista de Símbolos

<i>A</i>	área de seção transversal dos eletrodos [m <sup>2</sup> ] e taxa de elevação da temperatura da água no banho no experimento de Dickerson [°Cmin <sup>-1</sup> ]
<i>a</i>	inclinação da curva ln(θ)=f(t) [s <sup>-1</sup> ]
<i>B</i>	teor de sólidos solúveis [°Brix]
<i>Bi</i>	Número de Biot
<i>C</i>	calor específico [Jkg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
<i>Co</i>	concentração de açúcar (%)
<i>Cp</i>	calor específico à pressão constante [Jkg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
<i>CV</i>	coeficiente de variabilidade (%)
<i>d</i>	densidade
<i>DMR</i>	diferença média relativa (%)
<i>fh</i>	parâmetro de aquecimento [s]
<i>Fo</i>	Número de Fourier
<i>G</i>	taxa de elevação constante da temperatura do banho [°Cmin <sup>-1</sup> ]
<i>H</i>	capacidade calorífica [J°C <sup>-1</sup> ]
<i>h</i>	coeficiente convectivo de troca térmica [Wm <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ]
<i>I</i>	corrente elétrica [A]
<i>j</i>	fator de correção adimensional
<i>J<sub>0</sub></i>	Função de Bessel de primeira espécie de ordem zero
<i>J<sub>1</sub></i>	Função de Bessel de primeira espécie de ordem um
<i>k</i>	condutividade térmica [Wm <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]
<i>ke</i>	condutividade elétrica [Sm <sup>-1</sup> ]
<i>l</i>	comprimento do cilindro finito [m]
<i>L</i>	distância entre os eletrodos [m] e fator de perda de calor para o ambiente, no método de Hwang e Hayakawa [J].
<i>m</i>	massa [kg]
<i>N</i>	nº de observações
<i>P</i>	pressão [kPa]
<i>Po</i>	concentração de polpa [%]
<i>R</i>	constante dos gases ideais [Jkg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ] ou raio do cilindro [m]

$r$	coordenada radial [m]
$r_e$	resistividade do material [ $\Omega\text{m}$ ]
$Res$	resistência elétrica [ $\Omega$ ]
$RH$	umidade relativa [%]
$T$	temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$t$	tempo [s] ou [min]
$T_a$	temperatura inicial extrapolada, obtida a partir da linearização da curva de aquecimento [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$U$	força eletromotriz [V]
$v$	fração volumétrica
$V$	volume [ $\text{m}^3$ ]
$X$	fração mássica
$x$	fração molar ou coordenada cartesiana
$Y_e$	valor experimental
$Y_p$	valor predito pelo modelo

### Símbolos gregos

$\alpha$	difusividade térmica [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ]
$\beta_m$	raiz da função cosseno
$\beta_n$	raiz da função de Bessel
$\xi_m$	raízes positivas da Equação 6.13
$\theta$	temperatura adimensional, definida na Equação 6.12
$\mu$	viscosidade [Pas]
$\rho$	massa específica [ $\text{kgm}^{-3}$ ]

### Subscritos

$0$	inicial
$a$	amostra
$ap$	aparente
$ar$	ar
$c$	carboidrato
$ci$	cinza
$cal$	calculada
$d$	matéria seca
$e$	equilíbrio térmico no calorímetro

<i>exp</i>	experimental
<i>ext</i>	superfície externa
<i>f</i>	final ou fibra
<i>g</i>	gelo
<i>i</i>	componente do alimento
<i>int</i>	centro da célula
<i>k</i>	calorímetro
<i>l</i>	lipídeo
<i>m</i>	mistura de vapor de água puro e ar seco
<i>p</i>	picnômetro vazio ou proteína
<i>pc</i>	picnômetro com a amostra
<i>s</i>	meio de aquecimento
<i>sv</i>	vapor saturado
<i>T</i>	total
<i>v</i>	vapor de água
<i>w</i>	água

# Capítulo 1

## Introdução

O processamento de frutos, quando fundamentado nas demandas do mercado, pode se tornar uma das mais fortes ferramentas para o aproveitamento das potencialidades da fruticultura, pois permite transformar produtos perecíveis em produtos armazenáveis. Além disto, proporciona a realização de negociações de comercialização com maior poder de barganha evitando, em parte, as perdas atuais de frutos, que podem chegar, em alguns casos, de 25 a 30% da produção.

A fruticultura brasileira é atualmente responsável por 10% da produção mundial, estimada em cerca de 300 milhões de toneladas ao ano. Este ramo produtivo tem-se apresentado como uma das atividades mais importantes do setor de alimentos, contribuindo para o desenvolvimento econômico, para a ampliação do mercado interno de frutos frescos e para a industrialização, atingindo vários segmentos como doces, bebidas (sucos e refrigerantes) e polpas. A conservação de frutos, na forma de sucos, polpas e outros produtos, foi desenvolvida para aumentar o oferecimento dos mesmos e para utilização dos excedentes de produção. A polpa de fruta é o produto obtido da parte comestível de frutos, após trituração e/ou despulpamento e preservação sob diversas formas. Sua utilização é quase sempre como matéria-prima para obtenção de outros produtos como néctares, sucos tropicais, geléias, sorvetes e doces.

---

Do grupo dos ‘pequenos frutos’, ou ‘*small fruits*’, ou ‘*berries fruits*’ fazem parte várias espécies, sendo as mais conhecidas no Brasil o morango, a amora, a framboesa e o mirtilo. Estes frutos, de clima temperado e nativos do Hemisfério Norte, têm despertado nos últimos anos a atenção de produtores brasileiros tendo em vista sua associação a propriedades nutraceuticas, por serem ricos em antioxidantes. Esta característica aumentou a curiosidade do consumidor na busca da suplementação alimentar a partir da diversificação da dieta com base em frutos. A conservação pós-colheita destes frutos é relativamente curta, devido à sua alta atividade respiratória e à grande área de exposição, que facilitam a desidratação e o ataque de fungos. O processamento industrial de polpas e néctares de pequenos frutos é uma alternativa para utilização dos frutos não adequados para venda *in natura* bem como para a limitação imposta pela curta vida de prateleira dos mesmos.

O processamento de polpas de frutas e néctares envolve operações de pasteurização, bombeamento, agitação, entre outras. Além destas, o aquecimento ôhmico é outro processo que está sendo muito estudado nas últimas décadas, como uma nova alternativa no processamento térmico de alimentos, com vantagens para alimentos que contenham altos teores de sólidos. A otimização dos processos, bem como o controle adequado da temperatura durante os tratamentos térmicos, é fundamental no processamento de alimentos, tanto do ponto de vista da obtenção de alimentos com qualidades sensorial, nutricional e microbiológicas superiores, quanto no que diz respeito à limitação do consumo de energia, com benefícios ao meio ambiente e com a minimização dos custos de produção. O projeto, simulação, otimização e controle das operações unitárias de processos industriais requerem o conhecimento das propriedades físicas dos alimentos, as quais são escassas na literatura. O interesse em conhecer as propriedades físicas surgiu para modelar as taxas de transferência de quantidade de movimento, calor e massa em alimentos. As primeiras técnicas de análise destes fenômenos utilizavam valores constantes para as propriedades físicas dos alimentos; tais análises, no entanto, apresentavam baixa acuracidade. Hoje em dia, as técnicas numéricas, tais como os métodos dos elementos finitos e dos volumes finitos, estão muito mais desenvolvidas, podendo, sem qualquer dificuldade adicional, considerar as variações das propriedades físicas, as quais possuem valores distintos em função da temperatura, posição e composição do alimento; na modelagem matemática do processo em estudo. Esta melhoria demandou a necessidade do conhecimento mais preciso dos valores das propriedades e de como se alteram no decorrer dos processos de transformação dos

alimentos. A determinação do comportamento das propriedades dos alimentos em função das variáveis de processo e de sua composição, somente pode ser realizada através da experimentação, já que a complexa estrutura física e a variável composição química dos alimentos limitam o uso de modelos teóricos de predição.

O objetivo geral deste trabalho é determinar as seguintes propriedades: massa específica, condutividade elétrica, difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica de polpas e néctares de morango, framboesa, mirtilo e amora, estudando seu comportamento em função da temperatura e da composição dos produtos (dada pela adição de açúcar aos mesmos em diferentes proporções) e em função do teor de polpa na formulação dos néctares. Busca-se, desta forma, proporcionar informações de projeto de processos industriais que se traduzam no uso racional de energia, devido, principalmente, à diminuição dos tempos de processamento, o que se reflete, também, na melhoria da qualidade nutracêutica dos alimentos assim processados, pela diminuição de sobre-processamentos.

Dentro deste contexto, os objetivos específicos deste trabalho são:

- obter néctares e polpas de morango, amora, framboesa e mirtilo; com composições químicas variáveis, a partir de frutos cultivados no Brasil. As diferentes composições são relativas aos diversos tipos de néctares e polpas de frutas disponíveis no mercado, produzidos com outros tipos de frutos;
- determinar experimentalmente a massa específica dos produtos, em função da temperatura e da composição dos mesmos;
- determinar experimentalmente a condutividade elétrica dos produtos, em função da temperatura e da composição dos mesmos;
- determinar experimentalmente a difusividade térmica dos produtos, em função da temperatura e da composição dos mesmos;
- determinar experimentalmente o calor específico dos produtos, em função da composição dos mesmos;

- ajustar modelos matemáticos disponíveis na literatura para predição destas propriedades, em função da temperatura e da composição dos produtos, a partir dos dados experimentais obtidos.
- obter, a partir do conhecimento das demais propriedades, os valores da condutividade térmica dos produtos, em função da composição dos mesmos.

Uma vez que cada uma das propriedades físicas estudadas neste trabalho representa um assunto distinto, optou-se por apresentar a fundamentação teórica, a metodologia experimental empregada, os resultados obtidos e as conclusões de cada propriedade separadamente em um capítulo específico.

O Capítulo 2 trata das principais características dos pequenos frutos, apresentando sua importância para o mercado brasileiro, sua composição química básica e suas peculiaridades de conservação pós-colheita, as quais justificam seu processamento. Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada na caracterização química dos frutos utilizados neste estudo, bem como os resultados obtidos nesta caracterização.

O Capítulo 3 apresenta um estudo teórico sobre o processamento geral de néctares e polpas de polpas, onde inicialmente são formalizados os conceitos de cada um destes produtos, de acordo com a Legislação Brasileira. Na seqüência, são apresentados dados deste mercado, hoje em expansão no Brasil; os processos produtivos destes produtos são destacados, onde são apontadas as principais características de cada uma das operações de processamento. Este capítulo tem por objetivo justificar as condições nas quais as propriedades físicas dos produtos serão determinadas, uma vez que será no projeto e controle destas operações industriais que os modelos matemáticos desenvolvidos poderão ser utilizados. A metodologia empregada no processamento, em escala de bancada, dos néctares e polpas de pequenos frutos é apresentada, bem como sua caracterização físico-química.

Os Capítulos 4, 5, 6, 7 e 8 tratam das propriedades físicas estudadas neste trabalho: massa específica, condutividade elétrica, difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica, respectivamente. Em cada um deles, inicialmente é apresentada a definição da propriedade e suas principais aplicações industriais. Em seguida, são apontados os principais métodos utilizados na determinação experimental de cada uma delas e os



principais modelos matemáticos e dados já disponíveis na literatura para sua predição, aplicados a sucos e polpas de frutas. Na seqüência, é apresentada a metodologia empregada na determinação da referida propriedade para os produtos estudados, bem como os resultados alcançados, os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados para a predição de cada uma destas propriedades e as conclusões.

O Capítulo 9 apresenta as considerações finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Os Pequenos Frutos – *Berries Fruits*

Este capítulo trata dos principais aspectos relacionados aos frutos framboesa, amora, morango e mirtilo. Inicialmente são abordados os fundamentos mercadológicos relacionados a estes frutos. A seguir são apresentados seus principais caracteres organolépticos, bem como sua composição química e propriedades nutracêuticas. Em seguida é abordada a fisiologia pós-colheita destes frutos, e os aspectos relativos ao seu armazenamento, que justificam sua aplicabilidade para o processamento industrial. Por fim, é apresentada a metodologia empregada na aquisição e caracterização físico-química dos frutos utilizados neste estudo, assim como os resultados encontrados.

#### 2.1 Fundamentos Teóricos

Segundo Kotecha e Madhavi (1995), os '*berries*' são delicados frutos de um grupo que compreende diferentes espécies, tais como amoras (*blackberries*), mirtilos (*blueberries*),

---

morangos (*strawberries*), framboesas (*raspberries*), uvas-do-monte (*cranberries*), groselhas (*gooseberries*), passas de Corinto (*currants*), entre outras. Segundo Fachinello *et al.* (1994), citados por Antunes (2002), estes frutos também são designados por 'pequenos frutos' (ou '*small fruits*') pela literatura internacional. Segundo Pagot e Hoffman (2003), freqüentemente novos frutos são inseridos neste grupo, já que há flexibilidade nos conceitos que delimitam tais espécies componentes. Atualmente, a espécie *Vitis rotundifolia* ou muscadínia, já conhecida como pequeno fruto nos Estados Unidos, está aumentando em importância no Brasil, devido às suas características de adaptação a sistemas de produção orgânica e às suas propriedades nutracêuticas.

Estes frutos são aptos tanto para o consumo *in natura*, quanto para serem processados. Eles podem ser enlatados, congelados ou usados na fabricação de sucos, geléias, geleadas ou conservas, sendo que seus sucos são usados em bebidas e sorvetes. Vendruscolo (2004) afirma que os produtos derivados do grupo dos pequenos frutos hoje estão sendo altamente valorizados no mercado internacional. Se no passado estes eram consumidos como uma boa fonte de minerais e riqueza em vitamina C, nos dias de hoje o grande apelo de consumo é devido às suas propriedades nutracêuticas, enquadrando-se no grupo dos alimentos funcionais, isto é, aqueles que, além de nutrir, têm propriedades terapêuticas, ou seja, propriedades de cura para determinadas doenças. A razão do grande interesse é devido à alta concentração de compostos fenólicos do tipo flavonóides existentes nestas espécies.

### **2.1.1 Mercado**

Segundo Pagot e Hoffman (2003), o cultivo de pequenos frutos no Brasil tem despertado a atenção de produtores, comerciantes e consumidores especialmente nos últimos anos. Este fato é resultante da difusão da informação sobre as características e propriedades destas espécies e é consequência direta da globalização dos hábitos de consumo de alimentos, dentre os quais se incluem as frutas. À exceção do morango e, mais recentemente, da amora-preta, a inserção dos pequenos frutos como atividade econômica no Brasil é ainda bastante incipiente e inovadora.

---

Segundo dados da FAO, citada por Pagot e Hoffman (2003), em 2002, a produção mundial dos principais pequenos frutos foi aproximadamente de 3 milhões de toneladas de morangos, 1 milhão de toneladas de groselhas, incluindo as '*cranberries*'; 750 mil toneladas de amoras e framboesas e 190 mil toneladas de mirtilos. O principal produtor de pequenos frutos da América do Sul é o Chile, especialmente com o cultivo de morango, amora-preta, mirtilo, framboesa e groselha, principalmente em função da forte estrutura e singular logística de exportação, facilitando o alcance aos principais mercados consumidores de frutas no mundo. Mais recentemente, a Argentina e o Uruguai têm tido incrementos significativos nas suas áreas de cultivo desses frutos.

Segundo Pagot e Hoffman (2003), o morango é a espécie do grupo dos pequenos frutos com maior área cultivada e maior tradição no cultivo no Brasil, especialmente nas regiões Sudeste e Sul. De todos os pequenos frutos, é o que apresenta maior adaptabilidade, razão pela qual se encontra difundido em regiões de clima temperado a subtropical. A principal área de produção de morangos no Brasil está concentrada nos Estados de Minas Gerais (41,4%), Rio Grande do Sul (25,6%), São Paulo (15,4%), Paraná (4,7%) e Distrito Federal (4%). Estima-se que a área cultivada no Brasil seja de 3.500 ha. Segundo Poltronieri (2003), as agroindústrias têm sido as principais compradoras da amora-preta, para produção de geleadas, geléias, sucos e polpa da fruta para os mais diversos usos. A amora *in natura* não tem conquistado grandes espaços, sendo a principal dificuldade na sua comercialização o seu alto grau de perecibilidade. Segundo Pagot e Hoffman (2003), estima-se que a área cultivada de mirtilo no Brasil situe-se em torno de 20 ha. A cultura do mirtilo tem atraído a curiosidade de muitos produtores; em escala comercial os plantios no Rio Grande do Sul se concentram no Município de Vacaria, com uma área de 13,2 ha, sendo que uma área de 12 ha, pertence à Empresa Italbraz que é pioneira no cultivo, exportando grande parte de sua produção. Quanto à framboesa, os mesmos autores afirmam que o Rio Grande do Sul tem pouca expressão em área, destacando-se novamente a Italbraz que possui uma área de 8 ha, e na Serra Gaúcha, os Municípios de Gramado, Antônio Prado e Farroupilha que possuem pequenos cultivos, totalizando uma área de 0,8 ha.

### 2.1.2 Caracteres Organolépticos

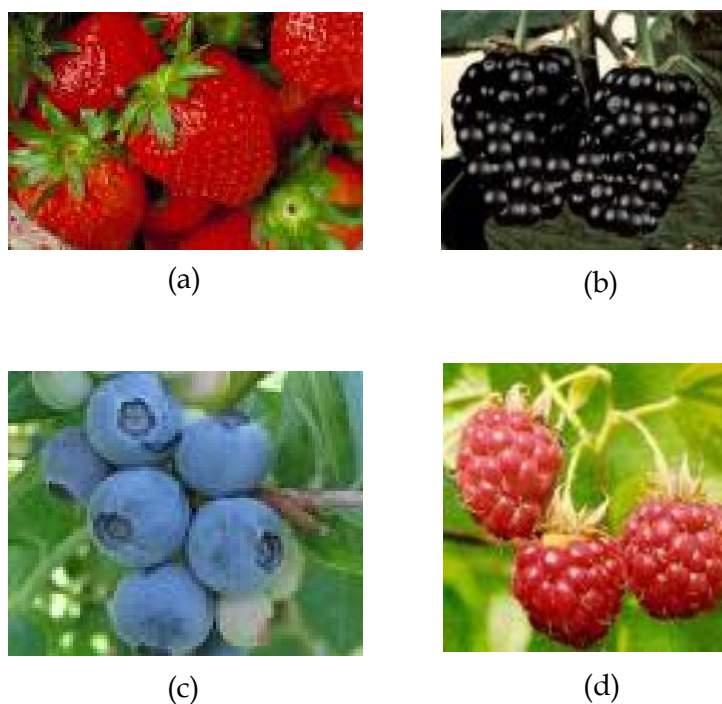
O morango (*Fragaria* spp) é um pseudofruto, de clima temperado, com textura suculenta, sabor e aroma agradáveis. Pode apresentar formato cônico, de cunha alongada, ou irregular, é longo e graúdo, quando proveniente das flores primárias e secundárias, e pequeno quando das flores terciárias e quaternárias. Apresenta sabor subácido, aroma intenso, polpa de textura média e de coloração vermelha clara a intensa, epiderme de coloração branca a vermelha.

A amora-preta (*Rubus* subgênero *Eubatus*) pode ser grande ou pequena, com massa que varia de 4 a 7 g, coloração preta e uniforme, sabor equilibrado em acidez e açúcar, textura consistente e firme, semente pequena, película resistente e aroma ativo. Segundo Poling (1996), citado por Antunes (2002), o fruto verdadeiro da amoreira é denominado de mini drupa ou drupete, no qual existe uma pequena semente, sendo que a sua junção forma o que é chamado de fruto agregado.

O mirtilo (*Vaccinium* spp) é uma baga de aproximadamente 1 cm de diâmetro e massa média de 1,5 g, de cor azul escura, recoberta de cera, com polpa de sabor doce-ácido e com grande número de sementes de pequeno tamanho.

As framboesas (*Rubus* subgênero *Idaeobatus*) apresentam de 1 a 2 cm de diâmetro, sabor variando de doce a ligeiramente ácido e aroma bastante peculiar. Botanicamente, os frutos são do tipo agregado, formados por várias drupas convexas, deprimidas e rugosas, que se destacam facilmente. Segundo Fernandez *et al.* (2003), citados por Raseira *et al.* (2004), a coloração dos frutos é um dos parâmetros utilizados na classificação das framboesas, havendo as vermelhas, pretas, roxas e amarelas. As framboesas amarelas são resultantes de mutação das pretas ou das vermelhas, enquanto as roxas de cruzamentos entre pretas e vermelhas.

A Figura 2.1 apresenta fotografias dos frutos estudados neste trabalho.



**Figura 2.1:** Fotografias dos frutos *in natura* relativos ao presente trabalho (a) Morango, (b) Amora-preta, (c) Mirtilo, (d) Framboesa vermelha.

### ***2.1.3 Composição Química e Propriedades Nutracêuticas***

Os principais componentes químicos da amora, mirtilo, framboesa e morango são apresentados na Tabela 2.1.

Segundo Kotecha e Madhavi (1995), o conteúdo de sólidos solúveis totais varia de 10,2 a 19,7%. Os açúcares são os maiores constituintes solúveis nestes frutos, sendo que os açúcares redutores são a maior parte dos açúcares totais. Na grande maioria das '*berries*', o ácido cítrico é o ácido predominante, a exceção da amora, onde o ácido isocítrico e sua lactona predominam, seguidos pelo ácido málico. A vitamina mais importante presente nas '*berries*' é a Vitamina C; estes frutos também são boas fontes de  $\beta$ -caroteno, tiamina, riboflavina e ácido nicotínico.

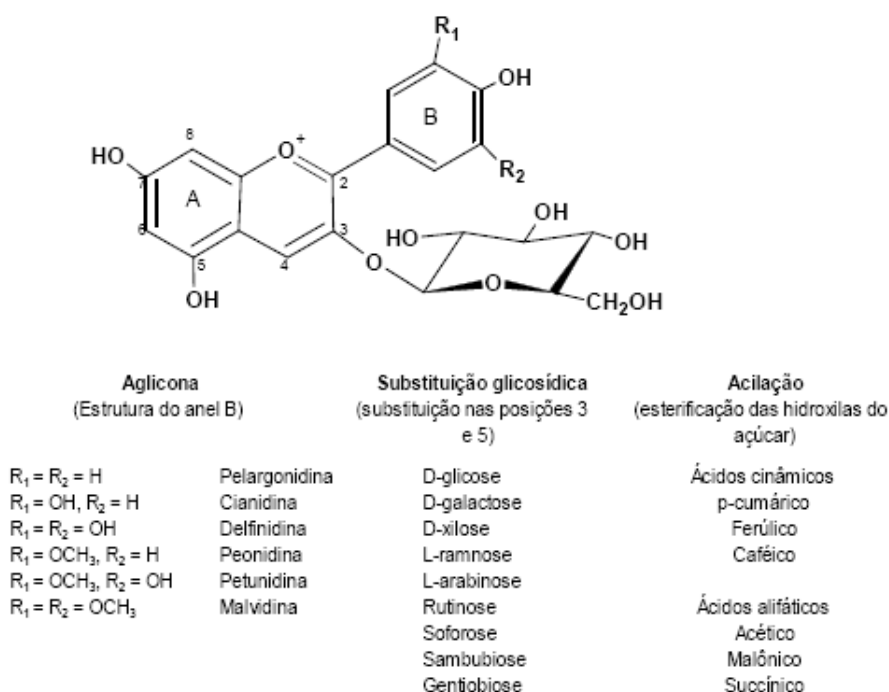
**Tabela 2.1:** Composição química de amora, mirtilo, framboesa e morango.

Constituinte	Amora	Mirtilo	Framboesa	Morango
Umidade (%)	83,6 <sup>e</sup>	82 <sup>e</sup>	89,7 <sup>e</sup>	89 <sup>e</sup>
Carboidratos (%)	12,2 <sup>a</sup>	14 <sup>a</sup>	7,4 <sup>a</sup>	7,34 <sup>b</sup>
Proteínas (%)	1,7 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	0,8 <sup>b</sup>
Gorduras Totais (%)	1,5 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0,6 <sup>a</sup>	0,68 <sup>b</sup>
Cálcio (mg/100g)	32 <sup>a</sup>	6,34 <sup>a</sup>	22 <sup>a</sup>	32 <sup>c</sup>
Ferro (mg/100g)	3,7 <sup>a</sup>	3,7 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	8,4 <sup>c</sup>
Fibra Alimentar (%)	1 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	1,3 <sup>a</sup>	2,18 <sup>b</sup>
Sódio (mg/100g)	0 <sup>a</sup>	6,34 <sup>a</sup>	31,5 <sup>a</sup>	11,2 <sup>c</sup>
Vitamina C (mg/100g)	30 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>	72,8 <sup>a</sup>	76 <sup>d</sup>

Fontes: a- Italbraz (2008); b- Tabela Brasileira da Composição dos Alimentos (2008); c- Furlani *et al.* (1978); d- Berbari *et al.* (1998); e- Obtido por diferença

Nas últimas décadas, inúmeros alimentos de origem vegetal com propriedades funcionais têm sido estudados. Entre os frutos, destacam-se os vermelho-escuros e roxos tais como a amora, framboesa, mirtilo e morango que, além de apresentarem um alto conteúdo de vitamina C e betacaroteno, são ricos em compostos fenólicos, fitoquímicos com um potencial antioxidante muito maior que essas vitaminas. Segundo Salgado (2003), dentre os compostos fenólicos mais importantes encontrados nesses frutos, os flavonóides são os que apresentam maior ação terapêutica. Ligados a vários açúcares, em complexos chamados glicosídeos, essas substâncias são divididas em subgrupos, entre eles os das antocianinas, flavanas, flavanonas, flavonas, flavonóis e isoflavonóides. Inúmeros estudos que investigam esses componentes presentes nos frutos mencionados indicam que eles são capazes de exercer efeitos protetores para o cérebro, retardando o envelhecimento e doenças relacionadas, além de possuírem atividade antioxidante, anticancerígena e antiinflamatória. Kotecha e Madhavi (1995) apresentam o mesmo histórico para estes frutos, afirmando que, além do seu uso em produtos alimentícios, muitas das 'berries', como as amoras e os mirtilos, são populares por suas propriedades medicinais. Os extratos destes frutos já têm sido usados como medicamentos fitoterápicos ou como produtos farmacêuticos há muito tempo. Além das aplicações apresentadas por Salgado (2003), os autores afirmam que estes extratos atuam como antissépticos, diuréticos e anti-hiperglicêmicos; no entanto, muito pouco é conhecido sobre o mecanismo de ação dos compostos ativos.

Os compostos fenólicos ou polifenóis pertencem a uma classe de substâncias químicas que incluem uma grande diversidade de estruturas, simples e complexas, derivados da fenilalanina e tirosina, que possuem ao menos um anel aromático com um ou mais grupamentos hidroxila. Dentre os compostos fenólicos, as antocianinas pertencem a um grupo de pigmentos vegetais hidrossolúveis amplamente distribuídos no reino vegetal. Seu espectro de cor vai do vermelho ao azul, apresentando-se também como uma mistura de ambas as cores resultando em tons de púrpura. Muitas frutas, hortaliças, folhas e flores devem sua atrativa coloração a estes pigmentos, os quais se encontram dispersos nos vacúolos celulares. A Figura 2.2 apresenta a estrutura química das antocianinas.



**Figura 2.2:** Estrutura química das antocianinas. Fonte: Malacrida e Motta (2006).

Segundo Kotecha e Madhavi (1995), a antocianina é o pigmento majoritário nas 'berries'. A framboesa contém principalmente mono e diglicosídeos de cianidina. O morango contém principalmente 3-glicosídeos de cianidina e pelargonidina. As antocianinas presentes na casca de mirtilos são 3-galactosídeos, 3-glicosídeos e 3-arabinosídeos de delfinidina, petunidina, malvidina e cianidina. O processamento térmico e o congelamento afetam significativamente o conteúdo de antocianinas. Outros compostos fenólicos que participam da formação da cor das 'berries' atuam principalmente por efeitos de copigmentação.



Durante a maturação dos frutos, ocorrem mudanças consideráveis nos compostos fenólicos que estão intimamente ligadas a sistemas enzimáticos oxidativos. O ácido elágico é outro composto fenólico encontrado nestes frutos, principalmente no morango; tem sido mostrado que ele é uma substância antimutagênica, anticarcinogênica e um potencial inibidor de indutores químicos do câncer.

Segundo Wang *et al.* (1994), citados por Antunes (2002), o ácido elágico (C<sub>14</sub>H<sub>6</sub>O<sub>8</sub>) foi encontrado em morango, groselha preta, amora-preta, framboesa, entre outras espécies. Este ácido é um hidrólito de elagitanina que ocorre naturalmente, especialmente em frutas e nozes; esta substância tem mostrado propriedades inibidoras contra replicação do vírus HIV. Os estudos de Asanaka *et al.* (1988), citados por Antunes (2002), com ratos sugerem que o elagitanino oenotherin B pode ser usado via oral para inibir o HIV e o vírus do herpes.

Segundo Antunes (2002), também são atribuídas à amora-preta outras propriedades, como o controle de hemorragias em animais e seres humanos, controle da pressão arterial e efeito sedativo, complexação com metais, função antioxidante, ação contra crescimento de insetos, entre outros.

As propriedades antimicrobianas de várias 'berries' são bem conhecidas. Estudos de Konowalchuk e Speirs (1976), citados por Kotecha e Madhavi (1995), têm mostrado que o extrato de morango inativa uma série de vírus entéricos e o vírus do herpes simplex. A inativação do poliovírus tipo 1 por extrato de framboesa também foi reportada pelos autores. Frutos das espécies *Vaccinium* têm propriedades antifúngicas, antibacterianas e antivirais; estes frutos contêm uma gama de compostos fenólicos potencialmente antimicrobianos e altos teores de ácidos orgânicos. Extratos de *cranberry* e mirtilo *high-bush* foram efetivos contra vários fungos, tais como *Penicillium* spp. e *Aspergillus niger*.

#### **2.1.4 Fisiologia Pós-Colheita e Armazenamento**

Segundo Castellano (2004), a principal característica dos frutos e hortaliças é sua condição de tecidos vivos e, como tais, sujeitos a importantes processos fisiológicos e físicos em pós-colheita, tais como a respiração e a transpiração. Como consequência, estão

---

submetidos a mudanças constantes após a colheita, na maioria das vezes, de caráter irreversível. Segundo Lizana (1975), citado por Castellano (2004), algumas dessas mudanças são desejáveis, pois melhoram seus aspectos, sabores e aromas. Entretanto, a maioria não é desejável, pois contribui para a perda da qualidade. As mudanças que ocorrem após a colheita, principalmente nos produtos perecíveis, não podem ser impedidas, podendo apenas ser controladas com certas limitações.

De acordo com Castellano (2004), segundo o modelo de respiração, os frutos podem ser divididos em climatéricos e não-climatéricos. Nos frutos climatéricos ocorre uma diminuição constante da respiração, desde a etapa de crescimento e desenvolvimento, até a colheita. Após, há um aumento significativo da taxa respiratória até atingir um valor máximo que, então, começa a diminuir. Paralelamente, ocorre um aumento na produção de etileno. Estes frutos, em geral, não estão aptos para o consumo quando são colhidos, mas continuam as mudanças na pós-colheita, quando atingem seu ponto ótimo para o consumo.

Nos frutos não-climatéricos verifica-se uma diminuição gradual da respiração, não havendo produção de etileno endógeno nos mesmos níveis dos frutos climatéricos. Neste grupo, os frutos estão maduros na colheita e não melhoram sua qualidade organoléptica após a mesma. Segundo Raseira *et al.* (2004), os pequenos frutos apresentam comportamento típico de frutos com padrão respiratório não climatérico, devendo ser colhidos no momento que atingem a plena maturação na planta.

A senescência é um processo de deterioração que termina de forma natural com a vida funcional de um órgão. Em alguns casos, a senescência é usada como sinônimo de deterioração, mas pode existir deterioração sem que o órgão tenha entrado em senescência. Segundo Lizana (1975), citado por Castellano (2004), no caso do morango, por exemplo, sua senescência por inanição ocorre de forma rápida, tendo o produto uma vida pós-colheita curta, pois o mesmo não pode ser abastecido de nutrientes e água como quando estava na planta.

A transpiração é a perda de água, na forma de vapor, dos tecidos do fruto, sendo importante, pois provoca uma perda qualitativa e quantitativa do produto; pode causar perda de peso, enrugamento, ressecamento e amolecimento do fruto. A perda de peso

depende do tipo de produto, tamanho, composição e estrutura, temperatura do fruto e da temperatura e velocidade de movimentação do ar no ambiente no qual o mesmo se encontra.

Em relação às podridões típicas de pequenos frutos, as principais são causadas pelo fungo *Botrytis cinerea*. Tournas e Katsoudas (2005), realizando um estudo sobre a flora tipicamente contaminante de amoras-pretas, framboesas, mirtilos, morangos (*berries*), de vários tipos de uvas e frutos cítricos frescos, verificaram que, dentre os frutos analisados, os '*berries*' são os mais susceptíveis ao ataque microbiano. Segundo os autores, isto se deve ao fato de serem frutos com películas externas finas e frágeis, com numerosas reentrâncias e protuberâncias, as quais podem facilmente alocar a maior parte dos organismos. Neste estudo, 100% das amoras e framboesas, 97% dos morangos e 95% dos mirtilos apresentaram algum tipo de contaminação fúngica logo após serem colhidos. O menor nível de contaminação foi o dos mirtilos, o que provavelmente ocorreu pelo fato destes frutos possuírem uma película externa mais dura e lisa, impermeável para a maior parte dos fungos. Os microorganismos mais comuns encontrados em '*berries*' foram os fungos *Botrytis cinerea*, conforme mencionado anteriormente, além de *Alternaria*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Fusarium* e *Rhizopus*. Os menos comuns foram *Trichoderma*, *Aureobasidium pullulans* e as leveduras. Finalmente, os autores concluíram que a grande variedade de fungos capazes de crescer e esporular facilmente em '*berries*' era esperada, já que estes são alimentos que contêm altos teores de açúcares e outros nutrientes, além de atividade de água propícia para o desenvolvimento desta classe de microorganismos. Adicionalmente, o baixo pH destes frutos elimina a possibilidade de crescimento bacteriano, o que torna mais fácil o ataque fúngico.

Segundo Castellano (2004), o morango é um fruto muito perecível, com curta vida pós-colheita. Os danos mecânicos, feridas e batidas durante a colheita, transporte e comercialização, deixam o fruto susceptível ao ataque de microorganismos, causando perdas nutritivas, qualitativas e econômicas. Além disso, segundo Ronque (1998), citado por Castellano (2004), devido ao seu tamanho, o morango apresenta grande superfície exposta para a transpiração, não possuindo camada epidérmica protetora que possa dificultar a perda de água e, por ser um fruto com alto teor de umidade (89,9%), tem uma grande tendência à desidratação pós-colheita. Segundo Gonçalves *et al.* (2004), um dos principais problemas que ocorrem com os frutos de pequeno porte é a perda de água, levando à perda

de peso e à depreciação da qualidade do produto. Segundo Kotecha e Madhavi (1995), os morangos devem ser resfriados com ar forçado na faixa de -0,6 a 0°C com 90-95% de umidade relativa para estender sua vida de prateleira por até uma semana.

Morris *et al.* (1981), citados por Antunes (2002), mencionam que, devido à estrutura frágil e alta taxa respiratória de frutos de amoreira-preta, sua vida pós-colheita é relativamente curta. Estes mesmos autores citam Clark (1992) quando relatam que a firmeza do fruto colhido influencia na vida de prateleira, uma vez que estes podem ser facilmente danificados no manuseio, facilitando a infecção por patógenos. Clark e Moore (1990), citados por Antunes (2002), trabalhando com *cultivares* eretas de amoreira-preta, mantiveram os frutos com qualidade durante 7 dias após a colheita à temperatura de 5°C. Porém, segundo Kluge *et al.* (1997), citados por Gonçalves *et al.* (2004), as amoras, quando acondicionadas em filme plástico, podem ser mantidas armazenadas por até doze dias; as embalagens plásticas favorecem a elevação da umidade relativa do ar que circunda o fruto, diminuindo a taxa de desidratação. Malgarim *et al.* (2004) afirmam que a amora preta cultivar Tupi pode ser armazenada sob refrigeração com utilização de filme de polietileno durante 11 dias. Segundo Kotecha e Madhavi (1995), devido à sua alta perecibilidade, é essencial realizar um rápido pré-resfriamento das amoras entre -0,6 a 0°C com 90 a 95% de umidade relativa, especialmente quando os frutos serão destinados a mercados distantes.

Segundo Borecka e Pliszka (1985), citados por Ristow *et al.* (2004), a vida de estocagem de frutos de mirtilo é limitada, comparativamente à dos outros frutos, devido aos processos fisiológicos de amadurecimento e à deterioração causada por fungos. Os mesmos autores citam Westwood (1982), que afirma que o mirtilo pode ser armazenado por 14 dias em temperaturas entre 2 e 4°C, com umidade relativa de 90 a 95%. Para Hardenburg *et al.* (1986), citados por Ristow *et al.* (2004), o mirtilo suporta até 2 semanas em temperaturas entre -0,5 a 0°C e 90-95% de umidade relativa. Ristow *et al.* (2004), avaliando a conservação pós-colheita de mirtilos *cultivar* Flórida, armazenados em atmosfera com oxigênio ionizado, verificaram que o armazenamento refrigerado associado à ionização do oxigênio da atmosfera, possibilitou a conservação de mirtilos, com qualidade comercial durante 61 dias. Segundo Machado *et al.* (2004), mirtilos das cultivares Flórida, Woodard e Bluegem podem ser conservados durante 63 dias com a utilização de refrigeração associada à atmosfera com oxigênio ionizado, porém não apresentam boa qualidade para consumo *in natura*. Segundo

Kotecha e Madhavi (1995), o pré-resfriamento rápido de mirtilos frescos próximo de 0°C e sua manutenção nesta temperatura favorece a preservação da qualidade por mais tempo. A razão entre o teor de sólidos solúveis e a acidez aumenta com o amadurecimento dos frutos e quando esta razão excede 30, o fruto não deve ser vendido para consumo *in natura*, devendo ser processado em, no máximo, 24 horas. As perdas de umidade podem ser mantidas em 2-3%, ou menos, durante a estocagem e venda pelo uso de embalagens apropriadas e mantendo os frutos em atmosfera com 90-95% de umidade relativa. Vale ressaltar que o uso de atmosfera controlada na estocagem de mirtilos não é satisfatório devido ao desenvolvimento de *off-flavors* nos frutos.

Segundo Raseira *et al.* (2004) e Kotecha e Madhavi (1995), caso os frutos da framboeseira não sejam comercializados no dia da colheita, eles deverão ser armazenados a 0°C com umidade relativa de 90 a 95%. Nestas condições, os mesmos poderão ser conservados com qualidade comercial por um período de até quatro dias, se tiverem sido colhidos com muito cuidado. Além disso, segundo Plaza (2003), citado por Nino *et al.* (2007), as framboesas são frutos extremamente frágeis ao transporte, o qual deve ser feito com cuidado para aumentar sua vida de prateleira.

## 2.2 Metodologia

### 2.2.1 Aquisição dos Frutos

Os frutos framboesa, amora, mirtilo e morango foram adquiridos no comércio local, da Empresa Italbraz, localizada em Vacaria, Rio Grande do Sul. Os mesmos, recebidos no estado congelado, foram estocados em freezer horizontal (*Electrolux*, modelo H20) a -18°C para a posterior realização das análises. Todas as propriedades em estudo foram determinadas utilizando o mesmo lote de frutos. Este procedimento minimiza erros devido à variabilidade natural da composição dos frutos, uma vez que, a cada lote colhido, os mesmos podem apresentar variações no seu grau de maturação, que influenciam principalmente no teor de açúcares e na acidez.

### 2.2.2 Caracterização dos Frutos

Os frutos foram caracterizados quanto ao seu teor de sólidos solúveis totais (TSS), acidez total titulável (ATT), resíduo mineral fixo (RMF), teor de sólidos insolúveis (TSI) e teor de umidade.

O teor de sólidos solúveis foi determinado por refratometria, com a utilização um refratômetro portátil com escala de 0 a 90°Brix (*Handled Refractometers*, modelo REF107); a acidez total titulável foi medida através do método da titulometria potenciométrica de neutralização. O teor de cinzas, ou resíduo mineral fixo, o teor de sólidos insolúveis e o teor de umidade foram determinados pelo método gravimétrico. Todos estes são métodos oficiais da AOAC (1990), indicados para frutos. A preparação dos frutos para as análises compreendeu o descongelamento de uma amostra representativa de cada fruto em forno de microondas (*Panasonic*, modelo Piccolo), trituração integral em liquidificador doméstico (*Walita*) e homogeneização completa. Para a determinação do teor de sólidos solúveis, os frutos triturados foram submetidos à centrifugação em centrífuga de bancada (*International Equipment Co Boston Mass*), para a sedimentação dos sólidos suspensos.

### 2.2.3 Análise dos Dados

Os resultados das análises de caracterização dos frutos foram submetidos à Análise de Variâncias e ao Teste de Tukey para a comparação das médias, com um nível de significância de 5%. Tais análises foram realizadas com auxílio do *Software Statistica 7.0*.

## 2.3 Resultados

Os resultados de caracterização dos frutos podem ser observados na Tabela 2.2. A análise dos dados desta tabela mostra que todos os frutos apresentam um elevado teor de

umidade, sendo que o morango e a amora possuem conteúdos de umidade semelhantes e superiores aos demais. Além disso, o teor de umidade do mirtilo é o menor dentre os frutos analisados. A framboesa e o mirtilo apresentam um teor de sólidos solúveis semelhantes e superiores aos demais frutos. Estes, por sua vez, possuem um teor de sólidos solúveis semelhante. Todos os frutos diferiram entre si na sua acidez total titulável, sendo que a framboesa apresentou um maior índice, seguida pela amora, morango e mirtilo. Quanto ao resíduo mineral fixo, observa-se que o morango e a amora apresentam o mesmo teor; a framboesa e o mirtilo, por sua vez, apresentam teores iguais e inferiores ao dos demais frutos.

**Tabela 2.2:** Resultados de umidade, teor de sólidos solúveis, acidez total titulável, resíduo mineral fixo e teor de sólidos insolúveis para os frutos framboesa, amora, mirtilo e morango utilizados neste estudo.

Fruto	Umidade (%)	TSS (°Brix)	ATT (g ac. cítrico/100g de polpa)	RMF (% base seca)	TSI (%)
Framboesa	85,65 ±0,65 b*	10,1 ±0,1 ab	1,71 ±0,02 a	1,81 ±0,04 a	5,27 ±0,25c
Amora	90,71 ±0,58 a	7,2 ±0,4 c	0,93 ±0,01 b	3,17 ±0,25 b	3,36 ±0,10 b
Mirtilo	83,59 ±0,72 c	9,1 ±0,1 a	0,72 ±0,03 d	1,04 ±0,05 a	3,82 ±0,13b
Morango	90,17 ±0,17 a	6,9 ±0,1 c	0,86 ±0,02 c	4,04 ±0,40 b	1,90 ±0,33a

\* Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras ao nível de 5% de significância.

Dados de composição destes frutos são raros na literatura e muito divergentes, já que vários fatores influenciam na sua composição química, destacando-se o cultivo do fruto, o clima, o tipo de solo, o ponto de maturação na colheita, entre outros.

Finalmente, é importante mencionar que estes resultados serão utilizados posteriormente na discussão da influência da composição dos frutos nas propriedades em estudo no presente trabalho.

## Capítulo 3

# Processamento de Néctares e Polpas de Frutas

Neste capítulo são apresentados aspectos importantes relacionados ao processamento de néctares e polpas de frutas tais como: legislação vigente, dados de mercado e técnicas de processamento. Além disso, é apresentada a metodologia empregada neste trabalho, que envolve a formulação e o preparo dos néctares e polpas para posterior determinação de suas propriedades, bem como os resultados obtidos.

### 3.1 Fundamentos Teóricos

#### *3.1.1 Aspectos de Legislação*

A Lei nº 8.918 de 14 de julho de 1994 (BRASIL, 1994) dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Neste documento



é apresentada a classificação das bebidas de frutas produzidas no Brasil, a qual pode ser observada na Tabela 3.1. Assim, segundo a Legislação Brasileira, existem cinco tipos de bebidas de frutas: suco, polpa de fruta, suco tropical, néctar e refresco.

**Tabela 3.1:** Classificação das bebidas de frutas segundo a Legislação Brasileira.

Tipo de bebida	Designação
Suco ou sumo	"Suco ou sumo é a bebida não fermentada, não concentrada e não diluída, destinada ao consumo, obtida da fruta madura e sã, ou parte do vegetal de origem, por processamento tecnológico adequado, submetida a tratamento que assegure a sua apresentação e conservação até o momento do consumo."
Polpa ou purê de Fruta	"Polpa de fruta é o produto não fermentado, não concentrado, não diluído, obtido de frutos polposos, através de processo tecnológico adequado, com um teor mínimo de sólidos totais, proveniente da parte comestível do fruto."
Suco Tropical	"Suco tropical é o produto obtido pela dissolução, em água potável, da polpa de fruta polposa de origem tropical, não fermentado, de cor, aroma e sabor característicos da fruta, através de processo tecnológico adequado, submetido a tratamento que assegure a sua apresentação e conservação até o momento do consumo."
Néctar	"Néctar é a bebida não fermentada, obtida da diluição em água potável da parte comestível do vegetal e açúcares ou de extratos vegetais e açúcares, podendo ser adicionada de ácidos, e destinada ao consumo direto."
Refresco	"Refresco ou bebida de fruta ou de vegetal é a bebida não gaseificada, não fermentada, obtida pela diluição, em água potável, do suco de fruta, polpa ou extrato vegetal de sua origem, com ou sem açúcar."

Para o produto ser classificado como suco, não pode ter sido diluído com água. O suco parcialmente desidratado é denominado de suco concentrado. O suco pode ser adicionado de açúcar, numa proporção que não exceda 10% em percentual mássico.

A Instrução Normativa nº 1 de 7 de janeiro de 2000 (BRASIL, 2000) aprova o Regulamento Técnico para fixação do Padrão de Identidade e Qualidade (PIQ) de Polpa de Fruta, além de aprovar os PIQ's de polpas e sucos de diversos frutos produzidos no Brasil. As polpas dos frutos framboesa, amora, morango e mirtilo não possuem PIQ's, desta forma, segundo a Legislação, devem obedecer aos requisitos estabelecidos no PIQ geral para Polpa

de Fruta. Este regulamento permite que as polpas de fruta destinadas à produção de outras bebidas e não destinadas ao consumo direto possam ser adicionadas de aditivos químicos previstos para as bebidas a que se destinam.

A Instrução Normativa nº 12 de 4 de setembro de 2003 (BRASIL, 2003) aprova os Regulamentos Técnicos para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade dos Sucos Tropicais e dos Néctares. Segundo estes regulamentos, o produto classificado como suco tropical é o obtido, por diluição com água, do suco ou polpa de um ou mais dos seguintes frutos: abacate, abacaxi, acerola, ata, abricó, açaí, abiu, banana, bacuri, cacau, caju, cajá, carambola, cupuaçu, goiaba, graviola, jenipapo, jabuticaba, jaca, jambo, mamão, mangaba, manga, maracujá, melão, murici, pinha, pitanga, pupunha, sapoti, serigüela, tamarindo, taperebá, tucumã e umbu. Como pode ser observado, para ser classificado como suco tropical, o produto deverá ser obtido exclusivamente de frutas tropicais. Os Néctares e os Refrescos são produtos também obtidos a partir da diluição de suco ou polpa de fruta. Estes produtos, por sua vez, podem ser obtidos a partir de frutos de quaisquer origens, sejam tropicais ou não. A principal diferença entre eles é a concentração mínima de suco ou polpa que deve ser utilizada na formulação do produto. Os néctares devem possuir teores de suco ou polpa superiores aos refrescos. Como cada tipo de fruto possui características próprias como acidez e intensidade de sabor, a Legislação prevê concentrações mínimas de suco ou polpa específicas para cada néctar ou refresco, de acordo com o fruto de origem. Para os frutos framboesa, amora, morango e mirtilo não existem padrões estabelecidos pela Legislação sobre a formulação de néctares e refrescos destes frutos. Desta forma, segundo a Legislação, o néctar, cuja quantidade mínima de polpa de um determinado fruto não tenha sido fixada em regulamento técnico específico, deve conter no mínimo 30% em percentual mássico da respectiva polpa; para frutos com acidez ou conteúdo de polpa muito elevados ou sabor muito forte, o conteúdo de polpa não deve ser inferior a 20% em percentual mássico.

Vale ressaltar que não é permitida a associação de açúcar e edulcorantes hipocalóricos e não-calóricos em quaisquer bebidas no Brasil.

### ***3.1.2 Mercado de Sucos, Néctares e Polpas de Frutas***

Segundo o IBGE (1996), citado por Monteiro (2006), o Brasil é um dos três maiores produtores mundiais de frutas, com uma produção aproximada de 38 milhões de toneladas por ano. A indústria, consciente desse potencial brasileiro, está se beneficiando desta desenvolvida tecnologia de produção de frutas para investir cada vez mais no mercado de sucos prontos para beber. Segundo ACNielsen (2004), citado por Monteiro (2006), em 2004, o mercado de sucos prontos cresceu 15,6% e atingiu proporções maiores do que o de refrigerantes, cujo aumento foi de apenas 6,5%. O mercado de sucos tem movimentado anualmente 350 milhões de litros, explicando o ingresso e o aumento do investimento de empresas nacionais e multinacionais em instalações e desenvolvimento de novos produtos para o setor.

Há uma tendência de contínua expansão do mercado de sucos prontos para beber, já que são produtos que atendem às necessidades do mundo moderno, com praticidade e até substituindo refrigerantes. Tal substituição se deve à crescente busca pelos consumidores por alimentos mais ricos nutricionalmente e que, enquanto nutrem, também auxiliam na prevenção de doenças. Por possuírem um preço mais elevado que os refrescos em pó, os sucos prontos se mostram mais presentes nos lares de classe A, B e C e em famílias com crianças. Segundo Pereira (2006), as exportações brasileiras do setor concentram-se em sucos de laranja (mais de US\$ 1 bilhão, em 2005). Segundo Simarelli (2006), o Brasil exportou US\$ 75 milhões de polpas e sucos concentrados de frutas em 2005 – exceto suco de laranja. Os sucos representam 93% deste total, sendo os de uva, maçã e abacaxi os principais sabores. Quanto às polpas exportadas, destacam-se as de banana, goiaba e manga. Embora tenha evoluído, o Brasil importa mais polpas do que exporta e apresentou, em 2005, um déficit de US\$ 163 mil. A maior importação ocorreu para suprir o crescimento do consumo de sucos prontos para beber, como o de pêssego, que está sendo importado do Chile e da Argentina. Porém, diversas iniciativas objetivam habilitar o setor de polpas para atender à demanda externa. A indústria de sucos e polpas, por meio do Programa de Promoção de Exportações das Frutas Brasileiras e Derivados, iniciativa do Instituto Brasileiro de Frutas (IBRAF) e da Agência de Promoção de Exportações e Investimentos (Apex – Brasil), busca rapidamente sair do patamar atual de US\$ 75 milhões, gerados pelas exportações de polpas e concentrados de frutas tropicais, para US\$ 200 milhões.

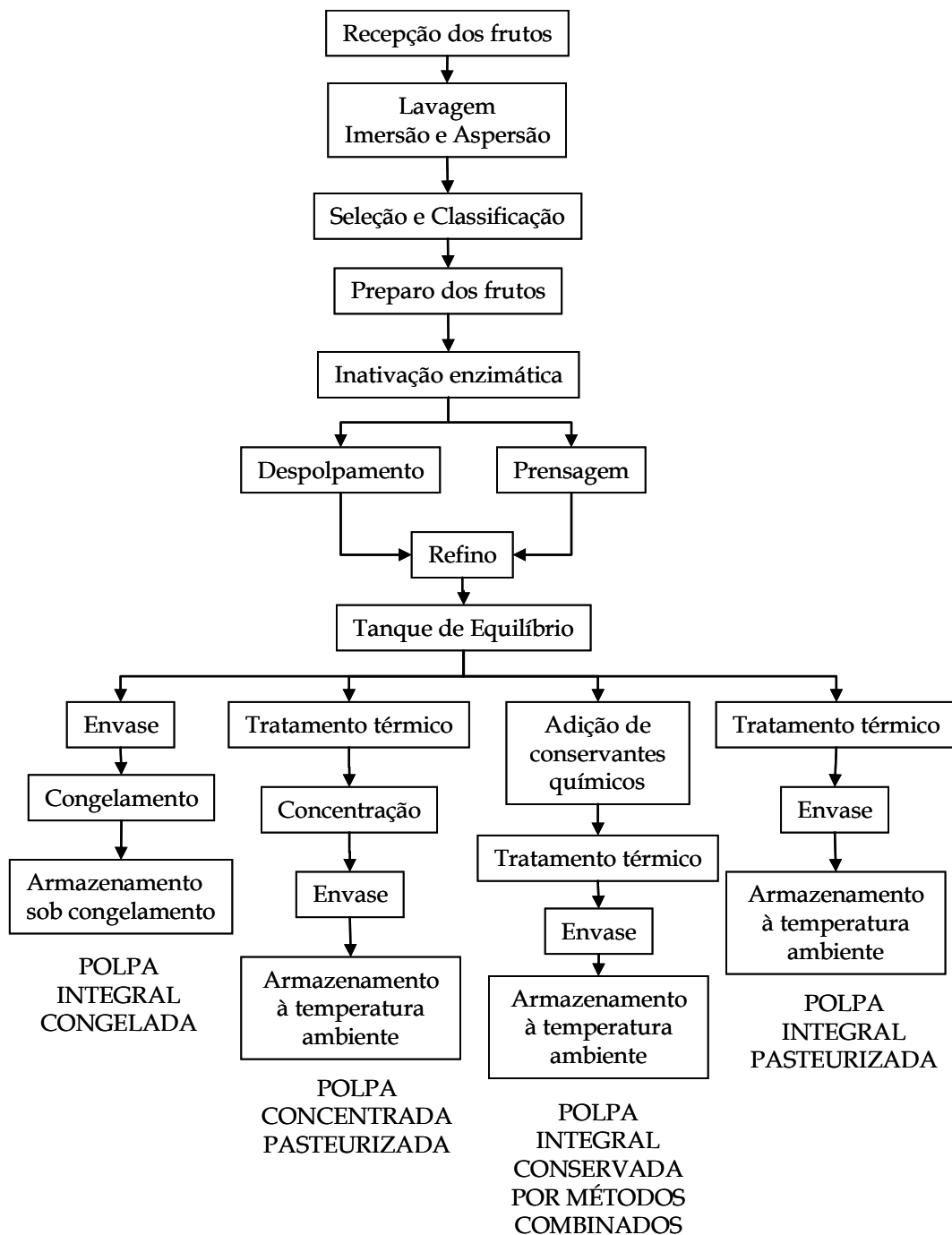
### 3.1.3 *Processamento de Polpas de Frutas e Néctares*

#### 3.1.3.1 *Polpas de Frutas*

As polpas de frutas produzidas industrialmente podem ser divididas em dois grandes grupos: polpas integrais, pasteurizadas ou não, congeladas e *armazenadas sob congelamento*; e polpas integrais ou concentradas, pasteurizadas ou tratadas por métodos combinados e *armazenadas à temperatura ambiente*. As polpas congeladas são fabricadas geralmente por empresas de menor porte, já que, para a produção de polpas concentradas pasteurizadas, os custos de implantação e produção são superiores. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma geral de processamento de polpas de fruta.

Como pode ser observado na Figura 3.1, para a produção de todos os tipos de polpas de frutas são realizadas as mesmas operações preliminares, até a chegada do produto ao tanque de equilíbrio e, a partir deste ponto, o produto pode sofrer tratamentos distintos, de acordo com a forma de armazenamento desejada para o mesmo.

O processamento inicia com a recepção e limpeza dos frutos, que geralmente são lavados primeiramente por imersão em água com elevada concentração de cloro (10 a 70 ppm) e com posterior aspersão de água tratada, para retirada do cloro remanescente. Durante a aspersão, é realizada a seleção dos frutos, com a retirada dos impróprios ao processamento, principalmente por apresentarem podridões. A classificação tem por objetivo padronizar os frutos que seguirão no processo, já que são retirados os frutos cujo estágio de maturação seja inadequado. Os frutos seguem para as operações de preparo, que são distintas de acordo com as características do mesmo. Os frutos geralmente são descascados e cortados em pedaços, sendo que o descascamento pode ser manual, mecânico ou químico (com soluções de lixívia) e o corte em pedaços pode ser manual ou mecânico, dependendo do tipo de fruto que está sendo processado.



**Figura 3.1:** Fluxograma simplificado do processamento de diversos tipos de polpas de fruta para armazenamento à temperatura ambiente ou sob congelamento. Fonte: Adaptado de Silva (1995); Vendruscolo e Vendruscolo (2005); Lima *et al.* (2002) e Toralles e Vendruscolo (2007).

Os pedaços de frutos sofrem inativação enzimática, que consiste em um tratamento térmico rápido, seguido de resfriamento repentino, e que tem por objetivo a destruição da maior parte das enzimas naturalmente presentes em vegetais e que são responsáveis

principalmente pelo escurecimento enzimático dos produtos obtidos a partir destas matérias-primas.

A obtenção da polpa ou purê pode ser realizada por despulpamento ou prensagem, de acordo com o tipo de fruto. A despulpadeira é o equipamento geralmente utilizado que realiza o esmagamento dos pedaços de frutos e, mediante centrifugação tangencial, provoca a passagem da polpa por uma peneira com malha de abertura de 1,0 mm. Esta operação incorpora uma considerável quantidade de ar ao produto. Já a prensagem é utilizada para frutos sem caroço ou com elevada quantidade de polpa em relação às sementes, tais como abacaxi e caju. Nesta operação, os frutos são prensados por meio de um sistema de rosca sem fim contra uma peneira cônica com malha de abertura de 0,8 mm. As polpas produzidas por prensagem apresentam um menor conteúdo de ar disperso. A polpa segue então para o refino, que consiste na passagem do produto por um sistema com peneiras mais finas (0,3 a 0,6 mm), para a retirada de fragmentos pequenos de sementes e fibras. Ao final do processo, o produto é levado ao tanque de equilíbrio, onde são dosados os aditivos necessários para a correção da composição da polpa, visando atingir um padrão pré-estabelecido em função de cada matéria-prima. Geralmente, nesta etapa são dosados ácidos para inibição do escurecimento e correção do pH do produto, o qual, segundo Toralles e Vendruscolo (2007), deve ser inferior a 3,9.

Para a fabricação de polpa integral congelada, o produto sai do tanque de equilíbrio diretamente para o envase. Geralmente este tipo de produto é envasado em embalagens de polietileno com capacidade de 100 g. O produto segue para o congelamento e armazenamento a uma temperatura inferior a  $-18^{\circ}\text{C}$ . Algumas vezes a polpa que será armazenada congelada também é submetida, antes do seu envase, a um tratamento térmico para pasteurização, de forma a prolongar sua vida de prateleira, porém, esta prática não é comum. A vida de prateleira de polpas de frutas congeladas é de aproximadamente 24 meses.

Todos os demais tipos de polpas sofrem tratamento térmico para inativação microbiológica, uma vez que serão armazenadas à temperatura ambiente. Nesta operação, a polpa é aquecida a uma determinada temperatura por certo período de tempo. Este binômio tempo/temperatura é variável de acordo com a flora microbiana presente no produto inicial e deve ser cuidadosamente dimensionado para garantir um período mínimo necessário para

a destruição dos microorganismos contaminantes. Além disso, busca-se minimizar os danos térmicos causados aos componentes dos frutos responsáveis pelos atributos sensoriais do produto, tais como cor, aroma, textura e sabor. Geralmente, quanto maior for a temperatura e menor o tempo de processamento, melhores serão os resultados, tanto na inativação microbiana, quanto na preservação dos atributos sensoriais do produto. A literatura fornece uma série de binômios tempo/temperatura que podem ser utilizados com sucesso na pasteurização dos diferentes tipos de polpas; no entanto, como existem muitas variações nas características das polpas, este binômio deve ser determinado para cada processo experimentalmente. Silva (1995) afirma que a pasteurização de polpas de fruta em geral pode ser realizada a 87°C, por alguns minutos. Já Toralles e Vendruscolo (2007) afirmam que na pasteurização de polpa de pêsego pode ser usado o binômio 97°C/7segundos. Vendruscolo e Vendruscolo (2005) afirmam que polpa de morango pode ser pasteurizada a 93-95°C/60 segundos. Esta operação geralmente é realizada em trocadores de calor de superfície raspada ou trocadores de calor tubulares, devido à alta viscosidade das polpas. A polpa pasteurizada pode ser envasada a quente (temperatura próxima a 85°C) ou pode ser resfriada rapidamente a 2°C e envasada assepticamente em tambores ou latas. Também se realiza a pasteurização de polpas após o seu envase. Neste processo, o produto é primeiramente envasado (geralmente em latas) e segue para o processamento térmico, geralmente por imersão das latas em água em temperatura próxima à de ebulição.

Segundo Daza *et al.* (1991), citados por Araújo *et al.* (200?), a preservação de alimentos por métodos combinados tem-se mostrado uma alternativa aos métodos tradicionais de conservação, muitas vezes reduzindo o custo relativo, resultando em uma maior eficiência e um menor rigor comparativamente à aplicação de um método isolado. O método combinado consiste na reunião adequada de vários parâmetros, tais como o tratamento térmico brando ou moderado, leve redução da atividade de água, redução de pH, adição simples ou combinada de agentes químicos entre outros. Costa *et al.* (2003) utilizaram a associação de métodos para conservação de polpa de cupuaçu. Os autores utilizaram sacarose para a redução da atividade de água do produto, reduziram o pH da polpa para 3,0, utilizaram 500 ppm de benzoato de sódio e 400 ppm de metabissulfito de sódio e um tratamento térmico de 90°C/1 a 2 minutos. A polpa de cupuaçu assim processada apresentou boa conservação por 20 dias a 25°C.

As polpas de frutas concentradas são muito utilizadas pela indústria de sucos na produção de sucos tropicais, néctares, refrescos, sorvetes, geléias, vinhos e produtos reestruturados. Segundo Toralles e Vendruscolo (2007), com a concentração de polpas é possível aumentar sua vida de prateleira, reduzir o custo de transporte e facilitar a comercialização. As polpas de frutas podem ser concentradas por evaporação, concentração a frio, através da tecnologia de membranas e secagem. As polpas concentradas normalmente são comercializadas com um teor de sólidos solúveis de 30 a 35 °Brix. Geralmente, a concentração do produto é realizada por evaporação, mas o aumento do teor de sólidos solúveis durante a concentração é acompanhado do aumento da viscosidade aparente, principalmente em polpas de frutas com alto conteúdo de substâncias pécicas. Esse aumento provoca uma redução da transferência de calor e de quantidade de movimento no interior dos tubos, que pode levar à degradação do material nas superfícies mais quentes do meio de aquecimento.

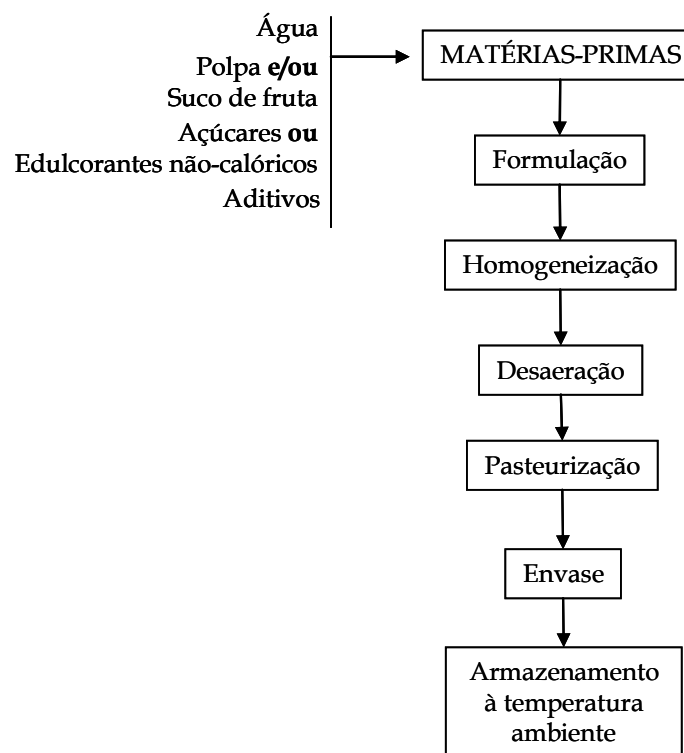
Como pôde ser visto, as polpas de frutas sofrem uma série de modificações físico-químicas ao longo do seu processamento, além de serem expostas a diversas faixas de temperatura, desde temperaturas abaixo do ponto de congelamento do produto, até temperaturas próximas a 90 °C. Assim, para que seja possível a otimização do processo produtivo, a fim de se obter produtos de melhor qualidade com um menor consumo de energia e menor adição de produtos químicos, há a necessidade do conhecimento do comportamento de suas propriedades físicas nas condições de processamento, uma vez que as mesmas são fortemente influenciadas por mudanças, tanto nas condições de processo, quanto na composição dos produtos.

### **3.1.3.1 Néctares**

O fluxograma simplificado do processo produtivo de néctares é apresentado na Figura 3.2. Observa-se que o processo é simples, quando comparado com o de obtenção de polpas de fruta, já que basicamente consiste na mistura de ingredientes e na pasteurização do produto. O processamento inicia com a seleção das matérias-primas e a formulação do produto. A água é o componente majoritário do néctar, seguido do suco ou polpa de fruta. Geralmente, a indústria utiliza sucos ou polpas concentrados, devido às vantagens inerentes



a estes produtos, já mencionadas. Em alguns produtos, tais como o néctar de pêsego, por exemplo, como Toralles e Vendruscolo (2007) comentam, é possível associar polpa de pêsego e suco de pêsego, o que reduz a viscosidade do produto, mantendo o sabor intenso do fruto. Na fabricação do néctar adoçado, pode-se utilizar sacarose ou um xarope composto por sacarose e água, com 30°Brix. Caso seja desejado reduzir a viscosidade do xarope, pode-se associar sacarose e dextrose na fabricação do mesmo. Nas formulações dietéticas, são utilizados edulcorantes hipocalóricos e/ou não-calóricos, tais como a frutose, aspartame, sucralose, acessulfame de potássio, ciclamato de sódio, entre outros, como substitutos do açúcar.



**Figura 3.2:** Fluxograma simplificado do processamento de néctares para armazenamento à temperatura ambiente. Fonte: Adaptado de Silva (1995); Maeda *et al.* (2006) e Lima *et al.* (2002).

A Legislação Brasileira não atribui limites máximos de açúcar a ser utilizado na formulação de néctares. São escassas na literatura informações sobre formulações de néctares. Maeda *et al.* (2006) realizando um estudo sobre a formulação de um néctar adoçado de camu-camu, concluíram que a formulação que apresentou a melhor aceitação sensorial era composta por 17 % de polpa e 17,5 % de açúcar; por ser o camu-camu uma fruta muito ácida (acidez total titulável de 3,40 g de ácido cítrico/100 g de polpa) e adstringente, seu

---

néctar deve conter um baixo teor de polpa e alto teor de açúcar. Mattietto *et al.* (2007), estudando a estabilidade de um néctar misto de cajá e umbu, formularam um produto misto em uma proporção de 30:20 (cajá:umbu). Os autores determinaram, através de um balanço material, a quantidade de água e o teor de açúcar a ser adicionado ao produto para a obtenção de um néctar misto com 17 °Brix.

A utilização de aditivos é bastante variável entre os diversos néctares existentes no mercado. Algumas indústrias optam pela minimização do uso de aditivos, utilizando este procedimento como uma estratégia competitiva, uma vez que atrai os consumidores que optam por alimentos mais “saudáveis”, sem conservantes químicos, aromatizantes e corantes artificiais. Outras, por sua vez, utilizam tais aditivos para aumentar a vida de prateleira dos produtos e para melhorar alguns parâmetros sensoriais do néctar, tais como cor, aroma e sabor. Segundo Toralles e Vendruscolo (2007), o pH do néctar deve ser inferior a 3,9 e, assim, caso seja necessário, adiciona-se ácido cítrico para a correção do mesmo. O ácido ascórbico é muitas vezes utilizado para minimizar os fenômenos oxidativos que alteram o sabor, o aroma e a cor do néctar. A adição de hidrocolóides como gomas guar, carragena, xantana e carboximetilcelulose é utilizada visando aumentar a viscosidade, sendo estes os aditivos mais comumente encontrados em néctares; os mais raros são os conservantes metabissulfito de sódio e benzoato de sódio, os corantes naturais e artificiais e os aromatizantes.

Após a formulação e homogeneização das matérias-primas, o produto é desaerado em desaerador a vácuo. Segundo Toralles e Vendruscolo (2007), a remoção do ar incorporado ao produto previne reações oxidativas que provocariam alterações de cor e sabor no produto. Após, o produto segue para pasteurização e envase asséptico, em condições similares às de pasteurização e envase de polpas de fruta pasteurizadas, conforme descrito anteriormente. Os néctares geralmente são envasados em embalagens *Tetra-pack* e possuem vida de prateleira média de 10 a 12 meses, quando armazenados à temperatura ambiente.

## 3.2 Metodologia de preparo das polpas e dos néctares

### 3.2.1 Formulações

Para a realização do presente trabalho foram formulados polpas, polpas 'desaeradas' e néctares dos frutos framboesa, amora, morango e mirtilo, sem açúcar e adoçados, com teores de polpa que variaram de 25% a 100% em massa e teores adicionados de açúcar comercial que variaram de 0 a 10% em massa, além disso, adicionou-se 0,1% de goma xantana (*Hexus Food*). Na formulação dos néctares foi utilizada água destilada. A Tabela 3.2 apresenta as formulações utilizadas para todas as quatro frutas estudadas. Cabe salientar que, para as polpas integrais, como foram utilizadas as proporções de 5 e 10g de açúcar para cada 100g de polpa, o percentual mássico de açúcar é 4,75 e 9,08%, respectivamente, uma vez que o mesmo consiste na relação entre a massa de açúcar adicionado e a massa total do produto.

**Tabela 3.2:** Formulações dos produtos testados para cada uma das frutas estudadas.

Codificação	Produto	Água (%)*	Polpa (%)	Açúcar (%)	Goma (%)
100-0	Polpa	0	99,9	0	0,1
100-5	Polpa	0	100	4,75	0,1
100-10	Polpa	0	100	9,08	0,1
75-0	Néctar	24,9	75	0	0,1
75-5	Néctar	19,9	75	5	0,1
75-10	Néctar	14,9	75	10	0,1
50-0	Néctar	49,9	50	0	0,1
50-5	Néctar	44,9	50	5	0,1
50-10	Néctar	39,9	50	10	0,1
25-0	Néctar	74,9	25	0	0,1
25-5	Néctar	69,9	25	5	0,1
25-10	Néctar	64,9	25	10	0,1

\* Percentual mássico

Estes 12 produtos foram formulados com cada um dos frutos, totalizando 48 amostras. Desta forma, ao longo deste trabalho, na codificação de cada produto, além dos

números designados na Tabela 3.2, ainda aparecerão as letras 'A', quando o fruto for amora; 'B', quando o fruto for mirtilo; 'M', quando o fruto for morango e 'F', quando o fruto for framboesa. Assim, por exemplo, o produto cuja codificação é 'A-75-5', corresponde ao néctar de amora que contém 75% de polpa, 5% de açúcar e 19,9% de água.

A definição da faixa de percentuais de polpa a estudar foi realizada com base na Legislação Brasileira para Néctares e Refrescos. Como ainda não existem Padrões de Identidade e Qualidade para néctares destes frutos, optou-se por abranger uma ampla faixa, de forma a obter modelos matemáticos das propriedades em estudo válidos para polpas integrais e néctares que possuam no mínimo 25% de polpa.

A Legislação Brasileira não define limites máximos de açúcar que podem ser utilizados em formulações de néctares. Desta forma, a escolha dos teores de açúcar adicionados nos néctares e nas polpas foi realizada com base no Capítulo 3º do Artigo 40 da Lei nº 8.918 de 14/07/1994 (BRASIL, 1994), que afirma que o percentual máximo de açúcar a ser adicionado em sucos é de 10% em massa. Apesar dos produtos não serem classificados como 'sucos' pela Legislação, optou-se pela utilização desta faixa, devido, também, à carência de informações na literatura sobre formulações de néctares. As informações que serão obtidas com produtos sem açúcar poderão ser utilizadas quando na formulação de polpas integrais sem açúcar e néctares dietéticos.

O objetivo da aditivação dos produtos com goma xantana foi o de estabilizá-los, minimizando o fenômeno de sedimentação da polpa, fenômeno que ocorre principalmente nos néctares mais diluídos. Não houve necessidade de adição de ácidos, pois o pH de todos os produtos foi inferior a 3,9.

### ***3.2.2 Processamento das Polpas***

O processamento das polpas foi realizado em escala de bancada, conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.3. Os frutos foram descongelados em forno de microondas (*Panasonic*, modelo *Piccolo*) e triturados integralmente, uma vez que os mesmos já tinham sido adquiridos limpos e classificados antes de terem sido congelados. A

trituração foi realizada em liquidificador doméstico (*Walita*) e as sementes não foram separadas. As polpas foram aditivadas com goma xantana e foi adicionado açúcar (nas formulações adoçadas). Após completa homogeneização, os produtos foram armazenados sob refrigeração (*Glacial Pavan*) por 24 h, a 10°C para que a goma adicionada hidratasse completamente e o produto ficasse perfeitamente homogêneo.



**Figura 3.3:** Fluxograma do processamento das polpas em escala de bancada.

Como mencionado anteriormente, o processo de trituração dos frutos agrega ar às polpas, formando um meio heterogêneo. Para a obtenção de polpas desaeradas, as mesmas foram submetidas a um processo de desaeração em um sistema a vácuo em escala de bancada. O sistema consistia em um frasco kitasato fechado com uma rolha de silicone na extremidade superior, contendo a polpa e ligado a uma bomba de vácuo (*Prismatec*, modelo 131). A pressão reduzida imposta ao sistema (-680 mmHg), associada à agitação do frasco, promoveu a retirada do ar disperso nas polpas. O processo foi conduzido até a completa retirada do ar dos produtos. Para a verificação da real ausência de ar disperso, foi realizado um teste preliminar, que consistiu no monitoramento da massa específica de cada uma das polpas em estudo ao longo do processo de desaeração. Assim, a cada intervalo de tempo pré-determinado, a desaeração era interrompida e uma amostra do produto era coletada para a análise de sua massa específica. Desta forma, foi possível verificar que, a partir do momento no qual as bolhas de ar não eram mais visíveis a olho nu, o produto poderia ser considerado desaerado, já que sua massa específica passava a ser constante, mesmo com a continuação do processo de desaeração. A Figura 3.4 apresenta uma fotografia do sistema de desaeração utilizado neste trabalho.

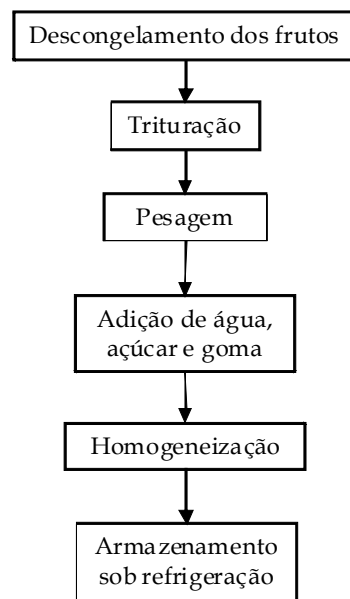
Para a etapa de desaeração avaliou-se também a utilização de um sistema de ultrassom, contudo, devido ao longo tempo necessário para a completa desaeração das polpas, que poderia resultar em sua deterioração, esta técnica foi descartada.



**Figura 3.4:** Fotografia do sistema para desaeração das polpas.

### 3.2.3 Processamento dos Néctares

Os néctares foram processados em escala de bancada, de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.5. Como pode ser observado, após a trituração, as polpas foram pesadas em balança digital com precisão de 0,01 g, assim como as demais matérias-primas (água, açúcar e goma). Os produtos foram completamente homogeneizados e armazenados sob refrigeração (*Glacial Pavan*) por 24 h, a 10°C para completa estabilização.



**Figura 3.5:** Fluxograma simplificado do processamento dos néctares em escala de bancada.

### 3.2.4 Caracterização dos Produtos

Os néctares e as polpas ‘aeradas’ foram caracterizados quanto ao seu teor de sólidos solúveis, utilizando um refratômetro manual com escala de 90°Brix (*Handheld Refractometers*, modelo REF107), em duplicata; e pH, por potenciometria, utilizando um potenciômetro digital (*Digimed*, modelo DM20).

### 3.2.5 Análise dos Dados

Os resultados da análise de teor de sólidos solúveis das polpas e dos néctares foram submetidos à Análise de Variâncias e ao Teste de Tukey para a comparação das médias, com um nível de significância de 5%. Tais análises foram realizadas com auxílio do *Software Statistica 7.0*.

### 3.3 Resultados

Os resultados da caracterização das polpas e dos néctares produzidos, em relação ao pH e aos sólidos solúveis totais (TSS), estão apresentados na Tabela 3.3. Como pode ser observado, o pH de todos os produtos foi inferior a 3,9 e a adição de açúcar elevou significativamente o teor de sólidos solúveis em todos os produtos.

**Tabela 3.3:** Caracterização das formulações das polpas e dos néctares de framboesa, amora, mirtilo e morango em relação ao pH e aos sólidos solúveis totais (TSS).

Produto	Framboesa (F)		Amora (A)		Mirtilo (B)		Morango (M)	
	pH	TSS (°Brix)	pH	TSS (°Brix)	pH	TSS (°Brix)	pH	TSS (°Brix)
100-0	2,92	10,1±0,1 g*	3,19	7,2±0,3 f	3,05	9,1±0,1 g	3,45	6,9±0,1 g
100-5	2,87	14,6±0,2 d	3,19	12,2±0,3 c	3,03	13,9±0,1 d	3,46	10,9±0,1 d
100-10	2,93	19,3±0,2 a	3,17	16,1±0,1a	3,04	16,7±0,3 b	3,47	14,4±0,6 a
75-0	2,94	8,0±0,1 h	3,25	5,9±0,1 g	3,10	7,0±0,0 h	3,51	4,8±0,1 h
75-5	2,93	13,7±0,3 e	3,20	11,0±0,0 d	3,06	11,8±0,1 f	3,55	10,0±0,0 e
75-10	2,96	17,9±0,1 b	3,17	16,4±0,1 a	3,04	17,6±0,2 a	3,53	14,9±0,0 a
50-0	3,02	5,0±0,1 i	3,24	3,9±0,1 h	3,07	4,8±0,0 i	3,55	3,0±0,1 i
50-5	3,17	10,2±0,1 g	3,21	8,9±0,0 e	3,11	9,2±0,1 g	3,51	8,0±0,1 f
50-10	2,93	15,6±0,1 c	3,19	14,0±0,1 b	3,09	14,9±0,0 c	3,55	13,2±0,0 b
25-0	3,04	2,4±0,0 j	3,28	1,9±0,1 i	3,24	2,2±0,0 j	3,56	1,6±0,1 j
25-5	3,18	7,7±0,0 h	3,28	6,4±0,1 g	3,18	7,1±0,0 h	3,60	6,4±0,1 g
25-10	3,02	12,8±0,1 f	3,25	12,2±0,1 c	3,17	12,4±0,0 e	3,54	11,8±0,0 c

\* Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras ao nível de 5% de significância, pelo Teste de Tukey.



## Capítulo 4

### Massa Específica

Neste capítulo são apresentados os aspectos relativos à massa específica dos produtos estudados, sendo inicialmente abordados os seus conceitos e principais aplicações, a importância do seu conhecimento para a indústria, as técnicas disponíveis para sua determinação e os dados já publicados na literatura para o tipo de produto em estudo. Além disso, também é apresentado um estudo teórico termodinâmico referente ao comportamento da massa específica do ar com a temperatura e com o teor de umidade relativa. Posteriormente, são apresentados a metodologia aplicada e os resultados encontrados na determinação da massa específica dos produtos analisados.

#### 4.1 Fundamentos Teóricos

##### *4.1.1 Definições e Aplicações*

A massa específica ( $\rho$  com unidade no SI  $\text{kg m}^{-3}$ ) é uma importante propriedade física, sendo amplamente usada em cálculos de processos. É definida como a razão entre a massa de um material [kg] e o seu volume [ $\text{m}^3$ ]. Quando a massa específica de um material inclui os

poros presentes no mesmo, esta propriedade é denominada de massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ).

Para o correto dimensionamento de todas as operações unitárias relacionadas com a transferência de quantidade de movimento, tais como o transporte de materiais através de tubulações, operações de agitação, de filtração, de fluidização, a sedimentação de sólidos em suspensões, dentre outras, é fundamental o conhecimento da massa específica do material em questão. A massa específica de um fluido também é importante para a determinação da pressão exercida por uma coluna do mesmo, o que é imprescindível para o projeto de tanques de armazenagem e sistemas de bombeamento. Além disso, através da variação da massa específica de um fluido em um processo, pode-se determinar se o mesmo é compressível ou incompressível, o que resulta em abordagens bastante distintas do processo.

A transferência de massa e calor durante o processamento dos alimentos altera sua massa específica. Em muitos cálculos de dimensionamento de processos, a massa específica é considerada constante, o que simplifica os cálculos. Porém, esta suposição não é válida para todos os casos, já que altas temperaturas desnaturam os constituintes dos alimentos e baixas temperaturas fazem a água presente nos mesmos mudar de fase, tornando-se gelo; todos estes fatores alteram a massa específica. Hoje em dia, devido à simulação de processos, há a necessidade de quantificar as mudanças da massa específica do alimento durante o seu processamento. Em operações unitárias como a secagem, a defumação, o branqueamento, a fritura e o cozimento ocorrem transferências simultâneas de calor e massa. Tais fenômenos provocam variações no volume dos alimentos, tanto de contração, devido à perda de umidade, como de expansão devido à dilatação de gases e/ou líquidos ou à formação de poros no material, o que também faz sua massa específica mudar.

#### ***4.1.2 Técnicas de Determinação da Massa Específica***

Segundo Urbicain e Lozano (1997), existem dois procedimentos principais para a medida da massa específica de líquidos: a técnica hidrométrica e a picnométrica. Constenla *et al.* (1989) compararam estes dois métodos quando da determinação do comportamento da massa específica de suco de maçã clarificado em função da temperatura e do conteúdo de

sólidos solúveis, não encontrando diferenças significativas entre os resultados obtidos.

O método hidrométrico é baseado no Princípio de Arquimedes e consiste na medida da perda de peso de um corpo sólido de volume conhecido quando é imerso em um líquido. Este método requer que a massa específica do sólido seja maior que a massa específica do líquido.

O método picnométrico é o indicado pela AOAC (1990) para bebidas e concentrados (AOAC 950.28). O picnômetro (Figura 4.1) é essencialmente um frasco de vidro resistente de baixo coeficiente de expansão térmica e com tampa perfurada, com o qual se mede a massa de um volume exatamente conhecido de líquido, já que o orifício na tampa faz com que o excesso de líquido vaze no momento em que a tampa é adaptada ao frasco. Ele é apresentado geralmente com volumes de 25 ou 50 mL e tem precisão até a quarta casa decimal. Para a ambientação da amostra na temperatura na qual se deseja determinar a massa específica, o picnômetro é imerso em um banho termostático com temperatura constante e preenchido com a amostra. Terminada a ambientação da temperatura, coloca-se a tampa do frasco. Neste momento, ocorre um transbordamento instantâneo do excesso de volume do líquido; seca-se o picnômetro externamente e mede-se a massa do frasco repleto de amostra em balança analítica. A massa da amostra é determinada por diferença a partir da massa do frasco vazio. O valor da massa específica da amostra é determinado diretamente pela relação entre sua massa e seu volume. O picnômetro deve ser calibrado para cada temperatura de trabalho com água destilada isenta de ar. Esta calibração é necessária para se determinar o volume real do picnômetro, a partir do conhecimento prévio da massa específica da água obtida de dados disponíveis na literatura.



**Figura 4.1:** Picnômetro de tampa perfurada.

### 4.1.3 Correlações Empíricas e Dados da Literatura

A massa específica de materiais alimentícios é dependente da temperatura e da composição do alimento. Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995) e por Urbicain e Lozano (1997), apresentaram correlações para as massas específicas dos componentes principais dos alimentos, na faixa de temperaturas de -40 °C a 150 °C para suspensões com conteúdo de sólidos de 0 a 95%. Os valores preditos por estas equações apresentam cerca de 3,9% de erro para alimentos líquidos em geral presentes na literatura e 4,7% de erro para leite concentrado, suco de laranja e salsicha. Tais correlações podem ser observadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Massa específica dos principais constituintes dos alimentos. Fonte: Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995).

Componente	Equação
	$\rho$ expressa em [kg m <sup>-3</sup> ], temperatura expressa em [°C]
Ar	$\rho_{ar} = 1,2847 - 3,2358 \times 10^{-3} T$
Proteína	$\rho_p = 1,3300 \times 10^3 - 0,5184 T$
Carboidrato	$\rho_c = 1,5991 \times 10^3 - 0,31046 T$
Lipídio	$\rho_l = 9,2559 \times 10^2 - 0,41757 T$
Fibra	$\rho_f = 1,3115 \times 10^3 - 0,36589 T$
Cinza	$\rho_{ci} = 2,4238 \times 10^3 - 0,28063 T$
Água	$\rho_w = 9,9718 \times 10^2 + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^2$

Assim, levando-se em conta a fração mássica de cada um destes constituintes no alimento em questão ( $X$ ), a massa específica do mesmo pode ser calculada através da Equação 4.1.

$$\rho = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{\rho_i}} \tag{4.1}$$

onde o índice subscripto  $i$  refere-se a cada um dos componentes do alimento.

Dickerson (1968), citado por Rahman (1995), determinou a massa específica de suco de framboesa, com teor de sólidos totais de 11,5%, encontrando um valor de  $1.046 \text{ kg m}^{-3}$ . O mesmo autor também quantificou a massa específica de suco de morango, com um teor de sólidos totais de 8,3%, encontrando um valor de  $1.033 \text{ kgm}^{-3}$ .

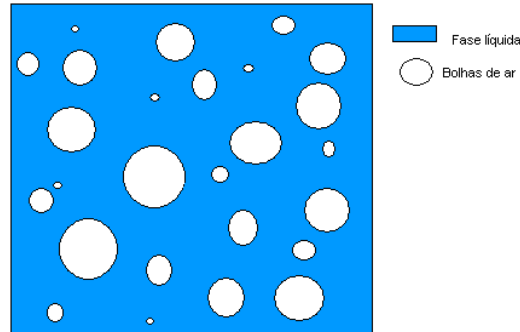
Diversos pesquisadores utilizaram o método picnométrico para o estudo da influência da temperatura e do conteúdo de sólidos solúveis na massa específica de sucos e polpas de várias frutas. Dentre eles podem-se citar Manohar *et al.* (1991), para suco de tamarindo, Bayindirli (1993), para suco de uva, Ramos e Ibarz (1998) para sucos clarificados de pêra e laranja e polpas de maçã e marmelo, Telis-Romero *et al.* (1998), para suco de laranja, Cepeda e Villarán (1999), para suco de maçã, Zuritz *et al.* (2005) para suco de uva e Azoubel *et al.* (2005) para suco de caju.

No Anexo A é apresentada uma compilação das equações empíricas propostas por diversos pesquisadores para a determinação da massa específica de sucos e polpas de frutas. Nesta compilação é possível observar a faixa de aplicação e o coeficiente de correlação do ajuste de cada modelo.

#### ***4.1.4 Massa Específica de Líquidos Impregnados com Bolhas de Ar***

A partir da análise das equações empíricas apresentadas no Anexo A, verifica-se que a massa específica de sucos e polpas de frutas em função da temperatura segue, na maioria dos casos, um modelo linear. Este comportamento é similar ao da água na faixa de temperaturas de 20 a 80°C e, como os sucos e as polpas possuem uma grande quantidade de água em sua estrutura, espera-se que apresentem um comportamento semelhante. Porém, quando se trabalha com líquidos viscosos impregnados com bolhas de ar, como polpas de frutas ricas em substâncias pécicas, por exemplo, o modelo linear não representa corretamente o comportamento do sistema. Isto ocorre em razão da presença de bolhas de ar, que fazem com que o sistema seja um meio poroso complexo. Assim, como os coeficientes de dilatação térmica de líquidos e de gases são distintos, o aumento de volume das fases líquida e gasosa deste sistema com a temperatura pode não seguir um comportamento linear. Na

Figura 4.2 pode ser observada uma representação esquemática do sistema físico em que um líquido está impregnado com bolhas de ar.



**Figura 4.2:** Representação do sistema físico composto por um líquido viscoso impregnado com bolhas de ar.

A fim de entender o comportamento termodinâmico deste sistema durante o processo de elevação da temperatura, será apresentada a seguir uma análise teórica de como a massa específica do ar varia com a temperatura e com a umidade relativa. Esta análise servirá de base para o entendimento de como se processa o comportamento da massa específica das bolhas de ar que impregnam líquidos viscosos com a temperatura.

#### ***4.1.5 Estimativa da massa específica de ar em função da temperatura e da umidade relativa***

Tsilingiris (2008), em um estudo teórico, com base em fundamentos termodinâmicos, apresentou uma metodologia para a obtenção de equações de predição das propriedades termofísicas e de transporte, para o ar, em função da temperatura, na faixa de 0 a 100°C e da umidade relativa, partindo do ar isento de umidade (ar seco) até o ar saturado de vapor. O desenvolvimento matemático apresentado pelo autor para a predição da massa específica do ar em função da temperatura e da umidade relativa será apresentado a seguir.

Segundo Tsilingiris (2008), com o propósito de se determinar a massa específica de ar em função da temperatura e da umidade relativa, o sistema 'ar úmido' é considerado uma mistura binária de ar seco e vapor d'água. A fração molar de vapor d'água é definida como a razão entre o número de moles de vapor e o número de mols total da mistura:

$$x_v = \frac{n_v}{n_m} = \frac{n_v}{n_a + n_v} = \frac{P_v}{P_T} \quad (4.2)$$

onde  $x_v$  é a fração molar de vapor d'água,  $n_m$ ,  $n_v$  e  $n_a$  são os números de moles total, de vapor e de ar, respectivamente, e  $P_v$  e  $P_T$  são as pressões de vapor e total [kPa] do sistema, respectivamente.

A umidade relativa do ar ( $RH$ ) é definida como a razão entre a fração molar de vapor,  $x_v$ , e a fração molar de vapor saturado,  $x_{sv}$ , assumindo o seu comportamento como o de um gás ideal.  $RH$  pode ser calculada através da Equação 4.3 apresentada a seguir:

$$RH = \frac{x_v}{x_{sv}} = \frac{P_v}{P_{sv}} \quad (4.3)$$

onde  $P_{sv}$  é a pressão do vapor saturado [kPa].

Das Equações 4.2 e 4.3 resulta que a fração molar de vapor d'água pode ser expressa pela seguinte equação:

$$x_v = x_{sv} \cdot RH \quad (4.4)$$

Entretanto, admitindo os efeitos de interações moleculares de gases reais, verifica-se que há um pequeno aumento na pressão de saturação do vapor no ar, o qual é levado em conta pela introdução de um fator de correção numérico, conhecido como um 'fator de aumento' (do inglês, *enhancement factor*), denotado como  $f(P,T)$ . Este, sendo uma função da pressão e da temperatura, é introduzido para corrigir a fração molar de vapor saturado. A fração molar do vapor saturado pode ser estimada pela Equação 4.5.

$$x_{sv} = f(P,T) \cdot \frac{P_{sv}}{P_0} \quad (4.5)$$

Assim, a fração molar de vapor d'água é calculada a partir das Equações 4.4 e 4.5 como uma função da pressão atmosférica total ( $P_0$ ) e da pressão do vapor saturado ( $P_{sv}$ ) em uma temperatura específica, através da Equação 4.6.

$$x_v = f(P,T) \cdot RH \cdot \frac{P_{sv}}{P_0} \quad (4.6)$$

A estimativa dos valores numéricos do ‘fator de aumento’ foi objeto de uma série de investigações, como a de Hyland e Wexler (1973) e Hylanf (1975), citados por Tsilingiris (2008). Entretanto, na presente análise, Tsilingiris (2008) sugere que este cálculo seja realizado de acordo com Hardy (1998), mediante a seguinte expressão simplificada, recomendada por Greenspan (1976):

$$f(P,T) = \exp \left[ \xi_1 \left( 1 - \frac{P_{sv}}{P_0} \right) + \xi_2 \left( \frac{P_{sv}}{P_0} - 1 \right) \right] \quad (4.7)$$

com

$$\xi_1 = \sum_{i=0}^3 A_i \cdot T^i \quad (4.8)$$

$$\xi_2 = \exp \left[ \sum_{i=0}^3 B_i \cdot T^i \right] \quad (4.9)$$

onde  $A$  e  $B$  são as constantes das equações e  $T$  é a temperatura [°C].

Os valores numéricos das constantes nas Equações 4.8 e 4.9 correspondentes à faixa de temperaturas entre 0 e 100°C são  $A_0=3,53624 \times 10^{-4}$ ,  $A_1=2,93228 \times 10^{-5}$ ,  $A_2=2,61474 \times 10^{-7}$ ,  $A_3=8,57538 \times 10^{-9}$ ,  $B_0=-1,07588 \times 10^1$ ,  $B_1=6,32529 \times 10^{-2}$ ,  $B_2=-2,53591 \times 10^{-4}$  e  $B_3=6,33784 \times 10^{-7}$ . Tsilingiris (2008) calculou os valores para o ‘fator de aumento’, em função da temperatura, e encontrou valores entre 1,0000 e 1,0046, na faixa de temperaturas em estudo (de 0 a 100°C)

Para a determinação da pressão de saturação do vapor em função da temperatura, Tsilingiris (2008) propõe a seguinte equação polinomial:

$$P_{sv} = E_0 + E_1 \cdot T + E_2 \cdot T^2 + E_3 \cdot T^3 + E_4 \cdot T \quad (4.10)$$

onde  $E_0, E_1, E_2, E_3$  e  $E_4$  são constantes numéricas.



A Equação 4.10 foi ajustada pelo autor a partir de dados de pressão de saturação do vapor na faixa de temperaturas de 0 a 100°C e apresenta precisão de 1,5%. Os valores numéricos dos coeficientes da Equação 4.10 são  $E_0=0,7073034146$ ,  $E_1=-2,703615165 \times 10^{-2}$ ,  $E_2=4,36088211 \times 10^{-3}$ ,  $E_3=-4,662575642 \times 10^{-5}$  e  $E_4=1,034693708 \times 10^{-6}$ .

A massa específica de uma mistura binária de vapor d'água puro e ar seco com pressões parciais e frações molares  $P_v$  e  $x_v$  e  $P_a=P_0-P_v$  e  $x_a=1-x_v$  respectivamente, é calculada com precisão a partir da equação de estado dos gases, pela correlação de mistura representada pela Equação 4.11:

$$\rho_m = \frac{1}{z_m(x_v, T)} \cdot \frac{P_0}{R.T} \cdot \left( M_a \cdot \frac{P_0 - P_v}{P_0} + M_v \frac{P_v}{P_0} \right) \quad (4.11)$$

onde  $z_m(x_v, T)$  é o fator de compressibilidade para a mistura gasosa e  $M_a$  e  $M_v$  são as massas molares do ar e do vapor [kg kmol<sup>-1</sup>], respectivamente. A partir da expressão 4.11, a massa específica pode ser estimada como uma função da fração molar de vapor d'água:

$$\rho_m = \frac{1}{z_m(x_v, T)} \cdot \frac{P_0}{R.T} \cdot M_a \left( 1 - x_v \cdot \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right) \quad (4.12)$$

Esta equação, combinada com a Equação 4.6, conduz à seguinte para a massa específica de uma mistura binária:

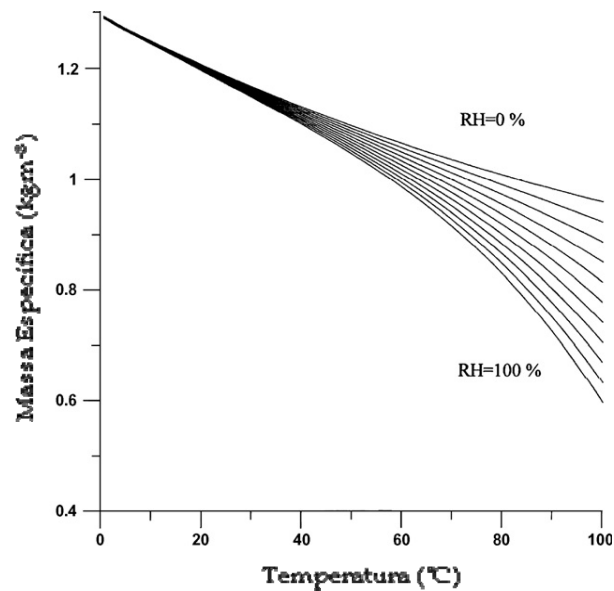
$$\rho_m = \frac{1}{z_m(x_v, T)} \cdot \frac{P_0}{R.T} \cdot M_a \left( 1 - f(P, T) \cdot RH \cdot \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \cdot \left( \frac{P_{sv}}{P_0} \right) \right) \quad (4.13)$$

Ainda que o fator de compressibilidade para o ar seco nas condições ambientais seja unitário, Melling *et al.* (1997), citados por Tsilingiris (2008), estimaram seu valor para o ar úmido na faixa de temperaturas de 100 a 200°C através da seguinte expressão:

$$z_m(x_v, T) = 1 + x_v \cdot \left( \frac{a + c.T}{a + b.T} - 1 \right) \quad (4.14)$$

A partir da correta seleção dos valores das constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$ , Tsilingiris (2008) calculou os valores de  $z_m$  e verificou que os mesmos se encontram entre 0,9848 e 0,9947 na faixa de temperaturas em estudo (0 a 100°C).

A Figura 4.3 apresenta a massa específica do ar, estimada a partir da Equação 4.13, em função da temperatura para uma umidade relativa de 0% (ar seco) a 100% (condições de saturação).



**Figura 4.3:** Massa específica de ar úmido como uma função da temperatura tendo-se a umidade relativa como parâmetro de curva, entre o ar seco (curva superior, RH=0%) e condições de saturação (curva inferior, RH=100%). Fonte: Tsilingiris (2008).

A partir da análise da Figura 4.3, observa-se que o aumento da umidade relativa conduz à diminuição da massa específica do ar úmido, especialmente na faixa de temperaturas maiores. Tsilingiris (2008) verificou que, a 50°C, a redução da massa específica em função do aumento da umidade relativa é da ordem de 4,8%, enquanto que, a 100°C, tal redução chega a 37,5%. A partir destes resultados, o autor ajustou um modelo polinomial de 3º grau ( $R^2=0,999954$ ) que descreve o comportamento da massa específica do ar úmido saturado em função da temperatura, na faixa de 0 a 100°C. Este modelo é expresso pela Equação 4.15.

$$\rho_m = 1,29339 - (5,53844 \times 10^{-3}) \cdot T + (3,86020 \times 10^{-5}) \cdot T^2 - (5,25361 \times 10^{-7}) \cdot T^3 \quad (4.15)$$

## 4.2 Metodologia

Para a determinação da massa específica dos produtos em estudo em função da temperatura, foram utilizados 12 picnômetros de vidro com capacidade de 25 mL cada. Foram determinadas as massas específicas e as massas específicas aparentes, ou seja, os valores da propriedade para as polpas com ar e para as polpas desaeradas, nas temperaturas de 30 a 80°C, a cada intervalo de 10°C. Para fins de simplificação, as polpas com ar serão denominadas, a partir deste momento, simplesmente de polpas (sem o adjetivo aerado).

### 4.2.1 Calibração dos picnômetros

A calibração dos picnômetros tem como objetivo a determinação do volume real de cada frasco. Previamente à calibração, os picnômetros foram lavados e secos e, em seguida, a massa dos frascos vazios foi determinada em balança analítica. O procedimento utilizado para a calibração dos picnômetros foi o mesmo que o empregado na determinação da massa específica das amostras. Porém, na calibração, foi utilizada água destilada isenta de ar no interior dos frascos. A calibração dos picnômetros foi realizada em duplicata, para toda a faixa de temperaturas de trabalho (30 a 80°C, com intervalos de 10°C).

A determinação do volume real ( $V$ , [m<sup>3</sup>]) do picnômetro foi realizada com auxílio da Equação 4.16:

$$V = \frac{m_{pc} - m_p}{\rho_w} \quad (4.16)$$

onde  $m_{pc}$  é a massa do picnômetro com a amostra [kg],  $m_p$  é a massa do picnômetro vazio [kg] e  $\rho_w$  é a massa específica da água [kg m<sup>-3</sup>]. No Apêndice A.1 podem ser encontrados os volumes reais dos picnômetros utilizados.

### 4.2.2 Procedimento Experimental

A determinação da massa específica das amostras tem início com os picnômetros sendo preenchidos completamente com a amostra e imersos em um banho termostático na temperatura desejada. A temperatura da amostra no interior dos picnômetros foi monitorada com auxílio de um termômetro de mercúrio. Atendido o equilíbrio térmico, a tampa do picnômetro foi adaptada ao frasco, instante em que ocorria o esgotamento do excesso de líquido. Neste momento, os picnômetros foram retirados do banho termostático, sua superfície externa foi seca completamente com auxílio de um papel absorvente e sua massa foi determinada em balança analítica.

### 4.2.3 Cálculo da Massa Específica

A massa específica de cada amostra,  $\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ], foi calculada a partir da Equação 4.17:

$$\rho = \frac{m_{pc} - m_p}{V} \quad (4.17)$$

### 4.2.4 Análise dos Dados e Ajuste dos Modelos

A análise de Variâncias e o Teste de Tukey, com um nível de significância de 5 % foi realizada para os resultados referentes às temperaturas de 30 e 80°C. O comportamento da massa específica das polpas com a temperatura ( $T$ ) foi ajustada segundo os modelos linear (Equação 4.18) e quadrático (Equação 4.19), com o auxílio do *Software Excel*.

$$\rho = b.T + c \quad (4.18)$$

$$\rho = a.T^2 + b.T + c \quad (4.19)$$

O comportamento da massa específica das polpas com a temperatura e com o teor de açúcar adicionado ( $C_0$ ) foi ajustada segundo um modelo quadrático de regressão múltipla

(Equação 4.20), com o auxílio do *Software Statistica 7.0*. Os parâmetros dos modelos foram submetidos à Análise de Variâncias, sendo aceitos somente os significativos, com um nível de significância de 5%.

$$\rho = a + bT + cT^2 + dCo + eCo^2 + fTCo \quad (4.20)$$

Foi determinado o coeficiente de variabilidade (CV) para cada um dos modelos de regressão múltipla ajustados. O coeficiente foi calculado a partir da Equação 4.21 (NAIMAN *et al.*, 1977, citados por MOURA, VITALI e HUBINGER, 1999). Caso o valor do coeficiente de variabilidade seja inferior a 10%, pode-se afirmar que o ajuste dos dados experimentais ao modelo foi adequado.

$$CV = \frac{\left[ \frac{1}{N} \sum (Y_e - Y_p)^2 \right]^{1/2}}{\frac{1}{N} \sum Y_e} \cdot 100 \quad (4.21)$$

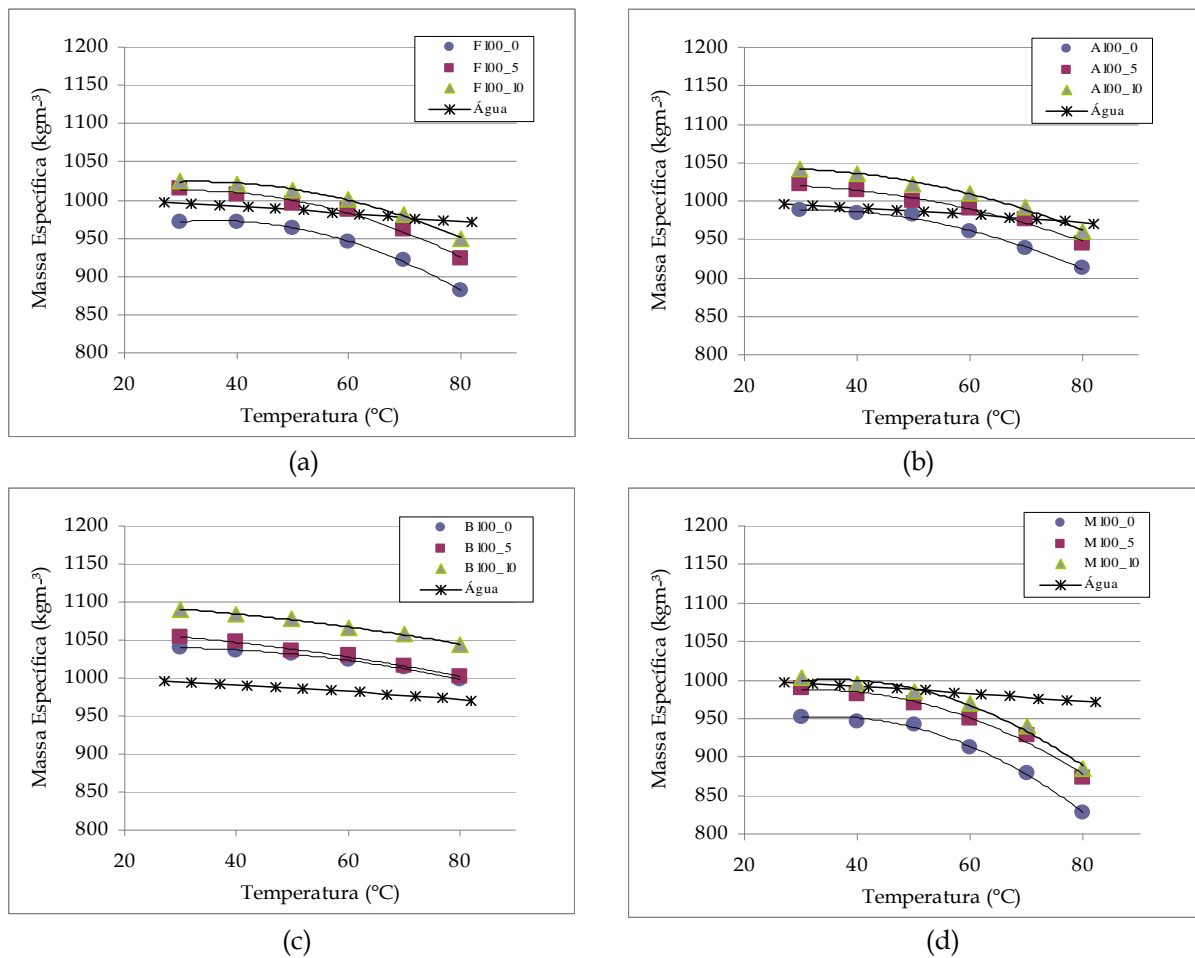
onde  $N$  é o número de observações,  $Y_e$  é o valor experimental e  $Y_p$  é o valor predito pelo modelo.

Os resultados (médias) dos experimentos de determinação da massa específica podem ser encontrados no Apêndice A.2.

## 4.3 Resultados e Discussão

### 4.3.1 Massa específica das polpas em função da temperatura

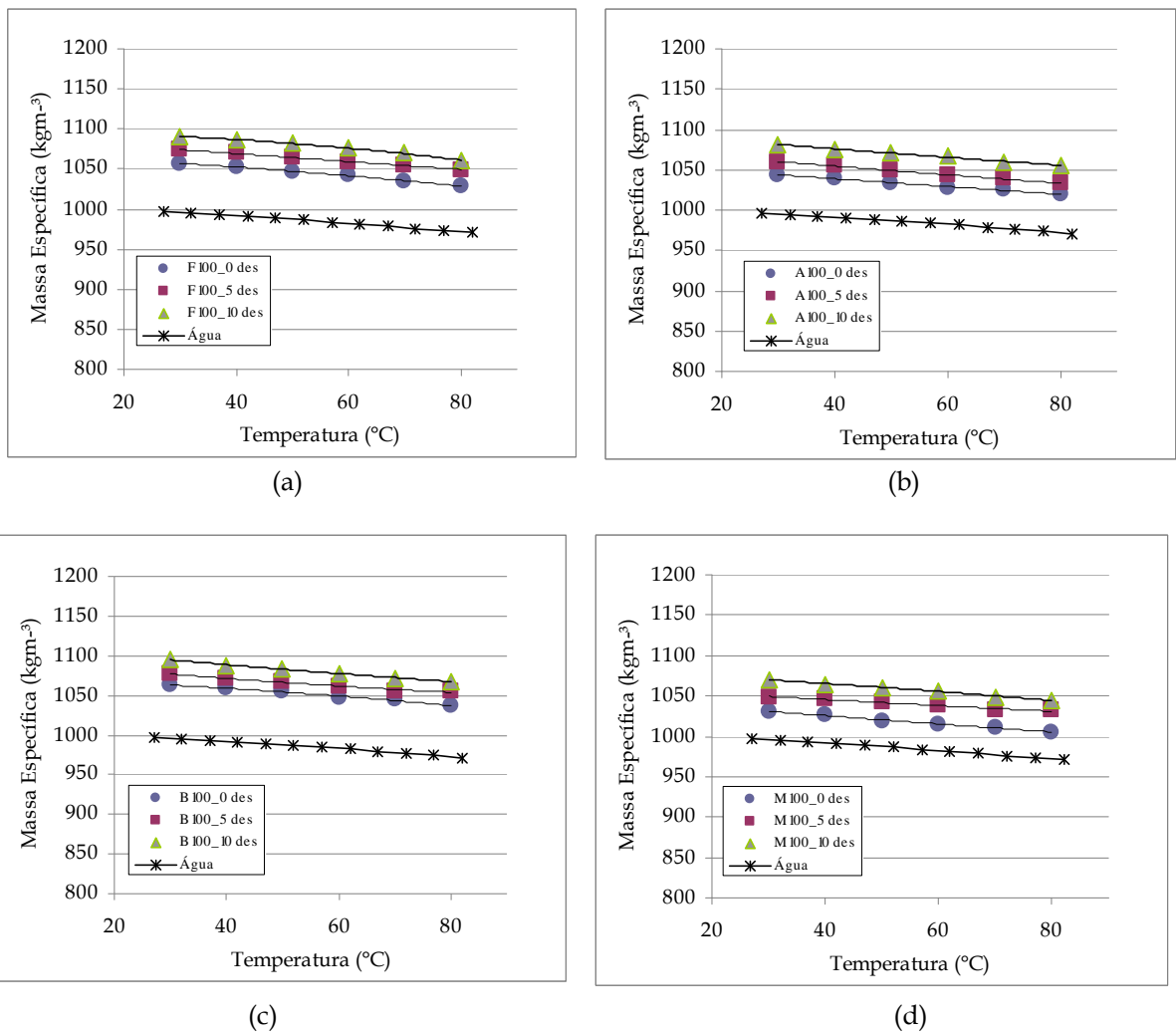
O comportamento da massa específica aparente das polpas com a temperatura pode ser observada nos gráficos da Figura 4.4. Nestes gráficos também é indicado o comportamento da massa específica da água pura com a temperatura, na faixa de estudo, com dados da literatura (INCROPERA, 2003).



**Figura 4.4:** Massa específica aparente das polpas e da água em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de açúcar adicionado; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.

Pela análise da Figura 4.4 verifica-se que, para todos os produtos, ocorre a diminuição da massa específica aparente com o aumento da temperatura, o que está relacionado à expansão volumétrica sofrida pelos mesmos, uma vez que a energia fornecida ao sistema faz com que suas moléculas vibrem com velocidades maiores, ficando cada vez mais afastadas umas das outras. Além disso, o aumento do teor de sólidos, provocado pela adição de açúcar, faz com que a massa específica aparente das polpas aumente. Analisando as curvas, observa-se que o comportamento da massa específica aparente das polpas diverge dos dados disponíveis na literatura para este tipo de produto (conforme modelos apresentados no Anexo A), uma vez que seu comportamento não é linear com a temperatura. Além disso, apesar das polpas possuírem um teor de sólidos de cerca de 10 a 25%, seus valores de massa

específica são, em algumas polpas e para as maiores temperaturas, inferiores à massa específica da água. Este resultado motivou a realização a desaeração das polpas, já que, supostamente, a presença de ar nos produtos poderia ser responsável por tal comportamento da massa específica. Assim, também foram determinadas as massas específicas de todas as polpas desaeradas, e os resultados são apresentados na Figura 4.5.



**Figura 4.5:** Massa específica das polpas desaeradas, tendo-se como parâmetro de curva o teor de açúcar adicionado; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.

Através da análise das curvas apresentadas na Figura 4.5, verifica-se que a massa específica das polpas desaeradas varia linearmente com a temperatura. Além disso, os valores de massa específica destes produtos são, para toda a faixa em estudo, superiores aos da água, uma vez que apresentam sólidos dissolvidos e em suspensão. Com estes resultados,

---

foi possível verificar que a presença de ar nas polpas provavelmente é a responsável pelo comportamento anteriormente identificado na massa específica das mesmas. Comparando o formato das curvas apresentadas na Figura 4.4 com o das curvas da massa específica do ar em função da temperatura e da umidade relativa, Figura 4.3, verifica-se a similaridade de comportamentos, principalmente quando se observa a curva para o ar saturado de umidade. Isto demonstra que, provavelmente, as polpas em estudo realmente se comportem como apresentado na seção 4.1.4, onde se assume que as mesmas são sistemas bifásicos, compostos por uma fase líquida, que possui sólidos dissolvidos (açúcares, sais e ácidos) e em suspensão (gommas), e uma fase gasosa, constituída pelas bolhas de ar. Como as bolhas de ar estão envoltas por uma fase líquida, entende-se que, com o aumento da temperatura, haja uma tendência à migração de vapor para o interior das bolhas de ar, saturando-o de umidade. Desta forma, o comportamento da massa específica da fase gasosa contida nas polpas pode ser expresso segundo o modelo proposto por Tsilingiris (2008) para o ar saturado de umidade, ou seja, um modelo polinomial de 3º grau (Equação 4.15).

Os resultados experimentais obtidos para as polpas e para as polpas desaeradas foram ajustados aos modelos quadrático (Equação 4.19) e linear (Equação 4.18), respectivamente, e apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,97. Os parâmetros ajustados e os respectivos coeficientes de correlação estão apresentados na Tabela 4.2. Cabe salientar que estes modelos são válidos para a faixa de temperaturas de 30 a 80°C, e para as polpas com teores de sólidos solúveis apresentados na Tabela 3.3.



**Tabela 4.2:** Parâmetros  $a$ ,  $b$ , e  $c$  dos modelos para a massa específica aparente e da massa específica [kg m<sup>-3</sup>] em função da temperatura, e os respectivos coeficientes de correlação.

Produto	Parâmetros dos modelos			R <sup>2</sup>
	a	b	c	
F-100-0	-0,0139	0,7081	1030,9	0,9980
F-100-5	-0,0075	-0,2067	1067,2	0,9915
F-100-10	-0,0065	-0,2065	1102,9	0,9961
A-100-0	-0,0475	3,4368	910,8	0,9987
A-100-5	-0,0371	2,3516	975,1	0,9876
A-100-10	-0,0332	2,1785	988,3	0,9955
B-100-0	-0,0327	2,0545	956,1	0,9934
B-100-5	-0,0217	0,9613	1010,1	0,9846
B-100-10	-0,0260	1,2843	1026,3	0,9949
M-100-0	-0,0614	4,2922	877,2	0,9970
M-100-5	-0,0485	3,1425	936,2	0,9853
M-100-10	-0,0569	4,0516	928,6	0,9888
F-100-0 des*		-0,5157	1079,4	0,9859
F-100-5 des		-0,4596	1089,9	0,9846
F-100-10 des		-0,5465	1110,7	0,9959
A-100-0 des		-0,5718	1075,2	0,9917
A-100-5 des		-0,4974	1089,2	0,9984
A-100-10 des		-0,5917	1110,2	0,9786
B-100-0 des		-0,4838	1058,3	0,9873
B-100-5 des		-0,5153	1096,7	0,9920
B-100-10 des		-0,5373	1076,1	0,9967
M-100-0 des		-0,5087	1046,0	0,9961
M-100-5 des		-0,3706	1060,4	0,9720
M-100-10 des		-0,5206	1086,3	0,9865

\* 'des' refere-se a 'polpa desaerada'

### 4.3.2 Massa específica das polpas em função da temperatura e do teor de açúcar adicionado

A fim de modelar a influência combinada da temperatura e do teor de açúcar adicionado às polpas, foi utilizado o modelo quadrático (Equação 4.20). A Tabela 4.2 apresenta os resultados dos ajustes para as polpas e para as polpas desaeradas, cujos coeficientes de correlação foram superiores a 0,99 e coeficientes de variabilidade foram inferiores a 0,5%, demonstrando que o modelo se ajustou muito bem aos dados. Estes modelos, da mesma forma que os apresentados na seção 4.3.1, são válidos para a faixa de temperaturas de 30 a 80°C, e para as polpas com teores de sólidos solúveis apresentados na Tabela 3.3. Os gráficos de Pareto, que denotam a significância dos parâmetros dos modelos, podem ser encontrados no Apêndice A.3, bem como os gráficos dos valores observados *versus* preditos.

**Tabela 4.3:** Parâmetros *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *f* dos modelos do comportamento da massa específica aparente e da massa específica com a temperatura e com o teor de açúcar adicionado às polpas, e dos coeficientes de correlação e variabilidade.

Produto	Parâmetros dos modelos						R <sup>2</sup>	CV(%)
	a	b	c	d	e	f		
F-100	935,25	2,4959	-0,0393	8,5466	-0,4738	0,0347	0,9941	0,30
A-100	969,79	1,4527	-0,0268	7,5503	-0,2030	ns	0,9924	0,30
B-100	1046,4	ns**	-0,0090	-1,8580	0,8350	ns	0,9944	0,19
M-100	890,54	3,7015	-0,0556	9,1218	-0,5310	ns	0,9915	0,46
F-100 des*	1066,9	ns	ns	3,9720	ns	ns	0,9960	0,10
A-100 des	1060,3	-0,5510	ns	2,3380	0,2090	ns	0,9978	0,08
B-100 des	1078,5	-0,5080	ns	2,5960	-0,5080	ns	0,9948	0,10
M-100 des	1043,0	-0,4440	ns	4,9740	ns	ns	0,9933	0,14

\* 'des' refere-se a 'polpa desaerada'

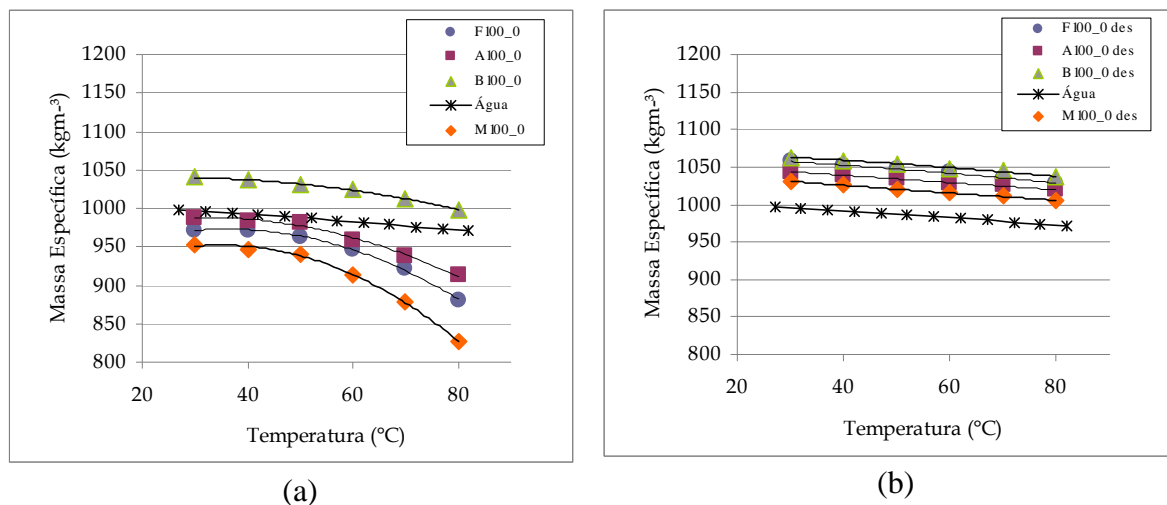
\*\* Parâmetro não significativo

Observa-se, novamente, que o comportamento das massas específicas das polpas com a temperatura segue um modelo quadrático. Além disso, fica clara a relação linear existente entre a massa específica das polpas desaeradas e a temperatura, uma vez que a influência do quadrado da temperatura não se mostrou significativa. Outro fator interessante de ser analisado é a não dependência da massa específica da polpa de framboesa desaerada com a

temperatura. Isto porque o modelo ajustado para este produto demonstra que a massa específica desta polpa, para a faixa estudada, apenas é dependente do teor de açúcar adicionado à mesma. No Apêndice A.4, são apresentados os gráficos de superfície destes modelos, bem como as curvas de contorno.

### 4.3.3 Comparação entre as polpas dos diferentes frutos

A Figura 4.6 apresenta as curvas da massa específica aparente das polpas e da massa específica das polpas desaeradas em função da temperatura, onde o parâmetro de curva é o tipo de fruto. Além disso, a massa específica da água em função da temperatura também é apresentada. Foi realizada a comparação das massas específicas das polpas aeradas e desaeradas entre si e com a água, nas temperaturas de 30 e 80°C. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.



**Figura 4.6:** Comparação entre as massas específicas das polpas dos frutos em estudo, sem açúcar; (a) massa específica aparente das polpas, (b) massa específica das polpas desaeradas.

A partir da análise da Tabela 4.4, observa-se que a retirada do ar das polpas resultou em um aumento significativo da massa específica das mesmas, para todos os frutos, tanto na temperatura de 30°C, quanto na temperatura de 80°C.

**Tabela 4.4:** Comparação de médias das massas específicas aparentes e das massas específicas das polpas dos diferentes frutos a 30 e 80°C e diferença média relativa (DMR) das massas específicas das polpas em relação à massa específica da água.

Produto	Massa específica (kg m <sup>-3</sup> )			
	30°C	DMR** (%)	80°C	DMR(%)
Água	995,8 d*	-	972,2 e	-
F-100-0	971,9 e	-2,40	880,7 f	-9,41
A-100-0	988,5 d	-0,73	912,4 g	-6,15
B-100-0	1040,2 b	4,46	997,9 d	2,64
M-100-0	952,6 f	-4,34	826,7 h	-14,97
F-100-0 des	1057,7 a	6,22	1028,3 ab	5,77
A-100-0 des	1044,0 b	4,84	1019,1 bc	4,82
B-100-0 des	1063,1 a	6,76	1036,7 a	6,63
M-100-0 des	1031,1 c	3,54	1005,0 cd	3,37

\* Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras ao nível de 5% de significância, pelo Teste de Tukey.

\*\* Diferença média da massa específica da polpa em relação à da água, em percentual

Quanto às polpas aeradas, observa-se que, a 30°C, a massa específica aparente da polpa de amora é semelhante à massa específica da água. As massas específicas aparentes das polpas de framboesa e morango são menores que a da água, enquanto que a da polpa de mirtilo é maior. A 80°C, todas as massas específicas aparentes diferem entre si. A massa específica aparente da polpa de mirtilo ainda é maior que a da água, enquanto que as demais são menores que a da água. Provavelmente um dos fatores mais importantes para este resultado seja o teor de ar disperso na polpa, de forma que, quanto maior este teor, menor é a massa específica aparente do produto e maior é a sua variação com a temperatura. Através da análise visual das polpas este comportamento era esperado, pois foi notável a diferença entre as viscosidades dos produtos e observou-se uma relação direta entre a viscosidade e a quantidade de ar disperso na polpa. Visualmente foi possível perceber que a polpa de mirtilo apresenta uma viscosidade inferior às demais polpas, enquanto que as polpas de framboesa e de morango, viscosidades mais elevadas quando comparadas às demais. Contudo, medições da viscosidade dos produtos são necessárias para a obtenção de resultados conclusivos, visto que não existem dados disponíveis na literatura. Vale lembrar que este trabalho não tem como objetivo a determinação de propriedades reológicas das polpas.

Em relação às polpas desaeradas, verifica-se que, a 30°C, as polpas de framboesa e mirtilo possuem massas específicas semelhantes, enquanto que as demais possuem massas específicas menores. Além disso, as massas específicas de todas as amostras diferiram significativamente da água, sendo superiores a esta. A 80°C, as massas específicas das polpas são igualmente superiores às da água. A massa específica da polpa de framboesa é semelhante à da amora e do mirtilo; a massa específica da polpa de amora é semelhante a das polpa de morango e de framboesa.

#### 4.3.4 Determinação da fração gasosa das polpas

Conhecendo-se como variam as massas específicas das polpas, das polpas desaeradas e do ar saturado de umidade, com a temperatura, e assumindo-se que o comportamento da massa específica do ar disperso nas polpas com a temperatura segue o modelo proposto por Tsilingiris (2008), Equação 4.15, é possível determinar a fração gasosa de cada polpa mediante um balanço material através da Equação 4.22.

$$\rho_{polpa\ aerada} = (1 - v_{ar})\rho_{polpa\ desaerada} + v_{ar}\rho_{ar} \quad (4.22)$$

onde  $\rho_{polpa\ aerada}$  é a massa específica aparente da polpa,  $v_{ar}$  é a fração volumétrica de ar,  $\rho_{polpa\ desaerada}$  é a massa específica da polpa e  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar.

Os resultados obtidos para o balanço material das polpas estão apresentados na Tabela 4.5. Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 4.5 verifica-se que a fração de vazios, a 30°C, é bastante variável, porém condizente com a discussão realizada na seção 4.3.1. Também, é possível visualizar o maior teor de ar disperso nas polpas de morango e framboesa, um teor um pouco inferior na polpa de amora e menor ainda na polpa de mirtilo. Observa-se, ainda, um incremento da fração gasosa das polpas com o aumento da temperatura; isto pode estar relacionado com a transferência de vapor d'água da fase líquida para o interior das bolhas de ar. Cabe salientar que para que este fenômeno ocorra as bolhas de ar no interior das polpas não podem estar saturadas de vapor d'água e, assim sendo, o modelo empregado na estimativa do comportamento da massa específica do ar com a temperatura não é o mais indicado, já que o mesmo deve ser aplicado para ar saturado.

Porém, considerou-se conveniente a apresentação desta determinação, já que, por ser a análise estritamente comparativa, as quatro estimativas carregam consigo o mesmo erro.

**Tabela 4.5:** Fração gasosa das polpas.

Temperatura (°C)	Fração de ar disperso ( $v_{ar}$ )			
	Polpa de Framboesa	Polpa de Amora	Polpa de Mirtilo	Polpa de Morango
30	0,082	0,053	0,023	0,078
40	0,076	0,051	0,021	0,073
50	0,079	0,055	0,021	0,081
60	0,091	0,066	0,024	0,100
70	0,113	0,083	0,030	0,132
80	0,144	0,106	0,038	0,177

Outra explicação para o aumento da fração mássica de ar com a temperatura é a expansão volumétrica, que para gases é maior do que para líquidos; isto também explica a diminuição da massa específica com a temperatura ser mais acentuada para polpas contendo ar em sua composição.

#### 4.3.5 Massa específica dos néctares

Na Tabela 4.4 também é apresentado um cálculo da diferença média relativa (*DMR*) entre a massa específica das polpas e a da água, na mesma temperatura. Este cálculo foi realizado utilizando a Equação 4.23.

$$DMR = \frac{\rho_{polpa} - \rho_{água}}{\rho_{água}} \times 100 \quad (4.23)$$

Estes resultados demonstram que a massa específica da polpa difere da massa específica da água, sendo superior a esta nos valores de *DMR* positivos e inferior nos valores de *DMR* negativos. Desta forma, é possível observar que a massa específica das polpas desaeradas é cerca de 3 a 7% superior à da água. Este resultado determinou que a medida da massa específica dos néctares não seria relevante, uma vez que, com a adição de água ao

---

produto, os valores de massa específica tenderiam a se aproximar cada vez mais da massa específica da água pura. Um balanço material pode ser realizado a fim de determinar a massa específica dos néctares formulados com as polpas ensaiadas e a água, conhecendo-se a fração mássica de cada componente e utilizando-se os modelos de predição apresentados neste trabalho.

## 4.4 Conclusão

Foi possível compreender, ao longo do trabalho, que as polpas de frutas são produtos heterogêneos, comportando-se fisicamente como meios porosos complexos. Foram visualizados os comportamentos distintos da massa específica aparente e da massa específica destes produtos com o aumento da temperatura, informação esta de grande importância no projeto de instalações industriais. Com a análise termodinâmica realizada sobre este sistema físico, foi possível compreender que o ar úmido disperso na estrutura interna das polpas é provavelmente o responsável pelos comportamentos observados.

Verificou-se que a presença de bolhas de ar nos produtos altera o comportamento da massa específica dos mesmos com a temperatura; o comportamento da propriedade, nas polpas aeradas, pode ser ajustado a um modelo polinomial de segunda ordem, enquanto que, nas polpas isentas de ar, a massa específica é uma função linear da temperatura.

Observou-se que os valores da massa específica e massa específica aparente para as polpas de frutas são muito próximos aos valores das propriedades para a água pura, já que estes alimentos possuem elevados conteúdos de umidade. Estes resultados motivaram a não determinação experimental destas propriedades para os néctares, uma vez que, com a diluição das polpas, as propriedades dos produtos tenderiam a se aproximar cada vez mais dos valores da água pura.

Foram ajustados vários modelos de predição da massa específica e da massa específica aparente de polpas de amora, framboesa, morango e mirtilo, em função da

temperatura e da composição dos produtos; os modelos ajustados apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,97 e coeficientes de variabilidade inferiores a 0,5%, o que denota que os ajustes foram muito bons.



## Capítulo 5

# Condutividade Elétrica

Neste capítulo são apresentados os aspectos relativos à condutividade elétrica dos produtos estudados, sendo inicialmente abordados os seus conceitos e principais aplicações, a importância do seu conhecimento para a indústria, as técnicas disponíveis para sua determinação e os dados já publicados na literatura para o tipo de produto em estudo. Posteriormente, são apresentados a metodologia aplicada e os resultados encontrados na determinação da condutividade elétrica das polpas e dos néctares.

### 5.1 Fundamentos Teóricos

#### *5.1.1 Definições e Aplicações*

A condutividade elétrica ( $k_e$ , com unidade  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  ou  $\text{S m}^{-1}$ ), também chamada de condutância específica, é a habilidade de um material transportar corrente elétrica, e sua

medida fornece a determinação do comportamento iônico de soluções eletrolíticas. Consiste no inverso da resistividade de um material, sendo definida segundo a Equação 5.1:

$$k_e = \frac{1}{r_e} = \frac{I \cdot L}{U \cdot A} = \frac{1}{Res} \cdot \frac{L}{A} \quad (5.1)$$

onde,  $r_e$  é a resistividade do material [ $\Omega \cdot m$ ],  $I$  é a corrente elétrica [A],  $U$  é a força eletromotriz [V],  $L$  é a distância entre os eletrodos [m],  $A$  é a área de seção transversal dos eletrodos [ $m^2$ ] e  $Res$  é a resistência à passagem de corrente elétrica do material [ $\Omega$ ].

Watson *et al.* (1979), citados por Moura (1998), utilizaram a condutividade elétrica como parâmetro de correlação na determinação rápida do conteúdo de umidade em milho estocado. Salé (1974), citado por Moura (1998), utilizou esta propriedade na diferenciação entre carne fresca e descongelada.

Segundo de Alwis e Fryer (1992), citados por Castro *et al.* (2004), ultimamente, esta propriedade tem sido mais amplamente estudada devido à sua importância no aquecimento ôhmico, um processo onde a corrente elétrica passa através dos alimentos com o objetivo de aquecê-los, sendo o calor gerado devido à resistência elétrica dos mesmos. O aquecimento ôhmico foi uma tecnologia utilizada no século XIX para a pasteurização de leite que não obteve sucesso por limitações técnicas. Porém, devido aos avanços na tecnologia de materiais e de processos, nos últimos 20 anos este processo tem sido amplamente estudado como uma alternativa para o tratamento térmico de alimentos. Suas características fazem dele uma tecnologia promissora no processamento de alimentos líquidos contendo partículas suspensas e/ou com alta viscosidade, os quais apresentam dificuldades e desvantagens ao serem processados pelas técnicas tradicionais de tratamento térmico. Isto porque, a maior vantagem deste processo é proporcionar um aquecimento rápido e uniforme aos materiais. No caso de alimentos de elevada viscosidade ou que contenham partículas sólidas, é possível fazer com que as fases líquida e sólida tenham a mesma taxa de aquecimento, evitando, assim, o sobreaquecimento das partículas/zonas mais externas. As potenciais aplicações industriais deste processo são muito vastas e incluem o descongelamento, o branqueamento, a evaporação, a desidratação, a fermentação, a pasteurização, entre outros.

Segundo Icier e Ilicali (2005), a aplicabilidade do aquecimento ôhmico depende da condutividade elétrica do produto. Recentemente, a indústria de alimentos mundial tem dado maior atenção para o aquecimento ôhmico de alimentos que podem ser bombeados. Esta é uma técnica altamente atrativa para o processamento contínuo de alimentos, já que pode ser usada como um aquecedor contínuo *in-line* para aquecimento e esterilização de produtos alimentícios líquidos e viscosos. Segundo Sastry e Barach (2000), citados por Icier e Ilicali (2005), o aquecimento ôhmico tem sido usado no processamento de frutas integrais no Japão, e no Reino Unido, para a produção de sucos de frutas.

Segundo Sarang *et al.* (2008), quando o aquecimento ôhmico é aplicado ao controle microbiano, o rápido aquecimento resulta em um menor dano térmico às substâncias termolábeis, tais como as vitaminas e os pigmentos. Um produto com alta qualidade e com mínimas alterações estruturais, nutricionais e organolépticas pode ser produzido em um curto período de operação. Tem sido demonstrado por diversos pesquisadores que o aquecimento ôhmico acelera as taxas de secagem de alimentos (LIMA e SASTRY, 1999; WANG e SASTRY, 2000; ZHONG e LIMA, 2003; citados por SARANG *et al.*, 2008) e aumenta o rendimento de sucos (LIMA e SASTRY, 1999; WANG e SASTRY, 2002; HALDEN *et al.*, 1990; citados por SARANG *et al.*, 2008).

Segundo Icier *et al.* (2006), o branqueamento de polpas é tão importante quanto a etapa de esterilização para a obtenção de produtos de alta qualidade. A inativação enzimática e a manutenção da cor são os maiores objetivos do branqueamento. O branqueamento de polpas por imersão em água quente demanda longo tempo de processo, criando efeitos adversos na qualidade e no rendimento do produto. Além disso, o branqueamento com água pode resultar em um problema ambiental pela alta geração de águas residuárias. O aquecimento ôhmico pode ser usado como um sistema alternativo para o branqueamento de vegetais. Mizrahi (1996), citado por Icier *et al.* (2006), afirma que o branqueamento via aquecimento ôhmico reduz consideravelmente a quantidade de sólidos perdidos por lixiviação, quando comparado ao processo com água quente, além de ser mais rápido. Icier *et al.* (2006) estudaram a aplicação do aquecimento ôhmico no branqueamento de purês de ervilha, observando que a inativação enzimática ocorreu mais rapidamente que no processo convencional. Os branqueamentos ôhmicos com campos elétricos inferiores a 20 V cm<sup>-1</sup> produziram purês de ervilha com cores melhores que o branqueamento tradicional.

### 5.1.2 Técnicas de Determinação da Condutividade Elétrica

O método mais comum e amplamente utilizado na determinação da condutividade elétrica de soluções é o condutivimétrico. Vários autores utilizaram este método em seus trabalhos, entre eles podem-se citar: Moura (1998) utilizou para sucos de tangerina, abacaxi e limão; Sobolik *et al.* (2002), para soluções de café solúvel; Diniz *et al.* (2003), para polpa de acerola e Legrand *et al.* (2007), para feijão cozido.

No método condutivimétrico utiliza-se geralmente um condutivímetro de bancada, que possui uma sonda com eletrodos de aço inoxidável ou platina, em formatos de placas, discos ou anéis, que variam de acordo com o tipo de produto que será ensaiado. Na Figura 5.1 é apresentado um esquema da sonda para medição da condutividade elétrica, pelo método condutivimétrico.



**Figura 5.1:** Desenho esquemático da sonda para medição da condutividade elétrica.

O comportamento da condutividade elétrica de alimentos também pode ser monitorado durante o processo de aquecimento ôhmico. Geralmente, este estudo é realizado em reatores ôhmicos estáticos e a determinação da condutividade elétrica durante o processo é realizada através da utilização da Equação 5.1, a partir do monitoramento da força eletromotriz e da corrente elétrica aplicada ao sistema, além do conhecimento dos parâmetros físicos do reator, tais como distância entre os eletrodos e área de seção transversal dos mesmos.

### *5.1.3 Correlações Empíricas e Dados da Literatura*

Segundo Min, Sastry e Balasubramaniam (2007), a condutividade elétrica pode ser influenciada por um grande número de parâmetros, tais como, temperatura, concentração de eletrólitos, teor dos constituintes químicos, viscosidade, sólidos em suspensão, força eletrolítica e presença de estruturas celulares. Segundo Lewicki (2004), a condutividade elétrica ocorre em meios que contêm moléculas eletricamente carregadas. Moléculas com baixa massa molar são eletrólitos com carga precisamente definida. Com macromoléculas, a situação não é tão clara e existe um grande interesse em métodos que estimem a carga de biopolímeros.

Segundo Lewicki (2004) afirma, a viscosidade de um alimento líquido afeta pronunciadamente a mobilidade iônica, influenciando na condutividade elétrica. Além disso, Palaniappan e Sastry (1991), citados por Icier e Ilicali (2005) e por Lewicki (2004), afirmam que a resistência ao movimento iônico é maior com o aumento do conteúdo de sólidos insolúveis. Vieira e Cartapatti-Stuchi (2006), avaliando o efeito do tamanho das partículas em suspensão no suco de manga sobre a condutividade elétrica, concluíram que quanto maiores forem as partículas em suspensão menor será a condutividade elétrica, devido à diminuição da mobilidade iônica.

Icier e Ilicali (2005) estudaram as variações na condutividade elétrica de polpas de pêssego e damasco durante o seu aquecimento em um reator ôhmico, verificando os efeitos da temperatura e dos gradientes de voltagem aplicados. Os referidos autores verificaram que a temperatura altera mais drasticamente a condutividade elétrica do que o gradiente de voltagem. Além disso, observaram que a condutividade elétrica é dependente da concentração iônica e do conteúdo de polpa.

Vieira e Cartapatti-Stuchi (2006), estudando a aplicação do aquecimento ôhmico no descongelamento de suco de manga, verificaram que a condutividade elétrica do produto congelado não varia com a temperatura, devido à baixa mobilidade iônica no mesmo. Após a mudança de fase, a condutividade do produto passa a aumentar com a elevação da temperatura.

Sarang *et al.* (2008) determinaram a condutividade elétrica dos seguintes frutos, durante o aquecimento ôhmico na faixa de temperaturas de 20 a 140°C: maçã vermelha, maçã *golden*, pêssego, pêra, abacaxi e morango. Os autores observaram um aumento linear da condutividade elétrica com a temperatura; e que o morango e o pêssego apresentaram condutividades elétricas semelhantes, e superiores às dos demais frutos.

Estudos sobre as mudanças na condutividade elétrica de frutos durante o crescimento e amadurecimento foram realizados por Bean *et al.* (1960) e Sasson e Monselise (1977), citados por Castro *et al.* (2003). Mudanças ocorrendo nas paredes celulares, nas membranas e no conteúdo celular foram encontrados como sendo os fatores que influenciam tais alterações da condutividade elétrica. Castro *et al.* (2003) observaram que certas amostras de morangos, que apresentavam graus de maturação distintos, mostraram diferentes comportamentos da sua condutividade elétrica com o aumento da temperatura. Sarang *et al.* (2008) constataram divergências entre os valores medidos de condutividade elétrica nos frutos estudados, em relação a medições anteriores realizadas por outros pesquisadores. Concluíram que tais diferenças podem ser atribuídas à variabilidade de composição e estrutura naturalmente presente em tecidos biológicos.

Palaniappan e Sastry (1991), citados por Sarang *et al.* (2008), reportam que a condutividade elétrica é uma função linear da temperatura. Castro *et al.* (2004) avaliaram a influência da temperatura, do campo elétrico, de múltiplos tratamentos térmicos e da composição do produto na condutividade elétrica e na degradação de vitamina C de polpas integral e concentrada de morango, cobertura de morango, recheio de morango e calda mista de morango e maçã; durante o aquecimento ôhmico em um reator estático. Os autores verificaram que a condutividade elétrica aumenta com o aumento da temperatura, porém, nem sempre esta relação é linear. Para a polpa concentrada de morango e a cobertura de morango, foram identificados comportamentos que se ajustaram a modelos polinomiais de 2º grau. Segundo os autores, esta relação pode ser devido à presença de ar nos produtos. Em um aquecedor despressurizado, se existe ar disperso na amostra, as bolhas irão expandir com a temperatura, com a pressão sendo mantida constante. Se for assumido o comportamento de gás ideal para o ar, a expansão será linear com a temperatura. No entanto, um parâmetro importante para a condutividade elétrica é a área da seção transversal das bolhas no plano perpendicular ao campo elétrico e estima-se que esta área irá

aumentar aproximadamente como uma segunda ou terceira potência do volume. Desta forma, as bolhas de ar (o qual pode ser considerado isolante), irão aumentar em área, tendendo a reduzir a condutividade elétrica da mistura. Entretanto, na fase contínua há um incremento linear da condutividade com a temperatura e o efeito combinado dependerá da contribuição relativa dos componentes da mistura.

Moura (1998) estudou a condutividade elétrica de sucos de abacaxi, tangerina e limão, avaliando o efeito da concentração de sólidos solúveis e da temperatura nessa propriedade. O autor verificou que a condutividade elétrica destes sucos aumenta com o aumento da concentração, até aproximadamente 30°Brix, quando então passa a decrescer com o aumento da mesma. Isto se deve à diminuição da mobilidade iônica causada pelo aumento da viscosidade do suco em concentrações superiores a 30°Brix. Na modelagem do comportamento da condutividade elétrica em função da temperatura, o autor utilizou a equação de Arrhenius, obtendo coeficientes de correlação para os modelos superiores a 0,98. Após o estudo da atividade de água destes sucos, o autor propôs um modelo com o qual é possível obter o valor desta propriedade a partir do conhecimento da condutividade elétrica e do teor de sólidos solúveis dos produtos. Este resultado é muito interessante, uma vez que a determinação da atividade de água de alimentos exige a utilização de equipamentos caros, diferentemente dos utilizados na determinação da condutividade elétrica e do teor de sólidos solúveis. Assim, de forma rápida, barata e bastante precisa, é possível, a partir da utilização do modelo proposto, determinar a atividade de água dos sucos em questão.

No Anexo B é apresentada uma compilação das equações empíricas propostas por diversos pesquisadores para a determinação da condutividade elétrica de frutos, sucos, polpas de frutas. Nesta compilação é possível observar a faixa de aplicação e o coeficiente de correlação do ajuste de cada modelo.

## 5.2 Metodologia

### 5.2.1 Procedimento Experimental

A condutividade elétrica ( $k_e$ ) dos néctares e das polpas foi determinada por condutivimetria, utilizando um condutivímetro digital marca Digimed, modelo DM-3P. A sonda utilizada (Figura 5.2) é indicada para uso geral, na faixa de 0 a 20 mS cm<sup>-1</sup>. A sonda foi calibrada a cada operação do equipamento, a 25°C, com uma solução padrão fornecida pelo fabricante, com condutividade elétrica de 1,412 mS cm<sup>-1</sup>.

As análises foram realizadas em triplicata, nas temperaturas de 30 a 80°C, a cada intervalo de 10°C, com ambientação das amostras em banho termostático.



Modelo	K	Temp.	Tipo	Aplicação
DMC-010M	1 cm <sup>-1</sup>	0 a 100 °C	Discos de platina	Para uso geral

**Figura 5.2:** Fotografia da sonda utilizada para medição da condutividade elétrica de néctares e polpas e sua especificação fornecida pelo fabricante.

### 5.2.2 Análise dos Dados e Ajuste dos Modelos

Os resultados, quando objetos de comparação, foram submetidos à Análise de Variâncias e ao Teste de Tukey para as médias, com um nível de significância de 5%. O comportamento da condutividade elétrica dos néctares e das polpas em função da temperatura ( $T$ ) foi ajustado segundo o modelo linear expresso pela Equação 5.2, com o auxílio do *Software Excel*.

$$k_e = a.T + b \quad (5.2)$$



onde  $a$  e  $b$  são os parâmetros do modelo e  $T$  é a temperatura [°C].

O comportamento da condutividade elétrica dos produtos em função da temperatura, do teor de polpa e do teor de açúcar foi ajustado segundo um modelo quadrático de regressão múltipla expresso pela Equação 5.3, com o auxílio do *Software Statistica 7.0*

$$ke = a + b.Po + c.Po^2 + d.Co + e.Co^2 + f.T + g.T^2 + h.Po.Co + i.Po.T + j.Co.T \quad (5.3)$$

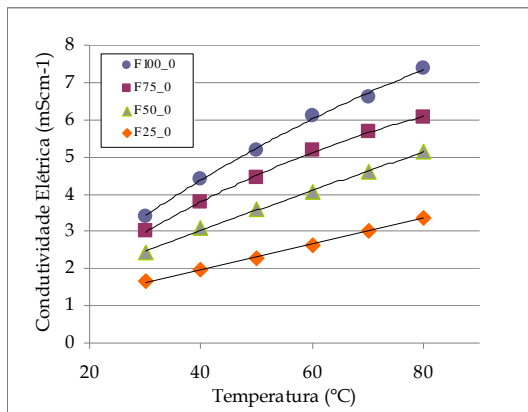
onde  $a, b, c, d, e, f, g, h, i$  e  $j$  são os parâmetros do modelo,  $Co$  é o teor de açúcar [%] e  $Po$  é o teor de polpa [%].

Os parâmetros dos modelos de regressão múltipla foram submetidos à Análise de Variâncias, sendo aceitos somente os significativos, com um nível de significância de 5%. Foi determinado o coeficiente de variabilidade para cada um dos modelos de regressão múltipla ajustados, o qual foi calculado a partir da Equação 4.21. Todos os resultados (médias) dos experimentos de determinação da condutividade elétrica podem ser encontrados no Apêndice B.1.

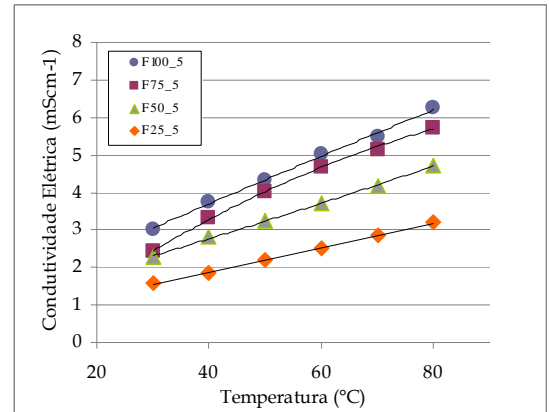
## 5.3 Resultados e Discussão

### 5.3.1 Condutividade elétrica das polpas e dos néctares em função da temperatura

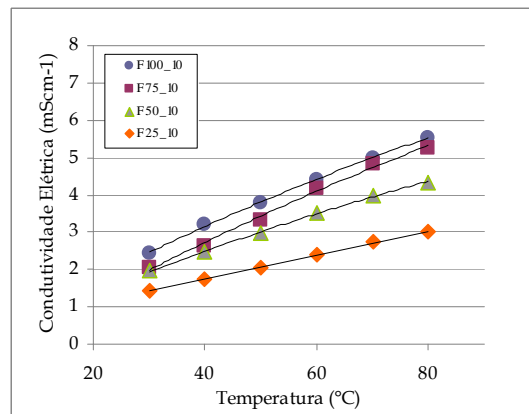
Os resultados da condutividade elétrica das polpas e dos néctares em função da temperatura estão apresentados nos gráficos das Figuras 5.3 a 5.6.



(a)

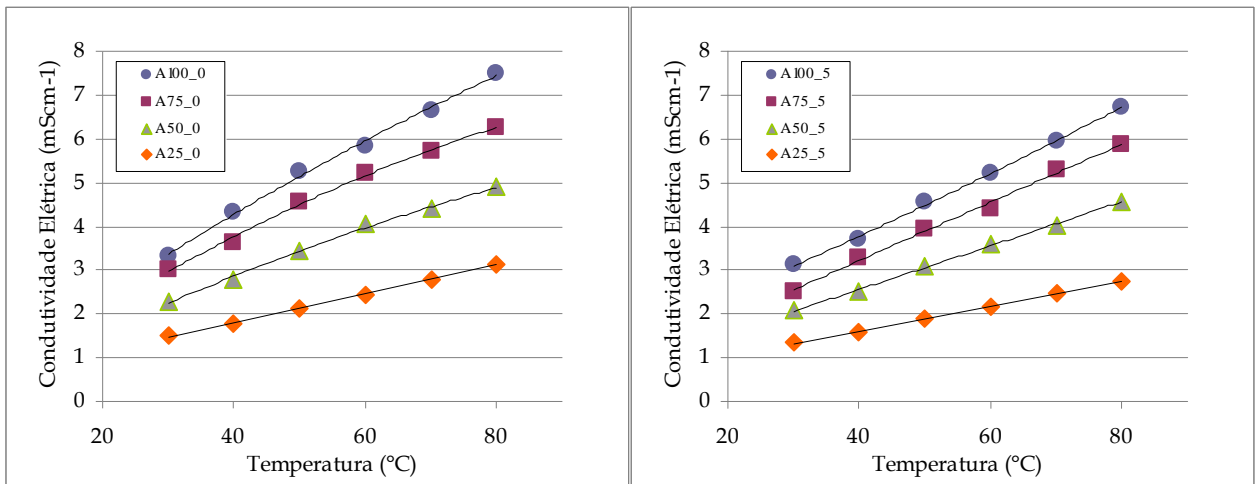


(b)



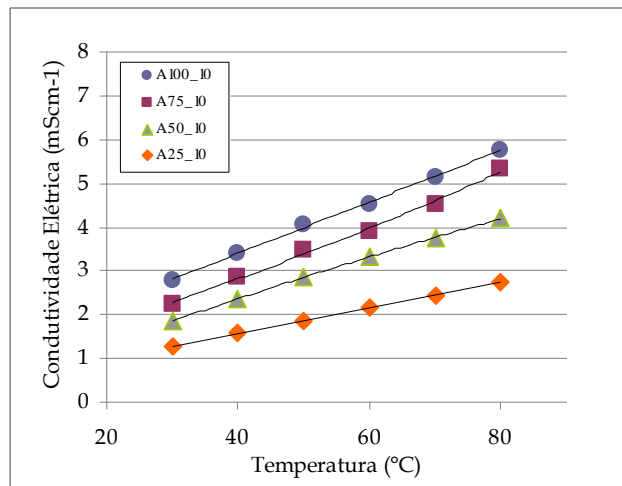
(c)

**Figura 5.3:** Condutividade elétrica das polpas e néctares de framboesa em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de polpa do produto; (a) sem açúcar, (b) com 5% de açúcar e (c) com 10% de açúcar.



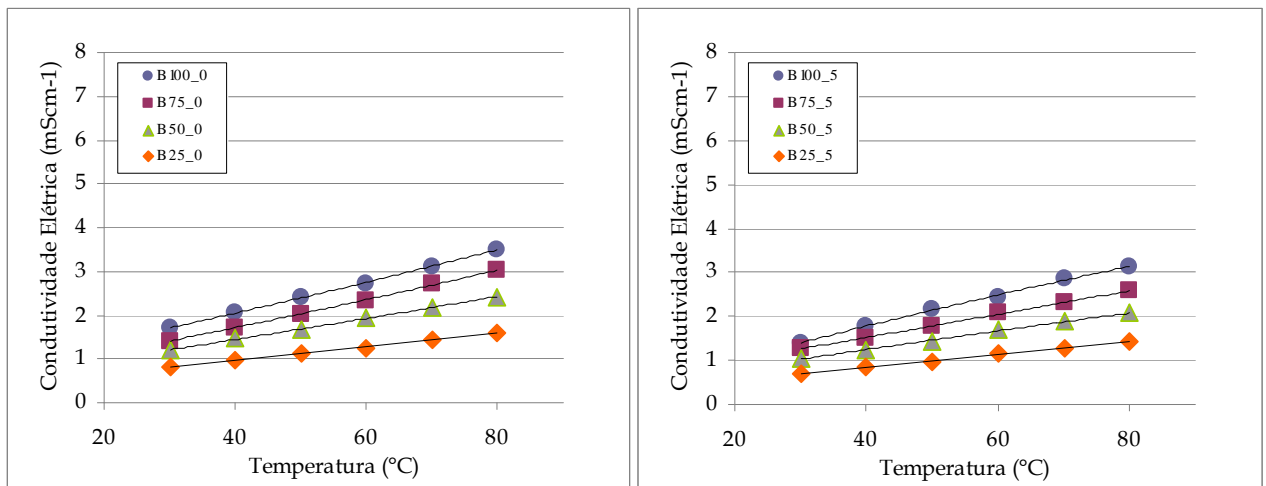
(a)

(b)



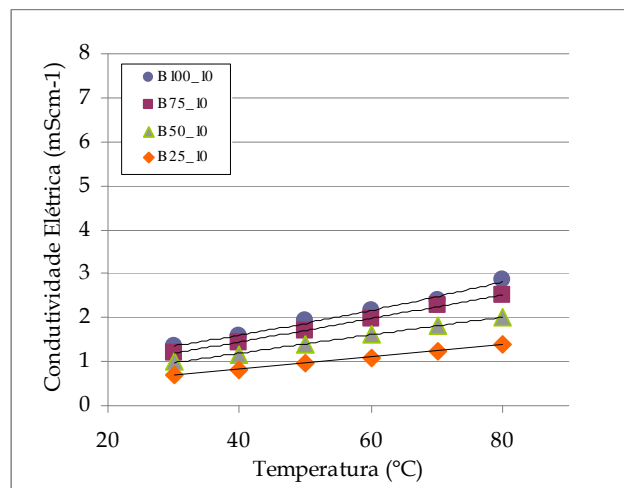
(c)

**Figura 5.4:** Condutividade elétrica das polpas e néctares de amora em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de polpa do produto; (a) sem açúcar, (b) com 5% de açúcar e (c) com 10% de açúcar.



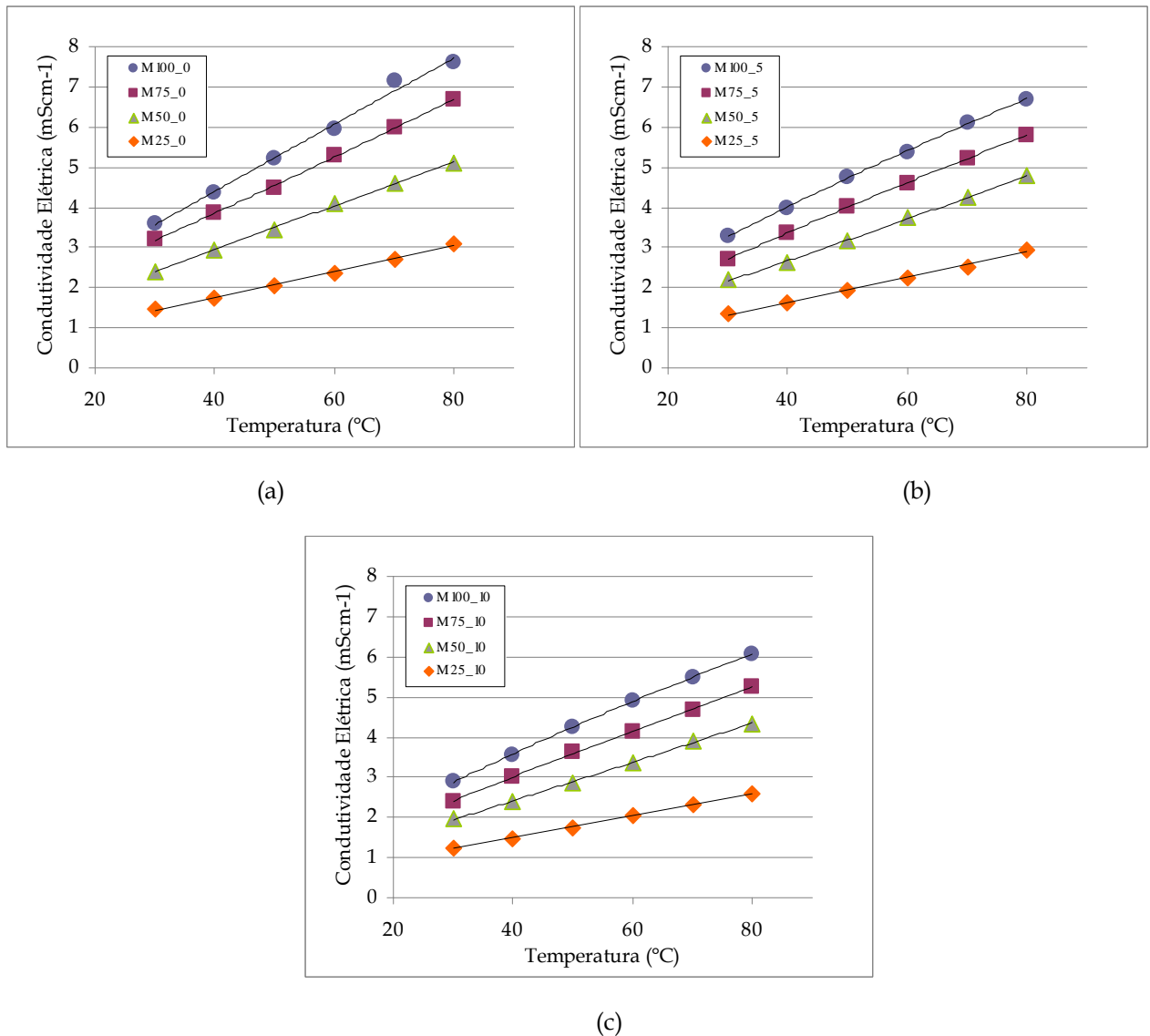
(a)

(b)



(c)

**Figura 5.5:** Condutividade elétrica das polpas e néctares de mirtilo em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de polpa do produto; (a) sem açúcar, (b) com 5% de açúcar e (c) com 10% de açúcar.



**Figura 5.6:** Condutividade elétrica das polpas e néctares de morango em função da temperatura, tendo-se como parâmetro de curva o teor de polpa do produto; (a) sem açúcar, (b) com 5% de açúcar e (c) com 10% de açúcar.

Analisando as curvas, é possível verificar que a condutividade elétrica de todos os produtos aumenta linearmente com o aumento da temperatura. Este comportamento já foi observado por diversos autores para vários alimentos como frutas e carnes (SARANG *et al.*, 2008) polpas de morango (CASTRO *et al.*, 2004), soluções de café solúvel (LEGRAND *et al.*, 2007), polpas de frutas (ICIER e ILICALI, 2005) e outros. Segundo Bean *et al.* (1960) e Sasson e Monseline (1977), citados por Sarang *et al.* (2008), o aumento da condutividade elétrica com a elevação da temperatura em tecidos biológicos ocorre devido ao aumento da mobilidade iônica causada por mudanças estruturais nos tecidos, como quebra da protopectina das

paredes celulares, expulsão de bolhas de ar não-condutivas, amolecimento dos tecidos e diminuição da viscosidade da fase aquosa. A ocorrência do comportamento linear da condutividade elétrica com a temperatura para as polpas possivelmente se deu pelo fato do ar disperso dos produtos ser retirado espontaneamente durante a ambientação das amostras a cada temperatura. Isto porque, para a medição da condutividade elétrica das polpas, eram utilizados cerca de 3 mL do produto, sendo o mesmo ambientado no interior de um tubo de ensaio. Esta desaeração não ocorria do mesmo modo quando na medição da massa específica dos produtos, uma vez que o picnômetro possui um orifício superior estreito e a quantidade de amostra requerida para a análise era de cerca de 25 mL.

O comportamento da condutividade elétrica em função da temperatura foi ajustado segundo um modelo linear (Equação 5.2). Os coeficientes de correlação dos modelos ajustados foram superiores a 0,98. Nas Tabelas 5.1 e 5.2 podem ser observados os resultados destes ajustes. Cabe salientar que estes modelos são válidos para a faixa de temperaturas de 30 a 80°C, e para os produtos com teores de sólidos solúveis apresentados na Tabela 3.3.

**Tabela 5.1:** Parâmetros  $a$  e  $b$  dos modelos da condutividade elétrica [ $\text{mS cm}^{-1}$ ] em função da temperatura para as polpas e néctares de framboesa e mirtilo com os respectivos coeficientes de correlação,  $R^2$ .

Produto	Parâmetros		$R^2$	Produto	Parâmetros		$R^2$
	a	b			a	b	
F-100-0	0,0781	1,2237	0,9916	B-100-0	0,0357	0,6188	0,9988
F-100-5	0,0631	1,1683	0,9965	B-100-5	0,0347	0,3907	0,9972
F-100-10	0,0614	0,6837	0,9969	B-100-10	0,0293	0,4385	0,9901
F-75-0	0,0621	1,2769	0,9879	B-75-0	0,0324	0,4259	0,999
F-75-5	0,065	0,6498	0,9881	B-75-5	0,0265	0,4628	0,9989
F-75-10	0,0668	0,047	0,9927	B-75-10	0,0267	0,3819	0,9991
F-50-0	0,0533	0,8855	0,9980	B-50-0	0,0244	0,4707	0,9986
F-50-5	0,0479	0,852	0,9983	B-50-5	0,021	0,408	0,9986
F-50-10	0,0486	0,5378	0,9965	B-50-10	0,0208	0,3589	0,9982
F-25-0	0,0345	0,593	0,9975	B-25-0	0,0156	0,3411	0,9983
F-25-5	0,0327	0,5711	0,9993	B-25-5	0,0141	0,2849	0,9994
F-25-10	0,0321	0,4657	0,9996	B-25-10	0,0138	0,2704	0,999

**Tabela 5.2:** Parâmetros  $a$  e  $b$  dos modelos da condutividade elétrica [ $\text{mS cm}^{-1}$ ] em função da temperatura para as polpas e néctares de amora e morango e os respectivos coeficientes de correlação,  $R^2$ .

Produto	Parâmetros		$R^2$	Produto	Parâmetros		$R^2$
	a	b			a	b	
A-100-0	0,0816	0,9985	0,9948	M-100-0	0,0831	1,0738	0,9929
A-100-5	0,0727	0,8767	0,9982	M-100-5	0,0688	1,2537	0,9989
A-100-10	0,0588	1,0514	0,9981	M-100-10	0,0637	1,0234	0,9984
A-75-0	0,066	1,1033	0,9899	M-75-0	0,0703	1,0478	0,9991
A-75-5	0,0665	0,5595	0,9954	M-75-5	0,0616	0,8954	0,9992
A-75-10	0,0595	0,4484	0,9937	M-75-10	0,0567	0,7336	0,9991
A-50-0	0,0527	0,7424	0,9926	M-50-0	0,0545	0,7662	0,999
A-50-5	0,0501	0,5569	0,9980	M-50-5	0,0526	0,5685	0,9991
A-50-10	0,0467	0,4887	0,9987	M-50-10	0,0483	0,4829	0,9996
A-25-0	0,0327	0,502	0,9993	M-25-0	0,0324	0,4569	0,9954
A-25-5	0,0286	0,4622	0,9992	M-25-5	0,031	0,3981	0,9937
A-25-10	0,0292	0,4055	0,9995	M-25-10	0,0274	0,3985	0,9994

### 5.3.2 Comportamento da condutividade elétrica dos produtos devido à diluição

Conforme apresentado na seção 3.1.3.1, a diferença fundamental do néctar para a polpa de fruta é o teor de polpa, uma vez que, na fabricação do mesmo, é realizada a diluição da polpa com água. Assim, observando os gráficos das Figuras 5.3 a 5.6, verifica-se que a diminuição do teor de polpa do produto promove um decréscimo da condutividade elétrica. Isto provavelmente ocorra devido à diluição causada pela adição de água ao produto. Desta forma, a condutividade elétrica diminui por haver uma menor concentração de espécies iônicas no meio.

Entretanto, com o aumento do teor de polpa, há uma diminuição da mobilidade iônica devido ao aumento da viscosidade do meio. Lewicki (2004) comenta que a viscosidade de um alimento líquido afeta pronunciadamente a mobilidade iônica, influenciando na condutividade elétrica. Além disso, Palaniappan e Sastry (1991), citados por Icier e Ilicali (2005) e por Lewicki (2004), afirmam que a resistência ao movimento iônico é maior com o

aumento do conteúdo de sólidos insolúveis. Porém, para que o fenômeno descrito pelos autores ocorra, há a necessidade de se comparar produtos nos quais as concentrações iônicas sejam semelhantes, o que não é o caso, já que é realizada a diluição das polpas com água.

### 5.3.3 Condutividade elétrica dos produtos em função do teor de polpa, o teor de açúcar e a temperatura

A fim de modelar a influência combinada da temperatura, do teor de açúcar e do teor de polpa utilizado na confecção dos produtos sobre sua condutividade elétrica foi utilizado o modelo quadrático de regressão múltipla (Equação 5.3). A Tabela 5.3 apresenta os resultados dos ajustes, cujos coeficientes de correlação foram superiores a 0,99 e coeficientes de variabilidade foram inferiores a 5,9%, demonstrando que os modelos se ajustaram bem aos dados.

**Tabela 5.3:** Parâmetros *a, b, c, d, e, f, g, h, i, e j* dos modelos da condutividade elétrica de néctares em função do teor de polpa, o teor de açúcar e a temperatura, com os respectivos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) e de variabilidade ( $CV$ ).

P*	Parâmetros dos Modelos										$R^2$	CV(%)
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j		
F	-1,03	0,0468	-0,00027	ns**	ns	0,0429	-0,00015	-0,00173	0,00047	-0,00044	0,992	5,83
A	-0,883	0,0439	-0,000245	0,0426	ns	0,0292	ns	-0,00139	0,00054	-0,00094	0,995	1,52
B	ns	0,0152	-0,000090	ns	0,0029	0,00923	ns	-0,00048	0,00025	-0,000434	0,996	2,27
M	-1,00	0,0507	-0,000280	0,0516	ns	0,02659	ns	-0,00127	0,00054	0,00110	0,996	0,78

\* Produto

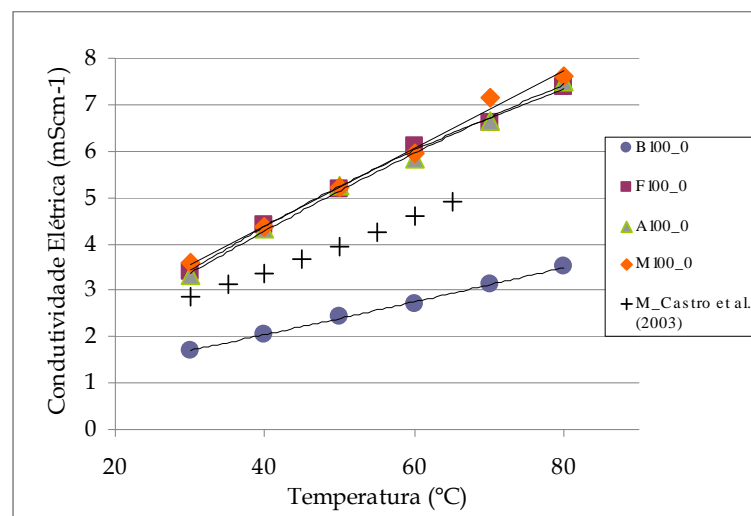
\*\* Parâmetro não significativo

Estes modelos são válidos para a faixa de temperaturas de 30 a 80°C, para os néctares (e polpas, para o caso de 100% de polpa) com teores de polpa de 25 a 100% e teor de sólidos solúveis apresentados na Tabela 3.3. Os gráficos de Pareto, que denotam a significância dos parâmetros dos modelos, podem ser encontrados no Apêndice B.2, bem como os gráficos dos valores observados *versus* preditos.



### 5.3.4 Comparação entre as condutividades elétricas dos diferentes frutos

A Figura 5.7 apresenta um gráfico da condutividade elétrica em função da temperatura para as polpas dos quatro frutos estudados, sem adição de açúcar. Nesta figura também é apresentado o modelo proposto por Castro *et al.* (2003) para predição da condutividade elétrica de polpa de morango com 14,5°Brix.



**Figura 5.7:** Condutividades elétricas das polpas sem açúcar em função da temperatura, onde o parâmetro de curva é o tipo de fruto e resultados de Castro (2003) para polpa de morango.

Os valores de condutividade elétrica das quatro polpas foram comparados, nas temperaturas de 30 e 80°C e os resultados podem ser observados na Tabela 5.4.

A partir da análise destes resultados, observa-se que as condutividades elétricas das polpas de amora, morango e framboesa sem açúcar são iguais, dentro da faixa de temperaturas estudada, enquanto que a polpa de mirtilo apresentou valores de condutividade elétrica significativamente menores.

**Tabela 5.4:** Comparação entre os valores de condutividade elétrica das polpas dos quatro frutos, nas temperaturas de 30 e 80°C.

Produto	Condutividade elétrica [mS cm <sup>-1</sup> ]			
	30°C	DMR** (%)	80°C	DMR(%)
F-100-0	3,41 a*	100,6	7,50 a	114,3
A-100-0	3,32 a	95,3	7,37 a	110,6
B-100-0	1,70 b	-	3,50 b	-
M-100-0	3,59 a	111,2	7,6 a	117,1
DMR médio	-	102,3	-	114,0

\* Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras ao nível de 5% de significância, pelo Teste de Tukey.

\*\* Diferença média da condutividade elétrica da polpa em relação à da polpa de mirtilo, em percentual.

Na Tabela 5.4 também é apresentado o cálculo da diferença média relativa (DMR) entre a condutividade elétrica das polpas de framboesa, amora e morango e da polpa de mirtilo, na mesma temperatura. Este cálculo foi realizado utilizando a Equação 5.4 apresentada a seguir.

$$DMR = \frac{ke_{polpa} - ke_{polpa\ mirtilo}}{ke_{polpa\ mirtilo}} \times 100 \quad (5.4)$$

Estes resultados dão indícios do quanto as condutividades elétricas das polpas de framboesa, amora e morango diferem da condutividade elétrica da polpa de mirtilo. Desta forma, é possível observar que as condutividades elétricas das polpas de framboesa, amora e morango são cerca de 100% maiores que a condutividade elétrica da polpa de mirtilo, a 30°C, e, a 80°C as condutividades elétricas das polpas em questão são cerca 110% maiores que a condutividade elétrica da polpa de mirtilo. Este resultado indica que um aumento da temperatura acentua ainda mais a diferença.

A condutividade elétrica de uma solução resulta da soma das contribuições de todos os íons presentes. No entanto, vale ressaltar que a fração da corrente transportada por uma dada espécie iônica depende de sua concentração relativa e da facilidade com que a espécie se movimenta no meio. Assim, para se realizar a comparação entre as condutividades elétricas das polpas, devem ser levadas em conta suas composições químicas, principalmente de íons fortes (sais), íons fracos (ácidos orgânicos), açúcares e sólidos insolúveis (que

contribuem para a diminuição da mobilidade iônica). A partir dos resultados apresentados na Tabela 2.2, observa-se que o mirtilo possui um teor de sais (medido via RMF) inferior aos demais frutos, porém, semelhante ao da framboesa. Mas sua acidez é muito mais baixa que a da framboesa. Além disso, pôde ser verificado visualmente que sua casca apresenta textura mais firme que a película externa dos demais frutos. Todos estes fatores, associados, possivelmente contribuíram para que os produtos de mirtilo apresentassem uma menor condutividade elétrica.

Através da análise do gráfico da Figura 5.7 também é possível observar o mesmo comportamento da condutividade elétrica com a temperatura em relação ao quantificado experimentalmente. Os valores de condutividade elétrica medidos para a polpa de morango são maiores que os apontados pelos autores; isto provavelmente ocorreu devido a diferenças na composição centesimal das polpas. A polpa ensaiada possui um teor de sólidos solúveis de 6,9°Brix e um pH de 3,45, enquanto que a polpa dos autores, um teor de sólidos solúveis de 14,5°Brix e um pH de 4,0, o que provavelmente aponta que o estágio de maturação dos frutos utilizados no processamento das duas polpas não é o mesmo. Desta forma, como o pH da polpa avaliada por Castro *et al.* (2003) era superior ao da polpa ensaiada, provavelmente sua acidez era menor e, possuindo, desta forma, um menor teor de ácidos, a polpa deverá apresentar uma condutividade elétrica menor. Além disso, conforme discutido ao longo deste capítulo, o teor de açúcares presentes no produto se relaciona de forma inversa com a condutividade elétrica. Assim, como a polpa ensaiada possui um teor de açúcares (medido indiretamente via teor de sólidos solúveis) inferior à polpa de morango estudada por Castro *et al.* (2003) e um pH inferior (maior quantidade de íons H<sup>+</sup> em solução), sua condutividade elétrica é maior.

## 5.4 Conclusão

A determinação da condutividade elétrica de alimentos líquidos por condutivimetria é extremamente prática e rápida. Com este método é possível detectar como pequenas

---

variações na composição dos produtos e na temperatura alteram a condutividade elétrica dos mesmos.

Observou-se que a condutividade elétrica das polpas e dos néctares estudados aumenta linearmente com a elevação da temperatura; o aumento no teor de polpa também promove um incremento na condutividade elétrica dos produtos, e o aumento do teor de açúcar promove uma diminuição nos valores da propriedade. Verificou-se também que as polpas dos frutos amora, framboesa e morango apresentaram condutividades elétricas semelhantes e superiores a da polpa de mirtilo.

Foram ajustados vários modelos de predição da condutividade elétrica de polpas e néctares de amora, framboesa, morango e mirtilo, em função da temperatura e da composição dos produtos; os modelos ajustados apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,99 e coeficientes de variabilidade inferiores a 6%, o que denota que os ajustes foram muito bons.

## Capítulo 6

# Difusividade Térmica

Neste capítulo são apresentados os aspectos relativos à difusividade térmica dos produtos estudados, sendo inicialmente abordados os seus conceitos e principais aplicações, a importância do seu conhecimento para a indústria, as técnicas disponíveis para sua determinação e os dados já publicados na literatura para o tipo de produto em estudo. Posteriormente, são apresentados a metodologia aplicada e os resultados encontrados na determinação da massa específica dos produtos analisados.

### 6.1 Fundamentos Teóricos

#### *6.1.1 Definições e Aplicações*

A difusividade térmica ( $a$ , com unidade no SI  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) é a relação entre a capacidade do material de transportar calor e sua capacidade de armazená-lo, sendo definida como a razão

entre a condutividade térmica do material ( $k$  [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]) e a sua capacidade calorífica volumétrica ( $\rho.Cp$  [ $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ ]). Assim, a difusividade térmica pode ser calculada a partir do conhecimento das demais propriedades termofísicas do material, conforme a Equação 6.1:

$$\alpha = \frac{k}{\rho.Cp} \quad (6.1)$$

O conhecimento desta propriedade é fundamental para o projeto de processos que envolvem a difusão transiente de calor. A equação diferencial governante da transferência de calor unidimensional em uma placa plana infinita em condições não estacionárias é expressa pela Equação 6.2:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.2)$$

onde  $T$  é a temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $x$  é a dimensão cartesiana [ $\text{m}$ ] e  $t$  é o tempo [ $\text{s}$ ]. Para a condução de calor em um cilindro infinito, a equação governante que fornece a variação da temperatura com o tempo e com a posição radial  $r$  é a Equação 6.3:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.3)$$

onde  $r$  é a direção radial [ $\text{m}$ ]. Estas equações demonstram a importância do conhecimento da difusividade térmica na determinação da relação tempo-temperatura em uma determinada posição espacial do sólido.

Para um cilindro finito, a Regra de Newman, que combina as soluções das Equações 6.2 e 6.3, fornece o perfil de temperaturas espacial e temporal. Para o caso de uma temperatura inicial uniforme, exposto a um meio ambiente com temperatura constante e com resistência convectiva superficial desprezível, a solução tem a forma expressa na Equação 6.4 (CARSLAW e JAEGER, 1959, citados por SINGH, 1982):

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_0} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\beta_m} \cos\left(\frac{\beta_m 2x}{l}\right) \cdot \frac{2J_0(\beta_n r/R)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \exp\left[-\left(\frac{\beta_n^2}{R^2} + \frac{4\beta_m^2}{l^2}\right)\alpha t\right] \quad (6.4)$$

onde  $T_s$  é a temperatura do meio de aquecimento [°C],  $T_0$  é a temperatura inicial [°C],  $\beta_m$  é a raiz da função cosseno,  $J_0$  é a função de Bessel de primeira espécie de ordem zero,  $J_1$  é a função de Bessel de primeira espécie de ordem um,  $\beta_n$  é a raiz da função de Bessel,  $R$  é o raio do cilindro [m] e  $l$  é o comprimento do cilindro finito [m].

Segundo Rahman (1995), a principal aplicação da difusividade térmica no processamento de alimentos é na estimativa dos tempos de processamento na apertização, aquecimento, resfriamento, congelamento, cozimento ou fritura.

Gaffney e Baird (1980), citados por Singh (1982) sugerem que para um composto heterogêneo deva ser empregado o termo “aparente” ou “efetiva”, quando na designação da difusividade térmica uma vez que, se a massa específica e o conteúdo de umidade dos vários componentes do alimento forem diferentes, então as difusividades térmica dos diversos componentes serão diferentes. Os autores analisaram a difusividade térmica de toranja, verificando que a polpa do fruto possuía difusividade térmica de  $1,27 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , enquanto que a difusividade térmica do albedo (película branca, localizada logo abaixo da casca de frutos cítricos) era de  $1,09 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Assim, quando se emprega o termo difusividade térmica aparente, denota-se que a propriedade é uma média das difusividades térmicas para cada um dos componentes do alimento.

### ***6.1.2 Técnicas de Determinação da Difusividade Térmica***

Usando a Equação 6.1, a difusividade térmica pode ser calculada a partir dos valores das três propriedades determinados experimentalmente; esta alternativa, no entanto, requer um tempo considerável e uma instrumentação elaborada. Outra alternativa é a condução de um experimento com o qual se realiza a medição direta da difusividade térmica. Singh (1982) apresenta uma revisão sobre estes métodos e, a seguir, são discutidos sucintamente os quatro métodos que, segundo este autor, são os mais comumente utilizados.

O primeiro consiste na Estimativa por Mínimos Quadrados (*Least-Squares Estimation*). Neste método, inicialmente é medido o histórico de temperaturas no centro de um objeto de dimensões bem definidas, tais como um cilindro infinito, uma placa infinita ou uma esfera. A

solução analítica apropriada da equação diferencial (tais como as Equações 6.2 e 6.3) é então programada numericamente para prever a temperatura em vários instantes de tempo para alguns valores de difusividade térmica arbitrados. Obviamente que, dependendo do valor de difusividade térmica selecionado, os valores preditos e experimentais de temperatura poderão não coincidir. Entretanto, usando técnicas iterativas, o valor da difusividade térmica pode ser alterado até que as diferenças entre as temperaturas preditas e as experimentais sejam estatisticamente não significativas. O método estima o valor da difusividade térmica que fornece a mínima soma de quadrados médios dos erros entre a temperatura predita pelo modelo analítico e a temperatura medida experimentalmente.

A utilização de curvas de penetração de calor é outro método que pode ser utilizado na determinação da difusividade térmica. Em muitas situações reais de transferência de calor, o primeiro termo da série da Equação 6.4 pode ser suficiente na estimativa do perfil de temperaturas do objeto. Assim, para um objeto cilíndrico finito, a solução, expressa pela Equação 6.4, pode ser simplificada, mantendo somente os termos com  $m=n=1$ . Para a situação com  $\beta_m=\pi/2$ ,  $\beta_n=2,4048$  e  $J_1(2,4048)=0,5191$ , no centro do objeto cilíndrico ( $x=0$ ,  $r=0$  e  $J_0(0)=1,0$ ) a solução fica:

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_i} = 2,0396 \exp \left[ - \left( \frac{(2,4048)^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{l^2} \right) \alpha t \right] \quad (6.5)$$

Ball e Oslon (1957), citados por Singh (1982), graficaram curvas de penetração de calor experimentais em uma escala semi-log e obtiveram a seguinte expressão logarítmica,

$$t = f_h \log \left( j \frac{T_s - T_i}{T_s - T} \right) \quad (6.6)$$

onde

$$j = \frac{T_s - T_a}{T_s - T_i} \quad (6.7)$$

e  $f_h$  é o parâmetro de aquecimento [s].

Comparando as Equações 6.5 e 6.6, obtém-se a seguinte expressão para  $f_h$ :



$$f_h = \frac{2,303}{\alpha} \left[ \frac{(2,405)^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{l^2} \right] \quad (6.8)$$

Assim, mediante o conhecimento do parâmetro de aquecimento ( $f_h$ ), o qual é obtido a partir de um estudo de penetração de calor, é possível determinar a difusividade térmica.

O uso de cartas tempo-temperatura é o terceiro método que pode ser empregado no estudo da difusividade térmica. As soluções analíticas das equações governantes que descrevem a transferência de calor por condução, tais como as Equações 6.2 e 6.3, foram reduzidas a cartas tempo-temperatura (SCHEIDER, 1963, citado por SINGH, 1982). Estas cartas contêm os números adimensionais de Fourier e de Biot e a temperatura adimensional. Se a temperatura adimensional é determinada experimentalmente para uma posição particular de um objeto em um instante de tempo conhecido, a carta tempo-temperatura pode ser usada para a estimativa do número de Fourier que fornece o valor da difusividade térmica.

O uso de soluções analíticas é o quarto método apresentado por Singh (1982). As soluções em séries, tais como na Equação 6.4, convergem rapidamente depois de transcorrido certo tempo de troca térmica, geralmente se o número de Fourier for maior que 0,2. Desta forma, a determinação experimental da temperatura em uma posição conhecida de um objeto com dimensões conhecidas é usada no primeiro termo da série para a determinação da difusividade térmica.

O método de Dickerson (1965) é um dos mais utilizados na determinação direta da difusividade térmica de alimentos; aplica-se ao estudo desta propriedade em alimentos sólidos, granulares e na forma de pós (SARAVACOS e KOSTAROPOULOS, 1996), bem como para líquidos e géis (SAKIYAMA *et al.*, 1999; MOURA *et al.*, 2003). Segundo Dickerson (1965), a precisão de seu método é da ordem de 5% e os dados são obtidos com até duas horas de experimento sem a necessidade de medida de fluxo de calor. O aparato de medição proposto por Dickerson (1965) consiste em uma célula cilíndrica de latão cromado com duas tampas de *teflon*, como mostrado esquematicamente na Figura 6.1. Um termopar soldado na superfície externa da célula monitora a temperatura da amostra no raio R (raio externo) enquanto que outro termopar indica a temperatura no centro da amostra. O diâmetro interno

do tubo é 54 mm e seu comprimento 229 mm. Após a amostra ser empacotada no interior do cilindro, o mesmo é colocado em um banho de água com uma boa agitação.

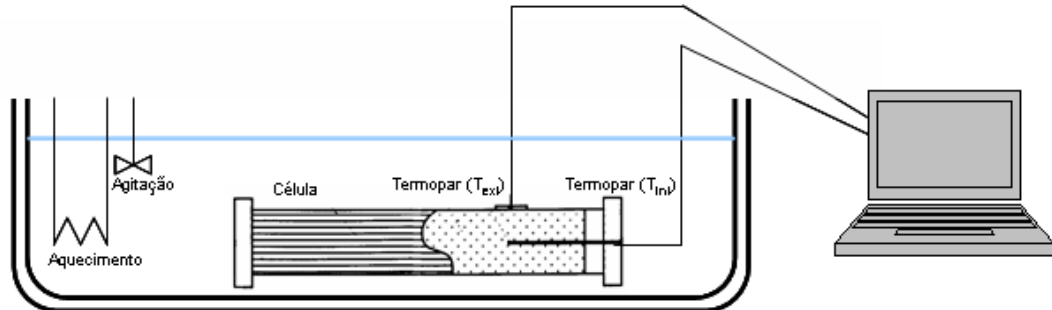


Figura 6.1: Esquema do aparato de Dickerson.

Depois de atingido o equilíbrio térmico entre a célula e o banho, inicia-se o aquecimento da água no banho a uma taxa de elevação de temperatura constante, sendo as temperaturas monitoradas ao longo de todo o processo. Os dados obtidos servem de base para o tratamento gráfico dos perfis de evolução das temperaturas externa (no raio  $R$ ) e interna (no centro da amostra). Moura *et al.* (2003) utilizaram este aparato para a medição da difusividade térmica de soluções modelo similares a sucos; os perfis de evolução das temperaturas durante o experimento obtidos por estes autores estão mostrados na Figura 6.2.

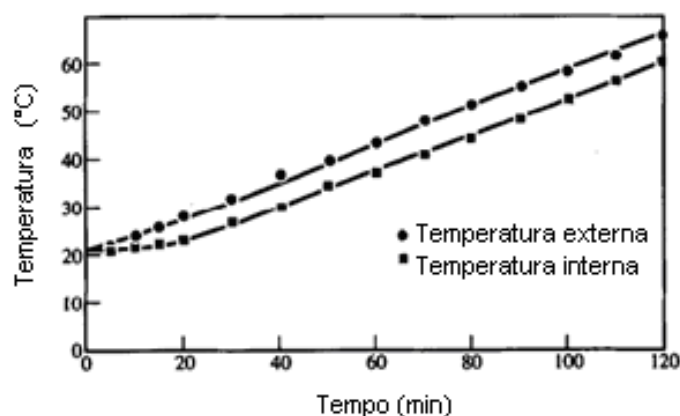


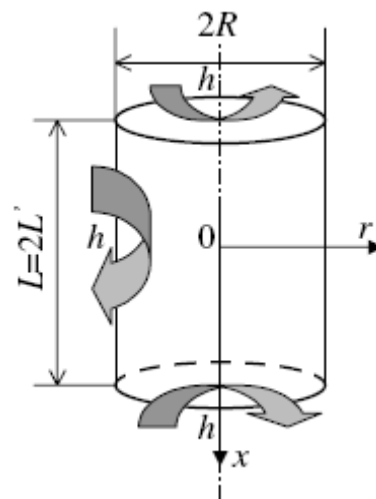
Figura 6.2: Evolução das temperaturas com o tempo, na superfície externa e no centro do aparato de Dickerson para a determinação da difusividade térmica de materiais. Fonte: Moura *et al.* (2003).

Assim, no método de Dickerson, a difusividade térmica pode ser calculada a partir da solução analítica da equação de condução de calor em regime transiente para um cilindro longo, que resulta na Equação 6.9:

$$\alpha = \frac{A.R^2}{4(T_{ext} - T_{int})} \quad (6.9)$$

onde  $A$  é a taxa constante de elevação da temperatura da água no banho [ $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ] e  $(T_{ext} - T_{int})$  é a diferença entre a temperatura na superfície externa e a temperatura no centro da célula [ $^{\circ}\text{C}$ ]. O valor de  $A$ , assumido para o cálculo, é o obtido a partir da fase constante de subida da temperatura do banho.

Baïri, Laraqi e García de María (2007) apresentam um método transiente simplificado que faz uso da solução analítica da equação da conservação da energia para a difusão de calor em um cilindro longo. O método proposto é facilmente empregado na determinação da propriedade em produtos oriundos de frutos e vegetais, com precisão de cerca de 3%. Este foi o método utilizado no presente trabalho. Baïri, Laraqi e García de María (2007) utilizaram uma amostra cilíndrica de diâmetro  $2R$  e comprimento  $2L$ , termicamente homogênea, com condutividade térmica  $k$ , esquematicamente mostrada na Figura 6.3.



**Figura 6.3:** Cilindro considerado no método de Baïri, Laraqi e García de María (2007). Fonte: Baïri, Laraqi e García de María (2007).

Inicialmente na temperatura uniforme  $T_0$ , o cilindro é subitamente sujeito a uma troca de calor convectiva com um fluido a uma temperatura constante  $T_e$ , com um coeficiente de troca térmica  $h$ . Este coeficiente é assumido constante ao longo do processo térmico e aplicado de forma homogênea a toda a superfície de troca térmica. Tal hipótese teórica deve ser obviamente checada durante os experimentos. Duas situações são possíveis e estão descritas a seguir.

- Se as duas dimensões do cilindro são significativas em relação à troca térmica com o meio, o problema deve ser considerado em duas dimensões (2D, axial e radial). Neste caso, a solução, para a troca de calor transiente,  $T(x, r e t)$ , é baseada na resolução da equação da seguinte equação diferencial:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.10)$$

- Se o cilindro é longo o suficiente para que as trocas térmicas na direção axial não sejam significativas em relação à troca térmica radial, o problema é simplificado e se torna unidimensional (1D - radial). Sendo a determinação experimental da difusividade térmica em 2D mais laboriosa, os autores checaram as limitações do método 1D no sentido de propor este como um método simplificado. Após muitos testes realizados em uma série de produtos e em uma larga faixa de temperaturas, os autores afirmam que o método 2D é necessário em certas áreas da engenharia, tais como na engenharia civil. Porém, para alimentos, a diferença entre os dois métodos é de cerca de 4%; este resultado motivou a aplicação do procedimento experimental apresentado por estes autores no presente trabalho. A estimação de parâmetros está baseada na solução analítica da equação de Fourier em 1D em coordenadas cilíndricas:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.11)$$

Baïri e Laraqui (2003), citados por Baïri, Laraqi e García de María (2007), usaram o método de separação de variáveis para  $r$  e  $t$  (com condições de contorno simétricas em relação ao eixo, em  $r=0$ ) para a resolução desta equação, obtendo a seguinte solução:

$$\theta(r,t) = \frac{T(r,t) - T_e}{T_0 - T_e} = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \exp(\xi_m^2 Fo) \frac{1}{\xi_m} \frac{J_1(\xi_m)}{J_0^2(\xi_m) + J_1^2(\xi_m)} J_0(\xi_m r^*) \quad (6.12)$$

onde  $J_0$  e  $J_1$  são as funções de Bessel de primeira espécie de ordem zero e um, respectivamente,  $\xi_m$  são as raízes positivas da equação característica,

$$\xi_m J_1(\xi_m) - Bi J_0(\xi_m) = 0 \quad (6.13)$$

e o raio reduzido está definido por  $r^* = r/R$  e a variável  $R$  é utilizada nas definições dos números de Biot e Fourier:

$$Bi = \frac{hR}{k} \quad (6.14)$$

$$Fo = \frac{\alpha t}{R^2} \quad (6.15)$$

Quando o número de Fourier é maior que 0,2, a solução (Equação 6.12) pode ser aproximada pelo primeiro termo. Desta forma, a solução pode ser escrita como,

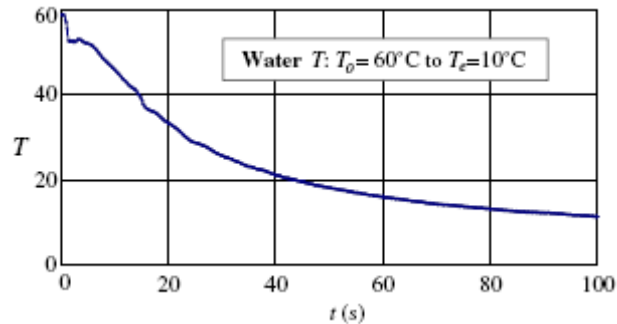
$$\theta(r,t) = \frac{T(r,t) - T_e}{T_0 - T_e} = \left[ 2 \frac{1}{\xi_1} \frac{J_1(\xi_1)}{J_0^2(\xi_1) + J_1^2(\xi_1)} J_0(\xi_1 r^*) \right] \exp[-(\xi_1^2 Fo)] \quad (6.16)$$

Introduzindo a variável  $K$  que representa a parte constante em relação ao tempo desta equação, a mesma torna-se,

$$\theta(r,t) = \frac{T(r,t) - T_e}{T_0 - T_e} = K \exp[-(\xi_1^2 Fo)] = K \exp\left[-\alpha \left(\frac{\xi_1^2}{R^2}\right) t\right] \quad (6.17)$$

Se a resistência convectiva puder ser assumida negligenciável -  $h$  muito alto - a primeira raiz da equação característica (Equação 6.13) é  $\xi_1 = 2,405$ . Os experimentos de Baïri, Laraqi e García de María (2007) claramente demonstram que, após certo período de tempo  $t$ , a temperatura  $T$  se desenvolve, para qualquer raio  $r$ , como uma exponencial pura, conforme pode ser observado na Figura 6.4 que apresenta os resultados obtidos por estes autores. Aplicando a função  $\ln$  à Equação 6.17, obtém-se,

$$\ln \theta(r, t) = \ln K - \alpha \left( \frac{(2,405)^2}{R^2} \right) t \quad (6.18)$$



**Figura 6.4:** Evolução temporal da temperatura (centro da célula) para uma amostra de água, em um experimento de resfriamento. Fonte: Baïri, Laraqi e García de María (2007).

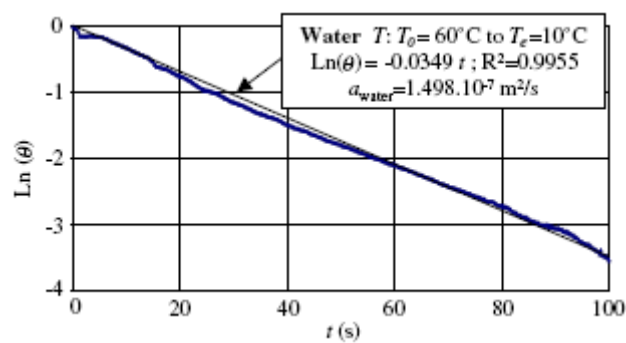
Determinando-se cuidadosamente a inclinação da curva  $\ln \theta = f(t)$ ,  $a$ , o valor da difusividade térmica do material pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$\alpha = - \frac{a}{\left( \frac{(2,405)^2}{R^2} \right)} \quad (6.19)$$

Baïri, Laraqi e García de María (2007) avaliaram a precisão deste método de medição e concluíram que o mesmo não requer o conhecimento do exato local no qual a temperatura da amostra cilíndrica é medida; esta é uma das maiores vantagens do mesmo, uma vez que é muito difícil realizar o posicionamento do sensor de temperatura com exatidão. Entretanto, os melhores resultados experimentais são obtidos com o sensor de temperatura posicionado o mais longe possível da superfície sujeita à troca térmica, ou seja, no eixo central do cilindro.

O sistema experimental montado por Baïri, Laraqi e García de María (2007) consiste de uma célula cilíndrica de alumínio com parede fina, com comprimentos variando entre 100 e 150 mm e diâmetros variando entre 9 a 16 mm, dependendo do experimento e da amostra testada. A célula possui três termopares tipo K, com 0,1 mm de diâmetro. Um deles mede a diferença de temperaturas entre a amostra e o banho. Os outros dois são colocados, um no interior da célula e outro no banho, por medida de segurança, para confirmar as temperaturas medidas pelo primeiro termopar. A célula, após ter sido preenchida com a

amostra e ambientada na temperatura  $T_0$ , é imersa em um pequeno banho termostático com temperatura fixa, que deve diferir da temperatura de ambientação em, no mínimo, 5 a 7°C. O sistema ainda possui um agitador mecânico que promove a forte turbulência da água no banho termostático. Os termopares são ligados a um sistema de aquisição de dados, que efetua a leitura das temperaturas a cada 200 ms, já que o tempo necessário para um experimento completo não excede 4 minutos. Segundo os autores, a temperatura na qual a difusividade térmica é determinada consiste na média aritmética entre a temperatura inicial da amostra ( $T_0$ ) e a temperatura final ( $T_e$ ). Após a corrida experimental, com a qual é obtida a curva de  $T$  apresentada na Figura 6.4, determina-se o valor de  $\theta$  para cada instante de tempo. Graficando-se a curva  $\ln(\theta) = f(t)$  obtém-se a evolução da temperatura, conforme mostrado na Figura 6.5.



**Figura 6.5:** Evolução temporal da temperatura adimensional para uma amostra de água. Fonte: Bãiri, Laraqi e García de María (2007).

Realizando um ajuste linear, com a porção da curva da Figura 6.5 que fornece o melhor coeficiente de correlação, encontra-se a inclinação da reta, que, aplicada à Equação 6.19, fornece a difusividade térmica da amostra. A propriedade é calculada a partir do valor médio obtido com dois experimentos. No primeiro, a amostra é resfriada e, no segundo, aquecida. Os autores validaram o método através da medição da difusividade térmica da água, mediante comparação com dados disponíveis na literatura. A partir de uma análise dos erros associados ao método, os autores verificaram que a principal fonte de erros está na medição das temperaturas, podendo-se chegar a erros máximos de 7%; na média, a precisão é de cerca de 3%.

Gaffney *et al.* (1980), citados por Singh (1982), conduziram uma extensa revisão e análise dos métodos transientes usados na determinação da difusividade térmica de frutos e vegetais. Os autores identificaram muitas fontes de erros importantes relativas aos métodos transientes. Algumas de suas importantes conclusões são sumarizadas a seguir.

A solução da equação governante da transferência de calor é geralmente baseada na hipótese do alimento sólido ser homogêneo. No entanto, muitos produtos alimentícios, tais como a maior parte dos frutos e vegetais, são heterogêneos. Desta forma, o uso destes métodos para este tipo de alimento gera resultados com erro devido à hipótese de homogeneidade do material, requerida para a solução da equação.

O número de Biot, o qual é influenciado pelo coeficiente convectivo de troca térmica, pode variar significativamente na medição do valor da difusividade térmica. Geralmente, nas técnicas transientes de determinação da difusividade térmica, é assumido que o número de Biot tende ao infinito. No entanto, em banhos térmicos agitados, os valores do coeficiente convectivo de troca térmica são próximos a  $600 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  e, para amostras pequenas, a suposição de que o número de Biot tende ao infinito deixa de ser válida.

Outras possíveis fontes de erro estão associadas à medição de temperatura. O uso de termopares pode gerar erros se o instrumento não estiver devidamente aferido. Gaffney *et al.* (1980), citados por Singh (1982), verificaram que a condução de calor ao longo do fio metálico (termopar) não afetou a inclinação da curva de penetração de calor da amostra. Assim, se a difusividade térmica for estimada a partir da inclinação da curva de penetração de calor, como no método de Baïri, Laraqi e García de María (2007), os erros serão mínimos; porém, se for utilizado apenas um ponto, como no método de Dickerson, erros altos podem ser detectados.

### ***6.1.3 Correlações Empíricas e Dados da Literatura***

Segundo Jaramillo-Flores e Hernandez-Sanchez (2000), a difusividade térmica de um alimento depende da sua composição, estrutura e temperatura, sendo bem conhecido que a mais drástica variação da difusividade térmica com a temperatura ocorre abaixo do ponto de



congelamento. Heldman (1981), citado por Singh (1982), apontou a importância desta propriedade para alimentos congelados. Segundo Singh (1982), em processos térmicos que ocorrem em uma ampla faixa de temperatura, tais como na esterilização de alimentos, a difusividade térmica não é constante. Em geral, dados de difusividade térmica obtidos experimentalmente são escassos na literatura.

Segundo Singh (1982), uma série de modelos empíricos usuais na predição da difusividade térmica está disponível na literatura, sendo que muitos deles são específicos para o produto estudado. Rahman (1995) apresenta uma compilação de dados de difusividade térmica e de alguns modelos para a sua predição para vários tipos de alimentos, dentre os quais frutos, produtos cárneos e de pescados, produtos de panificação, entre outros, a grande parte deles incluindo a faixa de temperaturas abaixo do ponto de congelamento do alimento. São raros os trabalhos que apresentam modelos de predição da difusividade térmica para sucos e polpas de frutas.

Telis-Romero *et al.* (1998) determinaram a difusividade térmica do suco de laranja em função do conteúdo de água, expresso em fração mássica ( $X_w$ ), de 0,34 a 0,74 e na faixa de temperaturas de 0,5 a 62°C utilizando o método de Dickerson (1965). Os autores ajustaram dois modelos para a predição da difusividade térmica: o primeiro baseado nos dados experimentais coletados e o segundo baseado no cálculo da difusividade térmica a partir da Equação 6.1 (uma vez que no trabalho também foi realizada a medição das demais propriedades que definem a difusividade térmica). Foi verificado que o modelo calculado a partir da Equação 6.1 apresentou um erro superior ao modelo baseado na medição direta da propriedade. As equações obtidas dos ajustes utilizando os dados experimentais (Equação 6.20) e o dados calculados (Equação 6.21), que apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,96, são apresentados a seguir; é possível observar que a difusividade térmica do suco varia lineamente com a temperatura.

$$\alpha_{\text{exp}} = 7,9683 \times 10^{-8} + 5,9839 \times 10^{-8} X_w + 0,02510 \times 10^{-8} T \quad (6.20)$$

$$\alpha_{\text{cal}} = 5,5382 \times 10^{-8} + 9,50003 \times 10^{-8} X_w + 0,00999 \times 10^{-8} T \quad (6.21)$$

onde  $X_w$  é a fração mássica de água.

Jaramillo-Flores e Hernandez-Sanchez (2000) determinaram o comportamento da difusividade térmica de polpa de *Annona muricata* L., em inglês, *soursop* em função do grau de maturação do fruto utilizado na produção da polpa e da temperatura, incluindo as temperaturas abaixo do ponto de congelamento do produto. O método utilizado foi o de Porsdal-Poulsen (1982), citado por Jaramillo-Flores e Hernandez-Sanchez (2000), o qual é baseado na solução analítica da equação da conservação da energia para a difusão de calor em um cilindro curto. A Tabela 6.1 apresenta a caracterização físico-química das polpas analisadas, bem como os valores de difusividade térmica encontrados pelos autores, nas faixas de temperaturas estudadas.

**Tabela 6.1:** Resultados experimentais da determinação da difusividade térmica de polpa de *Annona muricata* L nas diversas faixas de temperaturas analisadas; valores de pH e TSS das polpas ensaiadas. Fonte: Jaramillo-Flores e Hernandez-Sanchez (2000).

Produto	pH	TSS [°Brix]	Temperatura [°C]	$\alpha$ [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
Polpa congelada do fruto verde	3,8	16	-8,4 a -0,2	1x10 <sup>-8</sup>
Polpa descongelada do fruto verde	3,8	16	-0,2 a 24,4	1,61x10 <sup>-7</sup>
Polpa descongelada do fruto verde	3,8	16	34,6 a 85,6	2,28x10 <sup>-7</sup>
Polpa congelada do fruto maduro	4,0	19,2	-11,8 a -0,8	1,53 x10 <sup>-8</sup>
Polpa descongelada do fruto maduro	4,0	19,2	-0,8 a 23	1,86 x10 <sup>-7</sup>
Polpa descongelada do fruto maduro	4,0	19,2	35,6 a 88,6	2,56 x10 <sup>-7</sup>

Os autores verificaram que o grau de maturação do fruto não influenciou no valor da difusividade térmica da polpa de *Annona muricata* L., porém, a temperatura teve influência significativa.

Azoubel *et al.* (2005) determinaram a difusividade térmica de suco de caju a 30°C em função do teor de sólidos solúveis (*B*), na faixa de 5 a 25°Brix. Verificaram que a difusividade térmica aumenta proporcionalmente com o aumento do conteúdo de água do produto, e que os valores da propriedade, para o suco estudado, estão dentro da faixa apresentada por diversos autores, tais como Telis-Romero *et al.* (1998) e Jaramillo-Flores e Hernandez-Sanchez (2000), para sucos e polpas de frutas. O modelo ajustado para predição da difusividade térmica do suco de caju estudado, que teve coeficiente de correlação de 0,932, é apresentado a seguir.

$$\alpha = 1,45751 \times 10^{-7} - 0,00558 \times 10^{-7} B \quad (6.22)$$

onde  $B$  é o teor de sólidos solúveis [°Brix].

Riedel (1969), citado por Singh (1982) e por Rahman (1995), apresenta uma expressão que permite a predição da difusividade térmica como uma função do conteúdo de umidade de materiais alimentícios para faixa de teores de umidade superior a 40%, e na faixa de temperaturas de 0 a 80°C:

$$\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \times 10^{-6}) X_w \quad (6.23)$$

onde  $\alpha_w$  é a difusividade térmica da água [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ].

Martens (1980), citado por Singh (1982), investigou a influência de água, gordura, proteína, carboidrato e temperatura na difusividade térmica. O autor verificou que o conteúdo de água e a temperatura são os principais fatores que afetam a difusividade térmica e que variações na fração mássica de gordura, proteína e carboidrato promovem uma pequena influência nesta propriedade. Foi ajustado um modelo de regressão múltipla, baseado em 276 valores publicados de difusividade térmica de vários produtos alimentícios e obteve a seguinte expressão,

$$\alpha = [0,057363 X_w + 0,000288(T + 273)] \times 10^{-6} \quad (6.24)$$

O erro padrão na estimativa, a partir deste modelo, é de  $0,014 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Os mesmos 276 valores foram ajustados pelo modelo de Riedel (1969), apresentando um erro padrão de  $0,017 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Baseados na composição de alimentos líquidos, Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995), sugerem o seguinte modelo, válido para a faixa de temperaturas de -40°C a 150°C para suspensões com conteúdo de sólidos de 0 a 95%.

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i v_i \quad (6.25)$$

onde  $v_i$  é a fração volumétrica de cada componente do alimento e  $\alpha_i$  é a difusividade térmica para cada um dos componentes químicos do alimento. Na Tabela 6.2 são apresentados os

modelos ajustados pelos autores para a predição da difusividade térmica de diversos componentes químicos dos alimentos.

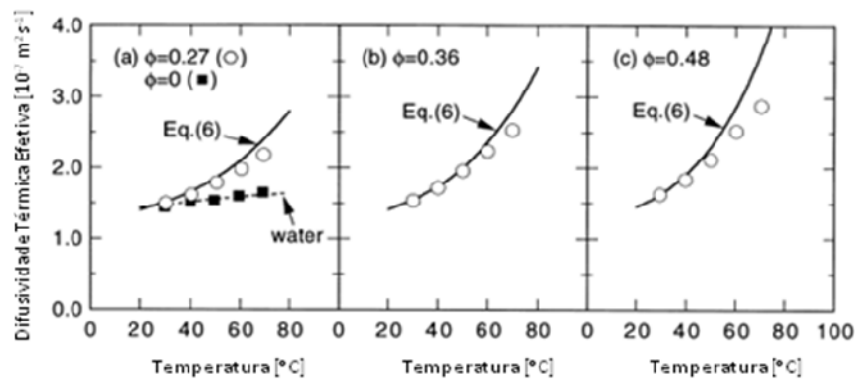
**Tabela 6.2:** Difusividade térmica dos principais constituintes dos alimentos. Fonte: Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995).

Componente	Equação [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ], com a temperatura expressa em [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Água	$\alpha_w = 1,3168 \times 10^{-1} + 6,2477 \times 10^{-4}T - 2,4022 \times 10^{-6}T^2$
Gelo	$\alpha_g = 1,1756 - 6,0833 \times 10^{-3}T + 9,5037 \times 10^{-5}T^2$
Proteína	$\alpha_p = 6,8714 \times 10^{-2} + 4,7578 \times 10^{-4}T - 1,4646 \times 10^{-6}T^2$
Lipídio	$\alpha_l = 9,8777 \times 10^{-2} - 1,2569 \times 10^{-4}T - 3,8286 \times 10^{-8}T^2$
Carboidrato	$\alpha_c = 8,0842 \times 10^{-2} + 5,3052 \times 10^{-4}T - 2,3218 \times 10^{-6}T^2$
Fibra	$\alpha_f = 7,3976 \times 10^{-2} + 5,1902 \times 10^{-4}T - 2,2202 \times 10^{-6}T^2$
Cinza	$\alpha_{ci} = 1,2461 \times 10^{-1} + 3,7321 \times 10^{-4}T - 1,2244 \times 10^{-6}T^2$

Em sua revisão sobre os métodos de determinação da difusividade térmica de alimentos, Singh (1982) aponta que, apesar de alguns avanços já alcançados, são necessárias pesquisas inovadoras para a obtenção de dados de difusividade térmica para alimentos heterogêneos processados.

Em relação a este tipo de alimento, a literatura contém poucos dados disponíveis, principalmente quando se trata de alimentos líquidos. O trabalho de Sakiyama *et al.* (1999), entretanto, apesar de não ser aplicado especificamente a alimentos, e sim a soluções modelo, é bastante promissor na área. O estudo teve como objetivo a construção de um modelo de predição da difusividade térmica aparente de materiais alimentícios porosos. Os autores desenvolveram um modelo teórico que foi comparado com dados experimentais obtidos a partir do método baseado na solução analítica da equação da conservação da energia para a difusão de calor em um cilindro curto. As amostras testadas foram géis alimentícios impregnados com bolhas de ar. Um dos pontos de grande interesse nos resultados obtidos pelos autores é na determinação da difusividade térmica dos géis impregnados com bolhas

de ar em função da temperatura. Os autores observaram que a difusividade térmica não varia de forma linear com a temperatura, como pode ser observado nos gráficos da Figura 6.6, sendo este desvio da linearidade diretamente proporcional à fração de ar dispersa na amostra. A 'Equação 6', indicada pelos autores, representa o modelo teórico desenvolvido, os círculos representam os dados experimentais e  $\phi$  é a fração de ar dispersa no gel.



**Figura 6.6:** Difusividade térmica efetiva (ou aparente) de géis de alginato impregnados com bolhas de ar em função da temperatura. Fonte: Sakiyama *et al.* (1999).

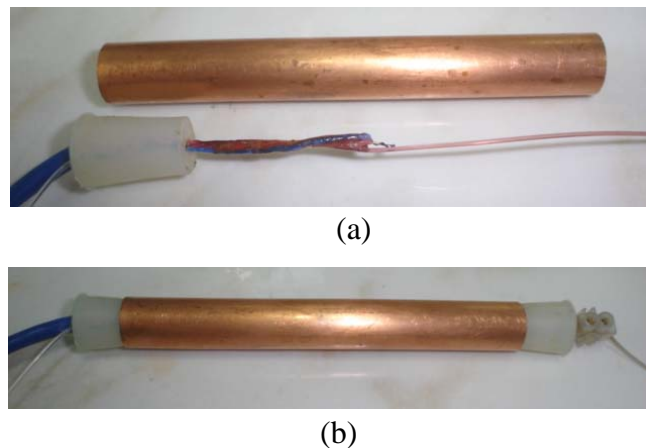
## 6.2 Metodologia

### 6.2.1 Procedimento Experimental

A difusividade térmica aparente das polpas (aeradas) (a) foi determinada pelo método proposto por Baïri, Laraqi e García de María (2007), sendo este método o escolhido em função de sua simplicidade e acuracidade.

Amostras de cerca de 10 g de cada polpa de fruta foram empacotadas em células cilíndricas de cobre com 105 mm de comprimento, 11 mm de diâmetro interno e 0,094 mm de espessura, que possuem em seu centro geométrico um termopar tipo T (cobre/constantan)

com 0,2 mm de espessura, previamente calibrado, e nas extremidades rolhas de silicone. O posicionamento do termopar no centro geométrico de cada célula foi realizado com auxílio de um fio de nylon colado ao mesmo, que atravessava as células de lado a lado, e era preso na parte externa das mesmas com um conector de fios. A Figura 6.7 apresenta fotografias com os detalhamentos das células para medição da difusividade térmica. Foram construídas cinco células similares uma vez que, como há a necessidade de realizar a ambientação da amostra, as etapas de ambientação e medição pudessem ser realizadas simultaneamente.



**Figura 6.7:** Fotografias das células para determinação da difusividade térmica; (a) célula aberta, sensor de temperatura preso ao fio de nylon, (b) célula fechada com as rolhas de silicone nas extremidades e o conector de fios prendendo o fio de nylon em uma das extremidades da célula.

A metodologia de calibração dos sensores de temperatura, bem como os resultados da mesma, está apresentada no Apêndice C.1.

Cada amostra, já no interior das células, foi ambientada em um banho termostático, (que doravante será designado como banho de ambientação), em temperaturas pré-definidas para cada experimento. Esta temperatura de ambientação depende do valor de temperatura na qual se deseja determinar a difusividade térmica e será explicada com maiores detalhes mais adiante. Após a ambientação, a célula foi levada a outro banho termostático (que será designado como banho de medição), com capacidade de 3 L, que apresentava temperatura cerca de 30°C superior à de ambientação. A temperatura do banho de medição deve ser mantida o mais uniforme possível, e foi monitorada constantemente ao longo do experimento com o auxílio de um termopar tipo T, previamente calibrado, similar ao existente no interior de cada célula. A diferença de temperatura entre a de ambientação e a

temperatura do banho de medição, de 30°C, foi determinada a partir dos testes realizados durante a etapa de validação do experimento, realizada com água destilada, conforme será descrito na seção 6.2.3. Verificou-se que diferenças menores que 30°C provocavam pequenas alterações na temperatura do banho de medição no momento em que a célula era imersa no mesmo; estas pequenas flutuações na temperatura do banho já eram suficientes para que a medida da difusividade térmica apresentasse altos erros (em relação aos valores da água). Além disso, para garantir que a temperatura do banho de medição se mantivesse o mais estável possível, foi necessário incrementar o seu isolamento térmico com uma camada de poliestireno expandido (*Isopor*) de cerca de 500 mm, conforme mostrado na Figura 6.8.



**Figura 6.8:** Fotografia do banho de medição com isolamento térmico.

O banho de medição possui circulação forçada de água, que promove forte turbulência, fator preponderante do método, já que o mesmo prevê que a resistência convectiva à troca térmica entre o fluido de aquecimento e a célula seja muito pequena. Com a imersão da célula no banho de medição, iniciava-se o monitoramento da temperatura no interior da célula, a cada 0,5 s, com um sistema de aquisição de dados (*Novus*, modelo *Field Logger*), ligado a um computador pessoal.

A difusividade térmica de cada amostra analisada foi determinada nas temperaturas de 25°C, 40°C, 55°C e 70°C. Estas temperaturas são as médias aritméticas das faixas de temperaturas percorridas pela amostra durante cada teste. Assim, por exemplo, no

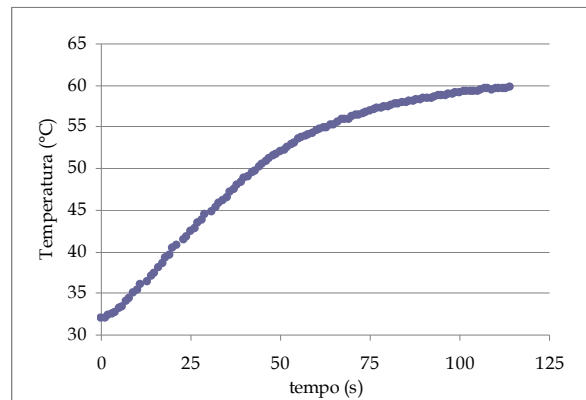
experimento 1, a amostra foi aquecida de 10°C até 40°C e, desta forma, a difusividade térmica da amostra foi determinada para a temperatura de 25°C. Os experimentos realizados podem ser observados na Tabela 6.3. Os quatro experimentos foram realizados em quintuplicata.

**Tabela 6.3:** Temperatura de ambientação, temperatura do banho de medição e temperatura na qual a difusividade térmica é determinada, nos quatro experimentos de difusividade térmica realizados.

Experimento	Temperatura de ambientação - $T_0$ [°C]	Temperatura do banho de medição - $T_e$ [°C]	Temperatura na qual a difusividade térmica é determinada [°C]
1	10	40	25
2	25	55	40
3	40	70	55
4	55	85	70

### 6.2.2 Cálculo da Difusividade Térmica

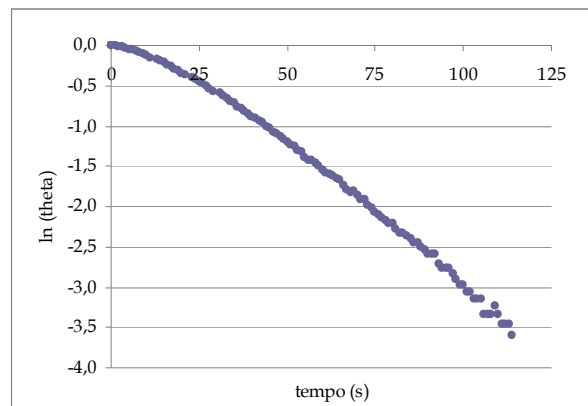
Durante o teste, obtém-se uma curva de penetração de calor exponencial, conforme pode ser visualizado na Figura 6.9.



**Figura 6.9:** Exemplo de curva de penetração de calor na célula obtida experimentalmente.

O valor de  $\theta$  foi calculado para cada instante de tempo e, a seguir, graficou-se a curva  $\ln(\theta) = f(t)$ , obtendo-se uma reta que está esquematizada na Figura 6.10.



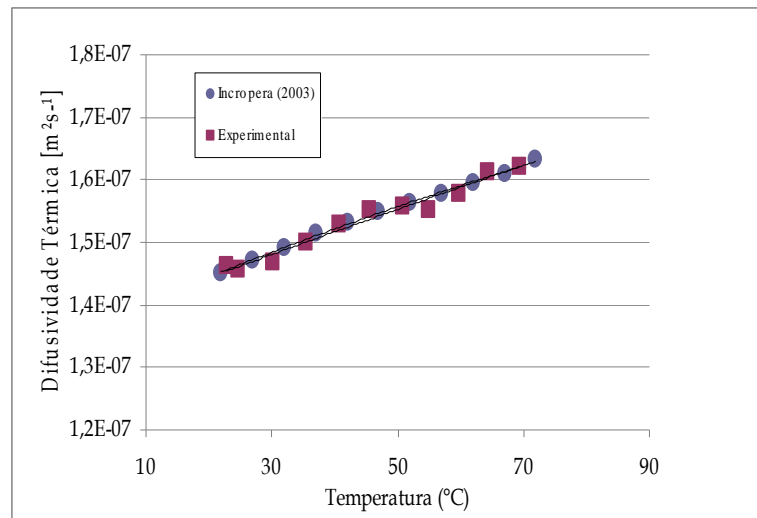


**Figura 6.10:** Exemplo de curva da temperatura adimensional linearizada, obtida nos experimentos de determinação da difusividade térmica.

A inclinação desta reta foi determinada a partir de regressão linear, realizada com auxílio do *software Excel*. Foram testadas várias porções da curva, de forma a ser obtido o melhor coeficiente de correlação. Conhecendo a inclinação desta reta e o raio da célula ( $R$ ), a difusividade térmica da amostra foi determinada através da Equação 6.19.

### 6.2.3 Validação do Experimento

O experimento foi previamente validado com a determinação da difusividade térmica de amostras de água deionizada na faixa de temperaturas em estudo. Estas amostras foram aditivadas com 0,3% de goma xantana para minimizar efeitos convectivos no interior da célula. Os resultados obtidos foram comparados com dados de difusividade térmica da água em função da temperatura disponíveis na literatura (INCROPERA, 2003, adaptado de LILEY, 1984). Para a validação do experimento, foram realizados 151 ensaios, resultado de cerca de 15 repetições para cada temperatura, na faixa de 20 a 70°C, com intervalos de 5°C. A partir do cálculo do erro relativo para cada ponto foi possível determinar o erro médio do experimento. O resultado encontrado foi  $-0,64 \pm 2,64\%$ , o que está de acordo com a precisão do método apresentada pelos autores do mesmo. Os resultados dos testes de validação podem ser observados no Apêndice C.2, e, graficamente, na Figura 6.11.



**Figura 6.11:** Difusividade térmica da água em função da temperatura; dados da literatura (INCROPERA, 2003) e resultados obtidos durante a validação do experimento.

#### 6.2.4 Análise dos Dados

Os resultados foram submetidos à Análise de Variâncias e ao Teste de Diferença Limite de Significância para as médias, com um nível de significância de 5%, utilizando o *Software Statistica 7.0*.

O comportamento da difusividade térmica aparente das polpas com a temperatura ( $T$ ) e com o teor de açúcar adicionado ( $Co$ ) foi ajustado segundo um modelo quadrático de regressão múltipla (mostrado na Equação 6.26), com o auxílio do *Software Statistica 7.0*. Os parâmetros dos modelos foram submetidos à Análise de Variâncias, sendo aceitos somente os significativos, com um nível de significância de 5%. Foi determinado o coeficiente de variabilidade para cada um dos modelos de regressão múltipla ajustados. O coeficiente foi calculado a partir da Equação 4.21.

$$\alpha = a + b.T + c.T^2 + d.Co + e.Co^2 + f.T.Co \quad (6.26)$$

onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  e  $f$  são os parâmetros do modelo e  $Co$  é o teor de açúcar adicionado [%].

Todos os resultados (médias) dos experimentos de determinação da difusividade térmica podem ser encontrados no Apêndice C.3.

## 6.3 Resultados e Discussão

### 6.3.1 Difusividade térmica aparente das polpas em função da temperatura e do teor de açúcar adicionado

Os resultados dos ensaios de determinação da difusividade térmica aparente das polpas estão apresentados na Tabela 6.4 que também mostra a difusividade térmica para água, determinada experimentalmente pelo mesmo método.

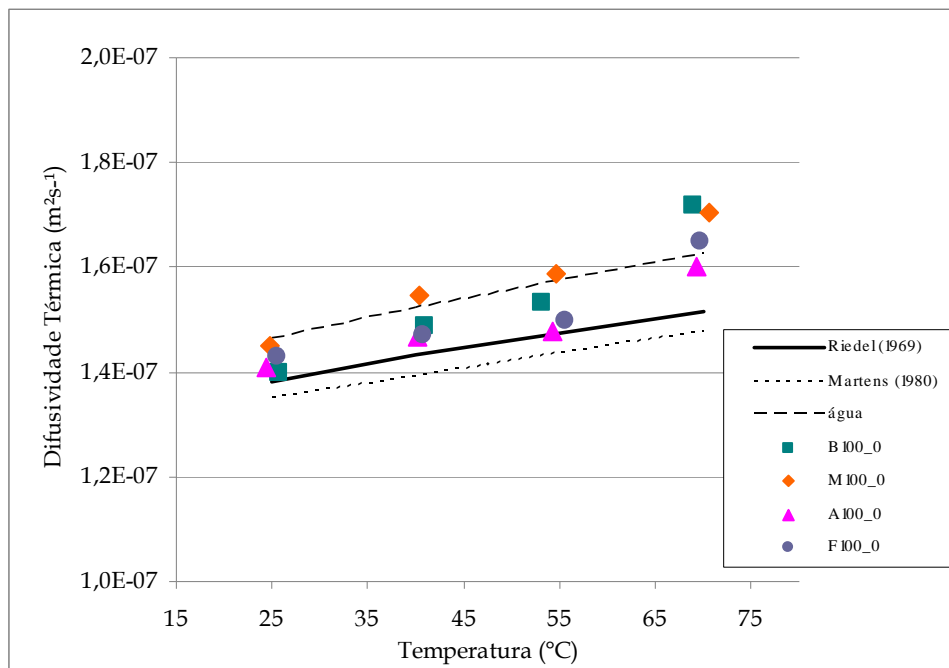
**Tabela 6.4:** Difusividade térmica das polpas de framboesa, amora, mirtilo e morango com 0, 5 e 10% de açúcar e difusividade térmica da água (determinada experimentalmente) em função da temperatura.

Polpa [%]	Açúcar [%]	T [°C]	Difusividade Térmica Aparente [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> x10 <sup>7</sup> ]			
			Framboesa	Amora	Mirtilo	Morango
100	0	25	1,43 a*	1,41 a	1,40 a	1,45 ab
100	0	40	1,47 abc	1,47 abcd	1,49 ab	1,54 ab
100	0	55	1,50 abc	1,48 abcd	1,53 abcd	1,59 ab
100	0	70	1,65 c	1,60 bcd	1,72 d	1,71 ab
100	4,75	25	1,42 a	1,43 abc	1,40 a	1,37 a
100	4,75	40	1,46 abc	1,42 a	1,47 ab	1,39 a
100	4,75	55	1,52 abc	1,44 ac	1,54 abcd	1,48 ab
100	4,75	70	1,61 bc	1,52 abcd	1,73 d	1,63 ab
100	9,08	25	1,37 a	1,47 abcd	1,40 a	1,40 a
100	9,08	40	1,48 abc	1,43 ac	1,44 ab	1,48 ab
100	9,08	55	1,52 abc	1,52 abcd	1,54 abcd	1,62 ab
100	9,08	70	1,64 bc	1,60 bd	1,71 cd	1,70 b
<b>Água</b>						
		25	1,45 ab	1,45 abc	1,45 ab	1,45 ab
		40	1,52 abc	1,52 abcd	1,52 abc	1,52 ab
		55	1,55 abc	1,55 abcd	1,55 abc	1,55 ab
		70	1,62 c	1,62 d	1,62 bcd	1,62 ab

\* Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras ao nível de 0,05 de significância, pelo Teste de Diferença Limite de Significância.

Analisando os dados da Tabela 6.4, observa-se que as difusividades térmicas aparentes das polpas variaram pouco com a temperatura, apresentando uma diferença um pouco maior em relação às demais para a temperatura de 70°C. A composição praticamente não influenciou no valor da propriedade, dentro da faixa estudada. Além disso, a propriedade, para todos os produtos analisados, não diferiu significativamente da difusividade térmica da água.

A Figura 6.12 mostra a difusividade térmica das polpas sem açúcar em função da temperatura, assim como a difusividade térmica da água e os modelos de Riedel (1969) (Equação 6.23) e Martens (1980) (Equação 6.24) para um alimento com 85% de umidade, nesta faixa de temperaturas.



**Figura 6.12:** Difusividade térmica das polpas de mirtilo, morango, amora e framboesa sem açúcar em função da temperatura; difusividade térmica da água em função da temperatura e modelos de Riedel (1969) e Martens (1980) para um alimento com 85% de umidade.

A análise desta figura mostra que há uma tendência de elevação da difusividade térmica aparente das polpas com a temperatura, da mesma forma que para a água e para os modelos de Riedel (1969) e Martens (1980). Também é possível observar que a difusividade térmica de um alimento contendo 85% de umidade é muito próxima à da água, conforme os

modelos dos autores. Desta forma, provavelmente a semelhança das difusividades térmicas aparentes das polpas e da água se deve aos seus elevados conteúdos deste componente, uma vez que os frutos utilizados na sua preparação possuíam valores superiores a 83% de umidade, conforme mostrado na Tabela 2.2.

Cabe salientar que esta é a difusividade aparente das polpas, uma vez que o produto é heterogêneo, por possuir sólidos em suspensão e ar disperso em sua estrutura. Provavelmente, este fator influenciou na maior variabilidade dos resultados em relação aos resultados para a água, conforme pode ser observado nas Tabelas C.2, C.3 e C.4, no Apêndice C, uma vez que o tipo de produto analisado apresenta alta heterogeneidade em sua composição físico-química. Esta fonte de erro é discutida por Gaffney *et al.* (1980), citados por Singh (1982), e está apresentada ao final da seção 6.2.1 no presente trabalho. Como foram detectadas algumas diferenças significativas entre os valores da difusividade térmica aparente das polpas, foram ajustados modelos de regressão múltipla para prever o valor da propriedade em função da temperatura e do teor de açúcar adicionado, conforme mostrado pela Equação 6.26. Os parâmetros ajustados podem ser observados na Tabela 6.5, cujos coeficientes de correlação foram superiores a 0,90 e coeficientes de variabilidade foram inferiores a 1,3%, demonstrando que o modelo se ajustou bem aos dados experimentais.

**Tabela 6.5:** Parâmetros *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *f*,  $R^2$  e CV dos modelos da difusividade térmica aparente como função da temperatura e com o teor de açúcar adicionado às polpas.

Produto	Parâmetros do modelo						$R^2$	CV(%)
	a	b	c	d	e	f		
F-100	$1,43 \times 10^{-7}$	ns*	ns	ns	ns	ns	0,9454	1,051
A-100	$1,53 \times 10^{-7}$	ns	$1,07 \times 10^{-11}$	ns	$2,09 \times 10^{-10}$	ns	0,9016	1,297
B-100	$1,49 \times 10^{-7}$	$-6,62 \times 10^{-10}$	$1,46 \times 10^{-11}$	ns	ns	ns	0,9883	0,841
M-100	$1,43 \times 10^{-7}$	ns	ns	$-4,76 \times 10^{-9}$	$4,01 \times 10^{-10}$	ns	0,9776	1,141

\* Parâmetro não significativo

Estes modelos são válidos para a faixa de temperaturas de 25 a 70°C, e para as polpas com teores de sólidos solúveis apresentados na Tabela 3.3. Os gráficos de Pareto, que denotam a significância dos parâmetros dos modelos, podem ser encontrados no Apêndice C.4, bem como os gráficos dos valores observados *versus* preditos.

Na Tabela 6.5, analisando os parâmetros dos modelos ajustados, verifica-se que a difusividade térmica aparente da polpa de framboesa é uma constante na faixa de temperaturas e sólidos solúveis estudada; a difusividade térmica aparente da polpa de morango não é influenciada pela temperatura, sendo variável em função do teor de açúcar adicionado. Em relação às demais polpas, observa-se que suas difusividades térmicas aparentes são funções não lineares da temperatura. Este resultado concorda com o estudo de Sakiyama *et al.* (1999), apresentado no final da seção 6.1.3. Naquele trabalho, os autores verificaram que o comportamento da difusividade térmica aparente de géis impregnados com bolhas de ar não é função linear da temperatura. Como as polpas são ricas em substâncias pécnicas (que formam géis), possivelmente apresentando viscosidades elevadas, e, por possuírem ar disperso em sua estrutura, era de se esperar que suas difusividades térmicas apresentassem este comportamento. As superfícies dos modelos ajustados, bem como as curvas de contorno, podem ser observadas no Apêndice C.5.

### ***6.3.2 Difusividade térmica dos néctares***

Os resultados de difusividade térmica para as polpas motivaram a não medição da propriedade para os néctares, uma vez que, com a adição de água ao produto, os valores da mesma tenderiam a se aproximar cada vez mais da difusividade térmica da água pura.

## **6.4 Conclusão**

Foi possível observar que a determinação da difusividade térmica de alimentos heterogêneos, tais como as polpas de frutas estudadas, é uma tarefa que demanda bastante cuidado e atenção nos procedimentos experimentais, devido à sensibilidade dos métodos disponíveis para esta medição. A heterogeneidade dos materiais alimentícios testados provocou uma maior variabilidade nos resultados.

Observou-se que os valores da difusividade térmica aparente para as polpas de frutas são muito próximos aos valores das propriedades para a água pura, já que estes alimentos possuem elevados conteúdos de umidade. Estes resultados motivaram a não determinação experimental desta propriedade para os néctares, uma vez que, com a diluição das polpas, as propriedades dos produtos tenderiam a se aproximar cada vez mais dos valores da água pura.

Foram ajustados modelos de predição da difusividade térmica de polpas de amora, framboesa, morango e mirtilo, em função da temperatura e da composição dos produtos; os modelos ajustados apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,90 e coeficientes de variabilidade inferiores a 1,3%, o que denota que os ajustes foram bons.

## Capítulo 7

### Calor Específico

Neste capítulo são apresentados os aspectos relativos ao calor específico dos produtos estudados, sendo inicialmente abordados os seus conceitos e principais aplicações, a importância do seu conhecimento para a indústria, as técnicas disponíveis para sua determinação e os dados já publicados na literatura para o tipo de produto em estudo. Posteriormente, são apresentados a metodologia aplicada e os resultados encontrados na determinação do calor específico das polpas.

#### 7.1 Fundamentos Teóricos

##### *7.1.1 Definições e Aplicações*

O calor específico,  $C$ , é definido como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa do material em um grau. O calor específico depende da natureza do processo de adição de calor, ou seja, se ele ocorre à pressão constante ou a



volume constante. Segundo Urbicain e Lozano (1997), o calor específico de alimentos sólidos e líquidos depende da temperatura, mas não é sensível à pressão, já que estes materiais podem ser considerados incompressíveis na maior parte das aplicações típicas. Ainda, segundo Mohesenin (1980), citado por Rahman (1995), como a maior parte das operações de processamento dos alimentos ocorrem à pressão atmosférica, o calor específico para alimentos é usualmente apresentado à pressão constante ( $C_p$ ).

Segundo Rahman (1995), o conhecimento do calor específico é necessário para o cálculo do calor transferido nas operações de processamento térmico dos alimentos. Além disso, o estado da água nos alimentos pode ser identificado pela medida desta propriedade, bem como a estrutura cristalina dos alimentos, através da determinação, via análise térmica em um Calorímetro Diferencial de Varredura, dos pontos de transição vítrea dos alimentos.

### ***7.1.2 Técnicas de Determinação do Calor Específico***

Segundo Rahman (1995), as técnicas de medição do calor específico podem ser agrupadas em três: método adiabático, calorimetria diferencial de varredura (DSC - *Differential Scanning Calorimeter*) e método de mistura.

O método adiabático, proposto por Moline *et al.* (1961) é indicado para a medição do calor específico de produtos no estado congelado.

Segundo Telis-Romero *et al.* (1998), o método mais indicado atualmente para a medição do calor específico de alimentos é a calorimetria diferencial de varredura. AbuDagga *et al.* (1997) utilizaram este método para a determinação do  $C_p$  de pasta de surimi na temperatura de cozimento, Shamsudin *et al.* (2005), na determinação da propriedade em suco de goiaba e Zainal *et al.* (2000), na determinação do  $C_p$  de suco de goiaba rosa, na faixa de temperaturas de pasteurização, ou seja, de 65 a 85°C. Uma das grandes vantagens do método é a possibilidade de avaliar o comportamento do  $C_p$  de uma substância em uma ampla faixa de temperaturas. Porém, Sweet (1995) citado por Shamsudin *et al.* (2005) e por Telis-Romero *et al.* (1998), afirma que este método apresenta as desvantagens de ser extremamente caro e de difícil condução. Além disso, segundo Hwang e Hayakawa (1979),

na condução das análises em DSC são necessárias quantidades muito pequenas de amostra, da ordem de mg, o que dificulta a padronização das mesmas, quando se trabalha com produtos alimentícios heterogêneos.

Telis-Romero *et al.* (1998) utilizaram o Método dos Cilindros Concêntricos, de Bellet *et al.* (1975), na determinação simultânea da condutividade térmica e do calor específico de suco de laranja. Segundo os autores, a grande vantagem deste método é a possibilidade de estudar o comportamento das duas propriedades em um único experimento.

Segundo Mohsenin (1980), citado por Rahman (1995), o método de mistura também é amplamente utilizado para a medição do calor específico. Neste, uma amostra de massa e temperatura conhecidas é colocada no interior de um calorímetro, de capacidade calorífica igualmente conhecida, contendo água ou outro líquido de massa e temperatura conhecidas. O calor específico da amostra é determinado a partir de um balanço de energia que quantifica o calor trocado entre a água e a amostra. Segundo Hwang e Hayakawa (1979), como o método de misturas pressupõe o contato direto entre o material alimentício e o meio de troca térmica, não é tão fácil determinar o calor específico de alimentos higroscópicos por este método, uma vez que seria necessário quantificar o calor de dissolução das entidades químicas solúveis em água presentes no produto alimentício. Pealzner (1951), Li *et al.* (1971) e Kulacki e Kennedy (1978), citados por Hwang e Hayakawa (1979), desenvolveram um método de misturas modificado para determinar o calor específico de trigo, farinha de trigo e massa de biscoito, respectivamente. A técnica consiste em encapsular a amostra em um cilindro de cobre e imergi-lo na água presente em um calorímetro a uma temperatura diferente da amostra.

Hwang e Hayakawa (1979) desenvolveram um calorímetro baseado no método de misturas modificado, com o qual obtiveram erros menores que 2%; com este método é possível a determinação do calor específico de alimentos a temperaturas superiores a 100°C. O calorímetro de Hwang e Hayakawa (1979) consiste em uma garrafa térmica que possui em seu interior um reservatório plástico fixado na tampa do equipamento, utilizado para conter a amostra. Cerca de 250 g de água destilada são colocadas no interior do calorímetro, de forma a circundar o reservatório plástico, e servir como meio de troca térmica. A temperatura da água é monitorada com um termopar tipo T (cobre/constantan). O sistema é completamente vedado, para minimizar as perdas de calor para o ambiente.

O procedimento experimental consiste em, inicialmente, realizar a ambientação do calorímetro, já com a água em seu interior, na temperatura próxima de 10°C, com auxílio de uma câmara de refrigeração. A amostra, por sua vez, é ambientada em uma estufa ou banho térmico. Cerca de 30 minutos antes do início do experimento, o calorímetro é removido da câmara e exposto à temperatura ambiente. Espera-se até que a taxa de troca térmica entre o dispositivo e o ambiente se torne constante. Neste momento, após o início do monitoramento da temperatura da água, o calorímetro é aberto e a amostra, já ambientada em uma temperatura superior à da água contida no calorímetro, é rapidamente inserida no mesmo, sendo o recipiente rapidamente fechado, para evitar perdas de calor. O sistema é agitado a cada 5 minutos aproximadamente, e a temperatura monitorada por cerca de 3 horas. Desta forma é obtida uma curva de variação da temperatura da água com o tempo.

Segundo Hwang e Hayakawa (1979), a partir da lei da conservação da energia, o conteúdo total de calor da água, do calorímetro e da amostra, no estado inicial, deve ser igual ao estado final, somando-se ainda a perda de calor sofrida pelo sistema para o ambiente, uma vez que o mesmo não é completamente isolado. Desta forma, o balanço de energia pode ser representado pela Equação 7.1:

$$Cp_w \cdot m_w \cdot T_{0w} + Cp_k \cdot m_k \cdot T_{0k} + Cp_a \cdot m_a \cdot T_{0a} = Cp_w \cdot m_w \cdot T_{fw} + Cp_k \cdot m_k \cdot T_{fk} + Cp_a \cdot m_a \cdot T_{fa} - L \quad (7.1)$$

onde  $Cp$  é o calor específico à pressão constante [ $J \text{ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $m$  é a massa [kg],  $T_0$  é a temperatura inicial e  $T_f$  é a temperatura final [ $^\circ\text{C}$ ]. Os subscritos  $w$ ,  $k$  e  $a$  referem-se à água, ao calorímetro e à amostra, respectivamente.  $L$  é o fator de perda de calor para o ambiente [J].

A análise de Hwang e Hayakawa (1979) prevê que as perdas de calor para o ambiente ocorram em uma taxa constante ao longo do experimento. Esta hipótese foi imposta devido à dificuldade em se quantificar tais perdas no início do experimento, quando a amostra e a água estão trocando calor entre si. Quando o sistema interno atinge o *quase* equilíbrio térmico, ou seja, quando a água e a amostra atingem a mesma temperatura, o sistema passa a perder calor para o ambiente externo a uma taxa constante; sendo esta determinada no método, a partir da Equação 7.2:

$$L = (Cp_w \cdot m_w + Cp_k \cdot m_k + Cp_a \cdot m_a) \cdot \frac{dT}{dt} \cdot t \quad (7.2)$$

onde  $dT/dt$  é a taxa de variação da temperatura do sistema com o tempo [ $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ], e  $t$  é o tempo [min].

O valor de  $dT/dt$  é determinado a partir do gráfico da variação da temperatura da água no calorímetro durante o experimento. A partir do instante de tempo no qual as temperaturas da amostra e da água são iguais, a variação da temperatura da água com o tempo passa a ser uma reta, sendo a inclinação desta, o valor de  $dT/dt$ .

Sabendo que  $T_{0w}=T_{0k}=T_0$  e que  $T_{fw}=T_{fk}=T_{fa}=T_e$  e isolando a variável de interesse ( $Cp_a$ ) da Equação 7.1 obtém-se,

$$Cp_a = \frac{(Cp_w \cdot m_w + H_k) \cdot [T_e - T_0 - (dT/dt)t_e]}{m_a [T_{0a} - T_e + (dT/dt)t_e]} \quad (7.3)$$

onde  $H_k$  é a capacidade calorífica do calorímetro [ $\text{J } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ], que representa a quantidade de calor necessário para elevar a massa do calorímetro em um grau, ou seja,  $H_k = m_k \cdot Cp_k$ ;  $t_e$  é o instante de tempo no qual foi atingido o *quase* equilíbrio térmico e  $T_e$  é a temperatura do sistema neste instante.

O valor de  $H_k$  deve ser determinado experimentalmente, uma vez que é característico de cada calorímetro. Para sua determinação, Hwang e Hayakawa (1979) realizaram uma rodada do experimento utilizando água como amostra, e, conhecendo o valor do  $Cp$  da água a partir da literatura, a única incógnita da Equação 7.3 passa a ser o próprio  $H_k$ .

Hwang e Hayakawa (1979) examinaram a acuracidade do método, analisando uma série de produtos alimentícios, dentre eles frutos e vegetais. Os erros máximos observados foram da ordem de 3% quando os valores experimentais foram comparados com os disponíveis na literatura, para os produtos testados. Segundo os autores, a precisão da medida do calor específico é fortemente dependente da precisão na determinação da variação da temperatura do calorímetro, desta forma, é desejável que esta variação seja a mais alta possível. Assim, a precisão do método pode ser aumentada com a utilização de uma grande diferença de temperaturas iniciais entre o calorímetro e a amostra e usando uma quantidade representativa de amostra.

Moura *et al.* (2003), em um estudo das propriedades termofísicas de soluções modelo similares a sucos, realizaram uma adaptação do calorímetro de Hwang e Hayakawa (1979), aplicável a sucos. No seu experimento, os autores utilizaram um calorímetro composto de uma garrafa térmica com capacidade de 1 L com uma tampa plástica por onde passava um termopar utilizado para o monitoramento da temperatura no interior do dispositivo. As amostras da solução modelo, com massas variando entre 50 e 100 g, eram acondicionadas em embalagens de polietileno, seladas previamente e armazenadas a 5°C. Após a introdução de uma massa de água conhecida no calorímetro (com temperatura igualmente conhecida), era introduzida a amostra e monitorada a temperatura no interior do calorímetro até o equilíbrio térmico, com o sistema sendo agitado continuamente em um 'shaker'. O procedimento matemático para a obtenção do calor específico da amostra é semelhante ao de Hwang e Hayakawa (1979).

As principais limitações do método de misturas são: o tempo do experimento, que pode chegar a 3 horas; e a dificuldade na obtenção da variação do calor específico do material em uma ampla faixa de temperaturas, uma vez que o valor do calor específico obtido em cada rodada experimental é o da propriedade na temperatura média da faixa de temperaturas percorridas pela mesma, de forma que a tarefa de estudar a propriedade em uma faixa de temperaturas mais ampla se torna bastante laboriosa.

### 7.1.3 Correlações Empíricas e Dados da Literatura

Siebel (1892), citado por Rahman (1995), propôs que o calor específico de materiais alimentícios, tais como ovos, carnes, frutos e vegetais possa ser obtido a partir da soma do calor específico da água e do conteúdo sólido. Mohsenin (1980), citado por Rahman (1995) mencionou que o conceito de Siebel para o calor específico era verdadeiro para tecidos biológicos, nos quais a matéria seca pode ser isolada e o valor de  $C_p$  para este material seco pode ser determinado; e, a partir deste conceito, o autor propôs o modelo apresentado na Equação 7.4.

$$C_p = (C_{p_w} - C_{p_s})X_w + C_{p_s} \quad (7.4)$$

onde os índices subscritos  $w$  e  $s$  referem-se à água e à matéria seca que compõem o alimento, respectivamente. Cabe salientar que o valor de  $Cp_s$  é específico de cada material, uma vez que depende da composição química do mesmo. Segundo Sweat (1986), citado por Rahman (1995), este modelo não deve ser aplicado para alimentos com conteúdos de umidade baixos, pois apresenta erros consideráveis nesta faixa.

Baseados na composição de alimentos líquidos, Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995), sugerem o modelo representado pela Equação 7.5, válido para a faixa de temperaturas de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$  para suspensões com conteúdo de sólidos de 0 a 95%.

$$Cp = \sum_{i=1}^n Cp_i v_i \quad (7.5)$$

onde  $v_i$  é a fração volumétrica de cada componente do alimento e  $Cp_i$  é calor específico para cada um dos componentes químicos do alimento.

Na Tabela 7.1 são apresentados os modelos ajustados pelos autores para a predição do calor específico de diversos componentes químicos dos alimentos.

**Tabela 7.1:** Modelos para o cálculo do calor específico dos principais constituintes dos alimentos.  
Fonte: Choi e Okos (1986), citados por Rahman (1995).

Componente	Equação [ $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ], com a temperatura expressa em [ $^{\circ}\text{C}$ ]
Água	$Cp_w = 4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5} T + 5,4731 \times 10^{-6} T^2$
Proteína	$Cp_p = 2,00822 + 1,2089 \times 10^{-3} T - 1,3129 \times 10^{-6} T^2$
Lipídio	$Cp_l = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3} T - 4,8008 \times 10^{-6} T^2$
Carboidrato	$Cp_c = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} T - 5,9399 \times 10^{-6} T^2$
Fibra	$Cp_f = 1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3} T - 4,6509 \times 10^{-6} T^2$
Cinza	$Cp_{ci} = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3} T - 3,6817 \times 10^{-6} T^2$

Segundo Ordinanz (1946), citado por Rahman (1995), o calor específico de *Berries* frescas, com fração mássica de água variando de 0,84 a 0,90, na faixa de temperaturas de 0 a  $100^{\circ}\text{C}$ , varia entre 3.724 a  $4.100 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Alvarado (1991), citado por Rahman (1995),

determinou a variação do calor específico de 27 tipos de polpas de frutas com o conteúdo de umidade dos produtos variando na faixa de 20 a 40°C, utilizando o método de misturas. Os resultados encontrados pelo autor para polpa de morango são apresentados na Tabela 7.2.

**Tabela 7.2:** Calor específico de polpa de morango em função do conteúdo de água. Fonte: Alvarado (1991), citado por Rahman (1995).

Fração mássica de água [ $X_w$ ]	$C_p$ [ $Jkg^{-1}C^{-1}$ ]
0,920	3.810
0,904	3.680
0,861	3.390
0,797	2.930
0,781	3.220
0,742	2.760
0,671	2.930
0,652	2.640

No Anexo C é apresentada uma compilação das equações empíricas propostas por diversos pesquisadores para a determinação do calor específico de sucos e polpas de frutas. Nesta compilação é possível observar a faixa de aplicação e o coeficiente de correlação do ajuste de cada modelo.

## 7.2 Metodologia

### 7.2.1 Procedimento Experimental

O calor específico aparente das polpas com e sem açúcar foi determinado através do método de Hwang e Hayakawa (1979), com a adaptação do método proposta por Moura *et al.* (2003).

Desta forma, foi construído um calorímetro constituído de uma garrafa térmica (marca *Aladin*) com capacidade de 0,6 L, sua tampa foi substituída por uma rolha de etilenoacetato de vinila (EVA), por onde era inserido um termopar tipo T (cobre/constantan),

previamente calibrado conforme metodologia apresentada no Apêndice C. O posicionamento do termopar é no centro geométrico do calorímetro, de forma a possibilitar a medida da temperatura da água contida em seu interior. O termopar foi ligado ao mesmo sistema de aquisição de dados descrito na seção 6.2.1. O calorímetro foi disposto em um 'shaker' que impunha uma agitação constante e vigorosa ao dispositivo. A Figura 7.1 apresenta uma fotografia do aparato experimental utilizado na determinação do calor específico.



**Figura 7.1:** Fotografia do calorímetro de mistura disposto no 'shaker'.

A determinação da capacidade calorífica do calorímetro foi realizada em quintuplicata, conforme procedimento de Hwang e Hayakawa (1979). Os resultados estão apresentados no Apêndice D.1.

Para a preparação das amostras, cerca de 100 g de cada tipo de polpa foram acondicionados no interior de sacos de polietileno de baixa densidade (PEBD) com dimensões de 3 cm de largura e 15 cm de comprimento, com massa de 0,027 g. A amostra assim embalada foi ambientada em uma câmara de refrigeração, em temperaturas que variaram de 4 a 10°C, de acordo com a temperatura ambiente, por 24 h, antes de cada análise



análise. Na fotografia da Figura 7.2 é possível visualizar a amostra acondicionada na embalagem de PEBD.



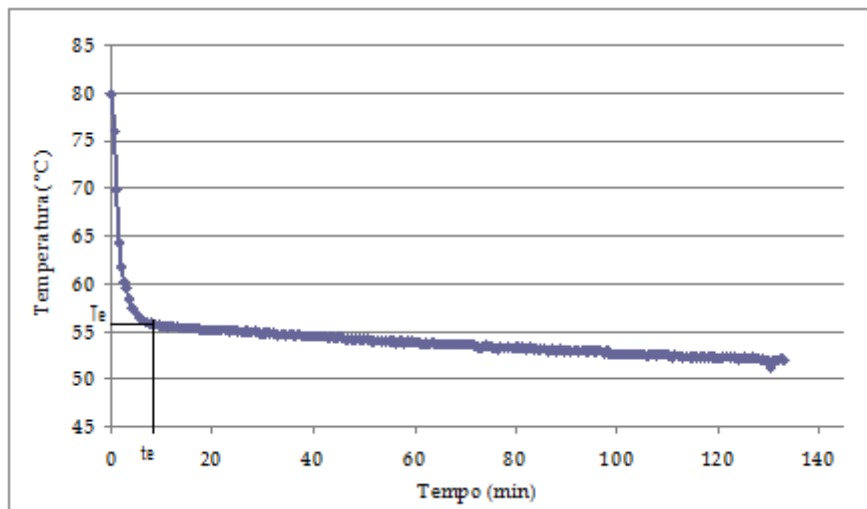
**Figura 7.2:** Fotografia do acondicionamento das amostras de polpa em pequenos sacos de PEBD, para a determinação do calor específico.

Na condução do experimento, cerca de 180 g de água destilada foram aquecidos a temperaturas entre 80 a 90°C. Esta quantidade de água foi rapidamente pesada e levada ao calorímetro (previamente seco). O dispositivo, agora fechado, foi submetido à agitação por cerca de 30 minutos, para que a água entrasse em *quase* equilíbrio com o calorímetro e a taxa de perda de calor para o ambiente se tornasse constante, sendo a temperatura da água monitorada desde o início do processo. A definição deste tempo de ambientação foi tomada levando-se em conta as informações de Hwang e Hayakawa (1979) e de Moura *et al.* (2003). A amostra, previamente ambientada (24h na câmara de refrigeração, estando na  $T_{0a}$ ), foi retirada da câmara de refrigeração, rapidamente pesada e inserida no calorímetro. O dispositivo, já fechado foi mantido por mais 2 horas sob agitação, durante este período foi realizada a aquisição dos dados de temperatura da água a cada 30 s. A determinação da temperatura real da amostra no instante inicial ( $T_{0a}$ ) foi realizada colocando-se outro saco de PEBD com iguais proporções e igualmente cheio no interior da câmara e neste foi inserido um termômetro de mercúrio, com escala 0,1°C.

### 7.2.2 Cálculo do Calor Específico

A variação da temperatura durante o experimento gera uma curva conforme a apresentada na Figura 7.3, para a polpa de mirtilo com 10% de açúcar. O instante zero representa a entrada da amostra no calorímetro. Analisando esta curva, verifica-se que, com a inserção da amostra, há uma queda brusca na temperatura da água, uma vez que a mesma cede calor para a polpa. Esta queda dura cerca de alguns minutos, quando então a temperatura da água passa a variar linearmente com o tempo.

A inclinação desta reta foi determinada a partir de regressão linear, realizada com auxílio do *Software Excel*. Foram testadas várias partes da curva, de forma a ser obtido o melhor coeficiente de correlação. A partir do ajuste que gerava o melhor  $R^2$ , determinavam-se, além da inclinação da curva, os valores de  $T_e$  (temperatura de *quase* equilíbrio térmico, ou seja, temperatura da água a partir do momento em que a água e a amostra não trocam mais calor entre si) e  $t_e$  (instante no qual ocorre o *quase* equilíbrio térmico), os quais eram relativos ao início desta reta.



**Figura 7.3:** Variação da temperatura do calorímetro com o tempo. Experimento com o produto B-100-10 (Polpa de mirtilo com 9,08% de açúcar).

Desta forma, para o exemplo apresentado na Figura 7.3, verificou-se que a regressão linear obtida com a porção da curva compreendida entre 9 minutos e 184,5 minutos apresentava um coeficiente de correlação de 0,9911, considerado o melhor possível para esta

curva. Assim, o valor de  $dT/dt$  foi de 0,00051297, sendo, para este ajuste,  $T_e$  e  $t_e$  iguais a 55,59°C e 540 s, respectivamente. Conhecendo-se os demais dados, determinados ao longo do experimento e utilizando a Equação 7.3, foi determinado o  $C_p$  da amostra; cada amostra foi ensaiada em triplicata.

### 7.2.3 Validação do Experimento

Após a construção do calorímetro e determinação de sua capacidade calorífica, o experimento foi validado mediante a determinação do calor específico da água. Para isto, o procedimento descrito anteriormente foi realizado com amostras de cerca de 100 g de água destilada, em quintuplicata. Os resultados da validação do experimento podem ser observados na Tabela 7.2. O erro médio obtido nestes experimentos foi de  $-1,09 \pm 1,5\%$ , dentro da faixa de erro indicada no método.

**Tabela 7.3:** Dados de  $C_p$  da água a partir da literatura e os obtidos neste trabalho como função da temperatura para os ensaios de validação do experimento.

Temperatura (°C)	$C_p$ [Jkg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]		Erro (%)
	Literatura*	Experimental	
34,5	4178	4060,1	-2,82
33,5	4178	4131,1	-1,12
30,6	4178	4233,2	1,32
34,8	4178	4116,9	-1,46
37,0	4178	4120,2	-1,38

\* Incropera (2003).

### 7.2.4 Análise dos Dados

Os resultados foram submetidos à Análise de Variâncias e ao Teste de Diferença Limite de Significância para as médias, com um nível de significância de 5%, utilizando o *Software Statistica 7.0*. A variação do calor específico aparente das polpas com o teor de

açúcar adicionado foi ajustada segundo um modelo linear representado pela Equação 7.6, com o auxílio do *Software Statistica 7.0*.

$$C_p = a + b.C_o \quad (7.6)$$

onde  $a$  e  $b$  são os parâmetros de ajuste e  $C_o$  é o teor de açúcar [%] adicionado às polpas.

Todos os resultados (médias) dos experimentos de determinação do calor específico podem ser encontrados no Apêndice D.2.

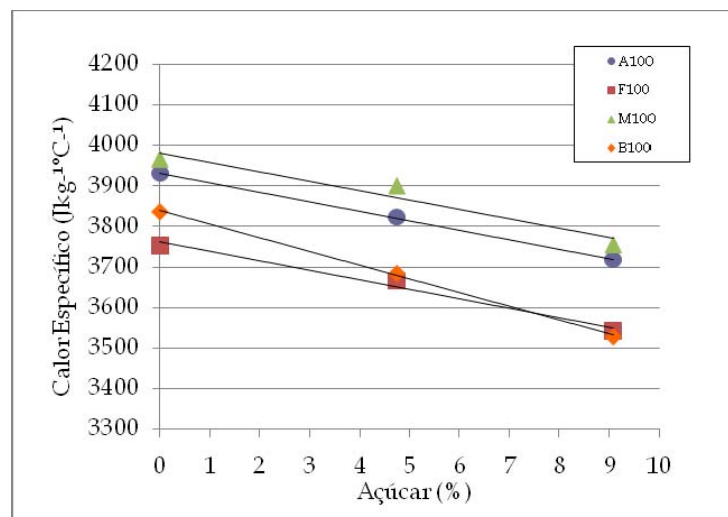
## 7.3 Resultados e Discussão

Como mencionado na seção 7.1.2, o método utilizado para a determinação do calor específico apresenta a limitação do estudo da propriedade em função da temperatura. Desta forma, o calor específico aparente das polpas foi determinado para a temperatura de 30°C (média entre a temperatura inicial da amostra -  $T_{0a}$  - e a temperatura final, no instante de equilíbrio com a água -  $T_c$ ). São apresentados, a seguir, os resultados da determinação do calor específico aparente das polpas em função do teor de açúcar adicionado.

### 7.3.1 *Variação do calor específico aparente das polpas com o teor de açúcar adicionado*

A Figura 7.4 apresenta a variação do calor específico aparente das polpas com o teor de açúcar adicionado. A partir da análise do gráfico da Figura 7.4, verifica-se que há uma diminuição do calor específico aparente das polpas com o aumento do teor de sólidos do produto. Além disso, observa-se que as polpas de morango e de amora apresentam os maiores valores para a propriedade. Isto provavelmente se deve aos seus maiores conteúdos

de umidade (conforme dados da Tabela 2.2). Como a água possui um valor de  $C_p$  superior aos sólidos, quanto mais água o produto contiver, maior será o seu calor específico.



**Figura 7.4:** Calor específico aparente das polpas em função do teor de açúcar adicionado, para a temperatura de 30°C, tendo-se como parâmetro de curva o tipo de produto.

Na Tabela 7.4 é possível visualizar os resultados do teste de comparação das médias do calor específico aparente para as diferentes polpas. Analisando os dados da Tabela 7.4, observa-se que o calor específico aparente das polpas variou significativamente com o teor de açúcar adicionado. Comparando-se as polpas dos diferentes frutos entre si, verifica-se que a polpa de framboesa sem açúcar apresentou calor específico aparente inferior ao da polpa de morango; com 5% de açúcar, os valores da propriedade para as polpas de framboesa e mirtilo são iguais entre si e diferentes das polpas dos demais frutos. Com 10% de açúcar, os calores específicos das polpas não diferem significativamente entre si.

**Tabela 7.4:** Médias do calor específico aparente das polpas em função do teor de açúcar adicionado, para a temperatura de 30°C.

Teor de Açúcar (%)	Calor Específico Aparente [J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ]			
	Framboesa	Amora	Mirtilo	Morango
0	3754,4aA*	3931,1aAB	3836,2aAB	3966,6aB
4,75	3666,3abA	3823,5bB	3684,3abA	3900,7aB
9,08	3542,2bA	3717,4cA	3528,4bA	3755,4bA

\* Letras minúsculas diferentes na mesma coluna e maiúsculas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa entre as amostras ao nível de 0,05 de significância, pelo Teste de Diferença Limite de Significância.

A fim de modelar a influência do teor de açúcar adicionado às polpas nos seus calores específicos, foi utilizado o modelo linear (Equação 7.6). A Tabela 7.5 apresenta os resultados dos parâmetros de ajuste para as diferentes polpas. Os modelos ajustados para as polpas de framboesa e morango não foram representativos. Os modelos ajustados para as polpas de amora e de mirtilo apresentaram coeficientes de correlação ( $R^2$ ) superiores a 0,99 e coeficientes de variabilidade (CV) inferiores a 0,05%, demonstrando que o modelo linear se ajustou muito bem aos dados. Estes modelos são válidos para a temperatura de 30°C e para as amostras de polpa apresentadas na Tabela 3.3. Os gráficos de Pareto, que denotam a significância dos parâmetros dos modelos, podem ser encontrados no Apêndice D.3, bem como os gráficos dos valores observados *versus* preditos. Os gráficos dos ajustes significativos estão apresentados no Apêndice D.4.

**Tabela 7.5:** Parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $R^2$  e CV para os modelos da variação do calor específico das polpas com o teor de açúcar adicionado [ $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ].

Produto	Parâmetros		$R^2$	CV[%]
	a	b		
F-100	ns*	ns	-	-
A-100	3932,45	-23,52	0,9995	0,01
B-100	3839,13	-33,87	0,9988	0,03
M-100	ns	ns	-	-

\* Parâmetro não significativo

### 7.3.2 Calor específico dos néctares

A partir dos resultados obtidos de calor específico para as polpas, decidiu-se não realizar experimentos para determinação desta propriedade para os néctares, uma vez que, com a adição de água ao produto, os valores da mesma tenderiam a se aproximar cada vez mais do calor específico da água pura.

## 7.4 Conclusão

Observou-se que os valores do calor específico aparente para as polpas de frutas, além de diminuírem com o aumento do teor de açúcar adicionado aos produtos, são muito próximos aos valores da propriedade para a água pura, já que estes alimentos possuem elevados conteúdos de umidade. Estes resultados motivaram a não determinação experimental destas propriedades para os néctares, uma vez que, com a diluição das polpas, as propriedades dos produtos tenderiam a se aproximar cada vez mais dos valores da água pura.

Foram ajustados dois modelos de predição do calor específico de polpas de amora e mirtilo em função da composição dos produtos; os modelos ajustados apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,99 e coeficientes de variabilidade inferiores a 0,05%, o que denota que os ajustes foram muito bons.

## Capítulo 8

# Condutividade Térmica

Neste capítulo são apresentados os aspectos relativos à condutividade térmica dos produtos estudados, sendo inicialmente abordados os seus conceitos e principais aplicações, a importância do seu conhecimento para a indústria, algumas das técnicas disponíveis para sua determinação e os dados já publicados na literatura para o tipo de produto em estudo. Posteriormente, são apresentados a metodologia aplicada e os resultados encontrados na estimativa da condutividade térmica dos produtos analisados.

### 8.1 Fundamentos Teóricos

A taxa na qual o calor flui por condução através de um material pode ser predita pela Lei de Fourier:

$$Q = k.A.\frac{dT}{dx} \quad (8.1)$$



onde  $Q$  é a taxa de calor [ $J s^{-1}$ ],  $A$  é a área de transferência de calor normal à direção de escoamento [ $m^2$ ],  $(dT/dx)$  é o gradiente de temperatura na direção  $x$  e a constante de proporcionalidade é a condutividade térmica  $k$  [ $W m^{-1}K^{-1}$ ]. Desta forma, a condutividade térmica de um material é a medida de sua habilidade em conduzir calor. Em alimentos, a condutividade térmica depende principalmente da composição, mas também é função dos fatores que afetam a trajetória do calor ao longo do material, tais como percentual de espaços vazios, formato, tamanho e distribuição dos espaços vazios, homogeneidade e orientação das fibras, como, por exemplo, em carnes congeladas.

Murakami e Okos (1989), citados por Rahman (1995), dividem as técnicas de determinação experimental da condutividade térmica em três grupos principais, todos eles baseados na solução da equação para condução de calor: técnicas em estado estacionário, técnicas em estado pseudo-estacionário e técnicas em regime transiente.

O método da fonte linear de aquecimento, desenvolvido por Van der Held e Van Drunen em 1949, é o mais usado para alimentos particulados, grãos, pós, líquidos e frutas inteiras e se baseia na solução da equação do Fourier de condução de calor para uma fonte linear de calor semi-infinita, homogênea e isotrópica. Na aplicação prática, um fluxo de calor constante é aplicado em uma célula cilíndrica produzindo um aumento da temperatura na mesma. A condutividade térmica é determinada em função do tempo de resposta da mudança de temperatura da amostra contida na célula.

Shamsudin *et al.* (2005) utilizaram esta técnica para a determinação da condutividade térmica em suco de goiaba e Azoubel *et al.* (2005), para suco de caju. Telis-Romero *et al.* (1998) utilizaram a técnica proposta por Bellet *et al.* (1975) na determinação das propriedades termofísicas de suco de laranja.

O método de Keepler e Boose (1970), citado por Rahman (1995), é aplicado para a determinação das propriedades termofísicas (condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico) em produtos congelados. Esta técnica é baseada no histórico de temperaturas no centro e na parede de uma célula cilíndrica de alumínio contendo a amostra, durante o seu descongelamento.

A condutividade térmica de um material pode ser estimada a partir do conhecimento

das demais propriedades termofísicas: massa específica, calor específico e difusividade térmica do material, uma vez que tais propriedades apresentam uma relação direta entre si (Equação 6.1). Este método possui o inconveniente de adicionar os erros experimentais obtidos na determinação de cada uma das propriedades e, desta forma, pode ser usado, apenas como uma maneira de se estimar a condutividade térmica de forma aproximada.

Telis-Romero *et al.* (1998) determinaram a variação da condutividade térmica de suco de laranja com a temperatura, na faixa de 0,5 a 62°C e com o conteúdo de água do produto, expresso em fração mássica, na faixa de 0,34 a 0,73. Verificaram que há um aumento da condutividade térmica do mesmo com a elevação da temperatura e com o incremento do seu teor de umidade. Azoubel *et al.* (2005) determinaram a condutividade térmica de suco de caju em função do conteúdo de sólidos solúveis no produto, na faixa de 5 a 25°Brix. Os autores observaram uma forte dependência da propriedade com o conteúdo de sólidos, mostrando a mesma tendência observada por Telis-Romero *et al.* (1998).

## 8.2 Metodologia

As condutividades térmicas das polpas com e sem açúcar foram determinadas a partir do conhecimento das demais propriedades termofísicas dos produtos, determinadas experimentalmente neste trabalho, conforme a Equação 8.2:

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot Cp \quad (8.2)$$

Para esta análise foi considerada apenas a temperatura de 30°C, uma vez que o calor específico dos produtos foi determinado somente nesta temperatura. Como a difusividade térmica foi determinada experimentalmente nas temperaturas de 25, 40, 55 e 70°C, os valores desta propriedade utilizados na estimativa do  $k$  foram obtidos a partir dos modelos ajustados, para a temperatura de 30°C, conforme apresentado na seção 6.3.1.

Vale salientar, mais uma vez, que esta estimativa é uma aproximação para os valores das condutividades térmicas dos materiais em estudo, já que, neste cálculo, os erros inerentes a cada uma das determinações experimentais se somam.

## 8.3 Resultados e Discussão

### 8.3.1 Condutividade térmica aparente das polpas

A Tabela 8.1 apresenta os valores de condutividade térmica aparente, calculados para as polpas sem adição de açúcar na temperatura de 30°C. Nesta tabela, para fins de comparação, optou-se por incluir os valores desta propriedade para alguns sucos, disponíveis na literatura, que possuem um teor de sólidos solúveis próximo ao das polpas analisadas.

**Tabela 8.1:** Condutividades térmicas,  $k$  [ $\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ ], em função do teor de sólidos solúveis (TSS) para as polpas estudadas e para outros sucos, a 30°C.

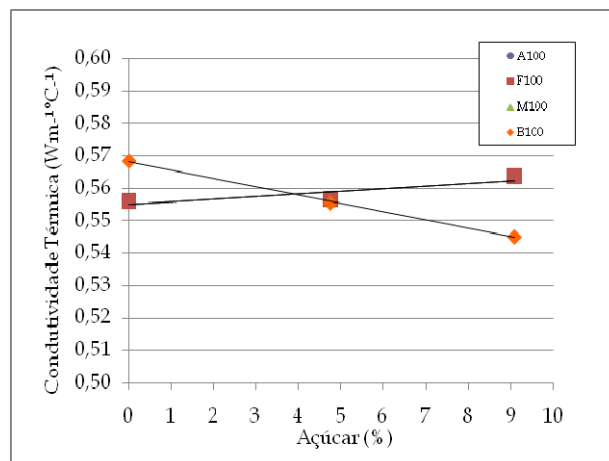
TSS [°Brix]	k	TSS [°Brix]	k	TSS [°Brix]	k	TSS [°Brix]	k
Polpa de Framboesa		Polpa de Amora		Polpa de Mirtilo		Polpa de Morango	
10,1	0,526	7,2	0,556	9,1	0,568	6,9	0,559
Suco de caju. Fonte: Azoubel <i>et al.</i> (2005)							
10,1	0,538	7,2	0,556	9,1	0,544	6,9	0,558
Suco de goiaba. Fonte: Shamsudin <i>et al.</i> (2005)							
10	0,56	-	-	-	-	-	-
Suco de maçã clarificado. Fonte: Constenla <i>et al.</i> (1989)							
10,1	0,587	7,2	0,598	9,1	0,591	6,9	0,598

Observa-se que a condutividade térmica de sucos é pouco variável com o conteúdo de sólidos solúveis, tendo seus valores compreendidos entre 0,5 e 0,6  $\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$ , dentro da faixa analisada. Além disso, verifica-se que os valores de condutividade térmica calculados

para as polpas em estudo estão próximos a valores determinados experimentalmente para outros sucos.

### 8.3.2 *Variação da condutividade térmica aparente das polpas com o teor de açúcar adicionado*

A variação da condutividade térmica aparente das polpas com o teor de açúcar adicionado pode ser observada na Figura 8.1. Ressalta-se que os valores da condutividade térmica aparente das polpas de framboesa, amora e morango estão sobrepostos no gráfico.



**Figura 8.1:** Condutividade térmica aparente das polpas em função do teor de açúcar adicionado, para a temperatura de 30°C, tendo-se como parâmetro de curva o tipo de produto.

A partir da análise da Figura 8.1, verifica-se que a condutividade térmica da polpa de mirtilo apresenta um comportamento diverso em relação às demais polpas, na faixa de concentrações estudada. As condutividades térmicas das polpas de amora, framboesa e morango são incrementadas com o aumento do teor de açúcar adicionado aos produtos. Já a condutividade térmica da polpa de mirtilo apresenta uma diminuição com o aumento do conteúdo de açúcar no produto. Este comportamento distinto pode estar relacionado com a heterogeneidade destes produtos. Como citado no início deste capítulo, e corroborado por Sweat (1995), a condutividade térmica dos materiais também é função da sua estrutura física, de forma que a porosidade do material influencia significativamente no seu comportamento.

---

Conforme apresentado na seção 4.3.4, onde foi realizada uma análise da fração de ar dispersa nas polpas em estudo, observa-se que a polpa de mirtilo apresentou um pequeno conteúdo de ar disperso em sua estrutura, diferentemente das demais polpas. Assim, este fator pode estar diretamente relacionado com o comportamento da condutividade térmica desta polpa, que se aproxima muito do comportamento apresentado por diversos autores no estudo desta propriedade em sucos de frutas, os quais são, naturalmente, materiais não porosos.

## 8.4 Conclusão

Foi possível estimar o valor da condutividade térmica dos produtos estudados a partir do conhecimento das demais propriedades físicas, fazendo-se o uso da Equação 6.1. Esta estimativa foi uma aproximação para os valores das condutividades térmicas dos materiais em estudo, já que, neste cálculo, os erros inerentes a cada uma das determinações experimentais se somam.

Observou-se que os valores da condutividade térmica estimados para as polpas de frutas estudadas são muito próximos aos valores da propriedade para outros sucos disponíveis na literatura.

## Capítulo 9

# Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros

A determinação das propriedades de alimentos é imprescindível para o engenheiro conhecer os mecanismos responsáveis pelo comportamento dos alimentos quando sujeitos ao processamento e, desta forma, seja capaz de projetar e otimizar as etapas envolvidas no processo. A determinação das propriedades de engenharia demanda muita atenção e cuidado nos procedimentos experimentais uma vez que, para que sejam obtidos resultados corretos, há a necessidade de se realizar um rigoroso controle nas temperaturas de ambientação das amostras, os sensores de temperatura devem ser aferidos com muita precisão e as metodologias experimentais devem ser aplicadas com zelo.

Os objetivos deste trabalho foram alcançados, uma vez que foi possível estudar o comportamento de algumas propriedades físicas de néctares e polpas de pequenos frutos, nas condições de processamento.

Com este trabalho, disponibilizam-se à literatura muitas informações de projeto de processos produtivos de polpas e néctares de morango, amora, framboesa e mirtilo. Por fim, salienta-se que mais estudos são necessários para o completo entendimento de como se

processam as variações das propriedades destes produtos, uma vez que a literatura é carente em tais informações. Desta forma, são sugeridos a seguir, temas de estudo que podem dar continuidade a este trabalho.

- Determinação da variação das propriedades termofísicas de polpas de pequenos frutos nas temperaturas abaixo do ponto de congelamento dos produtos, uma vez que uma das formas mais empregadas industrialmente para a sua conservação é o congelamento.
- Determinação da difusividade térmica e do calor específico das polpas de frutas desaeradas.
- Avaliação da influência do estágio de maturação dos frutos utilizados na elaboração de polpas e néctares de pequenos frutos em sua condutividade elétrica.
- Determinação experimental da variação da condutividade térmica com a temperatura e com a composição, das polpas de frutas com e sem ar disperso em sua estrutura.

---

## Referências Bibliográficas

ABUDAGGA, Y.; KOLBE, E. Thermophysical Properties of Surimi Paste at Cooking Temperature. *Journal of Food Engineering*, v. 32, p. 315-337, 1997.

ANTUNES, L. E. C. Amora-preta: nova opção de cultivo no Brasil. *Ciência Rural*, v.32, n.1, p. 151-158, 2002.

ARAÚJO, P. F.; RODRIGUES, R. S.; DUARTE, A. P. Qualidade de polpa de pêssego preservada por métodos combinados. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 1, n. 2, p. 8-16, 200?.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. Washington: AOAC, 1990.

AZOUBEL, P. M.; CIPRIANI, D. C.; EL-AOUAR, A. A.; ANTONIO, G. C.; MURR, F. E. X. Effect of concentration on the physical properties of cashew juice. *Journal of Food Engineering*, v. 66, p. 413-417, 2005.

BAÏRI, A.; LARAQI, N.; GARCÍA DE MARÍA, J.M. Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. *Journal of Food Engineering*, v.78, p. 669-675, 2007.

BAYINDIRLI, L. Density and viscosity of grape juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Processing & Preservation*, v. 17, p. 147-151, 1993.

BERBARI, S. A. G.; NOGUEIRA, J. N.; CAMPOS, S. D. S. Efeito de diferentes tratamentos pré-congelamento sobre a qualidade do morango var. Chandler congelado. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 18, 1998. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=s0101\\_20611998000100018&ing=en&nrm=isso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0101_20611998000100018&ing=en&nrm=isso)> Acesso em 18 de junho de 2008.

BRASIL. Lei 8.918, de 14 de julho de 1994. Dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/consultaLegislacao.do?operacao=visualizar&id=212>> Acesso em 10 mar. 2008.



BRASIL. Instrução Normativa 1, de 07 de janeiro de 2000. Aprova o Regulamento Técnico Geral para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para Polpa de Fruta. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/consultaLegislacao.do?operacao=visualizar&id=7777>> Acesso em 10 mar. 2008.

BRASIL. Instrução Normativa 12, de 04 de setembro de 2003. Aprova o Regulamento Técnico para Fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade Gerais para Suco Tropical; os Padrões de Identidade e Qualidade dos Sucos Tropicais de Abacaxi, Acerola, Cajá, Caju, Goiaba, Graviola, Mamão, Manga, Mangaba, Maracujá e Pitanga; e os Padrões de Identidade e Qualidade dos Néctares de Abacaxi, Acerola, Cajá, Caju, Goiaba, Graviola, Mamão, Manga, Maracujá, Pêssego e Pitanga. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://extranet.agricultura.gov.br/sislegis-consulta/consultaLegislacao.do?operacao=visualizar&id=2831>> Acesso em 10 mar. 2008.

CASTILLANO, R. F. F. Fisiologia e Manejo na Colheita e Pós-Colheita de Morangos. In: Palestras do 2º Simpósio Nacional do Morango e 1º Encontro de Pequenas Frutas e Frutas Nativas do Mercosul. *Anais*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004.

CASTRO, I.; TEIXEIRA, J. A.; SALENGKE, S.; SATRY, S. K.; VICENTE, A. A. The influence of field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products. *Journal of Food Process Engineering*, v. 26, p. 17-29, 2003.

CASTRO, I.; TEIXEIRA, J. A.; SALENGKE, S.; SATRY, S. K.; VICENTE, A. A. Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 5, p. 27-36, 2004.

CEPEDA, E.; VILLARÁN, M. C. Density and viscosity of *Malus floribunda* juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, v. 41, p. 103-107, 1999.

CONSTENLA, D. T.; LOZANO, J. E.; CRAPISTE, G. H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Science*, v. 54, p. 663-668, 1989.

COSTA, M. C.; MAIA, G. A.; FILHO, M. S. M. S.; FIGUEIREDO, R. W.; NASSU, R. T.; MONTEIRO, J. C. S. Conservação de Polpa de Cupuaçu [*Theobroma grandiflorum* (Willd. Ex Spreng.) Schum] por métodos combinados. *Revista brasileira de Fruticultura*, v. 25, n. 2, p. 213-215, 2003.

DICKERSON, R.W. An apparatus for measurements of Thermal Diffusivity of Foods, *Food Technology*, v. 19, n. 5, 198-204, 1965.

DINIZ, E.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Atividade de água e condutividade elétrica de polpas de acerola concentradas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.1, p. 9-17, 2003.

FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R.; BATAGLIA, O. C.; HIROCE, R.; GALLO, J. R. Composição mineral de diversas hortaliças. *Bragantia*, v. 37, n°5, p. 33-44, 1978.

GONÇALVES, E. D.; MALGARIM, M. B.; TREVISAN, R.; ANTUNES, L. E. C.; CASTILLANO, R. F. F. Conservação pós-colheita de Amora-preta. In: 2º Simpósio Nacional

do Morango e 1º Encontro de Pequenas Frutas e Frutas Nativas do Mercosul. *Anais*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004.

HWANG, M. P.; HAYAKAWA, K. A specific heat calorimeter for foods. *Journal of Food Science*, v. 44, n. 2, p. 435-438 e 448, 1979.

IBARZ, A.; MIGUELSANZ, R. Variation with temperature and soluble solids concentration of the density of a depectinised and clarified pear juice. *Journal of Food Engineering*, v. 10, p. 319-323, 1989.

ICIER, F.; ILICALI, C. Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*, v. 38, p. 1135-1142, 2005.

ICIER, F.; YILDIZ, H.; BAYSAL, T. Peroxidase inactivation and colour changes during ohmic blanching of pea puree. *Journal of Food Engineering*, v. 74, p. 424-429, 2006.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

ITALBRAZ. Disponível em: <<http://www.italbraz.com.br>> Acesso em 18 de junho de 2008.

JARAMILLO-FLORES, M. E.; HERNANDEZ-SANCHEZ, H. Thermal diffusivity of soursop (*Annona muricata* L.) pulp. *Journal of Food Engineering*, v.46, p. 139-143, 2000.

KOTECHA, P. M.; MADHAVI, D. L. Berries. In: SALUNKHE, D. K.; KADAM, S. S. *Handbook of Fruit Science and Technology – Production, Composition, Storage and Processing*, New York: Marcel Dekker, 1995.

LEGRAND A.; LEULIET, J. C.; DUQUESNE, S.; KESTELOOT, R.; WINTERTON, P.; FILLAUDEAU, L. Physical, mechanical, thermal and electrical properties of cooked red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for continuous ohmic heating process. *Journal of Food Engineering*, v.81, p. 447-458, 2007.

LEWICKI, P. P. Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering*, v. 61, p. 483-495, 2004.

LIMA, E. D. P. A.; LIMA, C. A. A. L.; ALDRIGUE, M. L.; GONDIM, P. J. S. Caracterização física e química dos frutos da Umbu-cajazeira (*Spondia spp*) em cinco estádios de maturação, da polpa congelada e néctar. *Revista brasileira de Fruticultura*, v. 24, n. 2, p.-338-343, 2002.

LIMA, I. J. E.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa de umbu. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, especial, n. 1, p. 31-42, 2003.

MACHADO, N. P.; FRANCHINI, E. R.; RISTOW, N. C.; COUTINHO, E.; CASTILLANO, F. R. F.; MALGARIM, M. B. Conservação Pós-colheita de Mirtilos `Florida`, `Woodard` e `Bluegem` em Atmosfera com oxigênio ionizado. In: 2º Simpósio Nacional do Morango e 1º Encontro de Pequenas Frutas e Frutas Nativas do Mercosul. *Anais*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004.

- MAEDA, R. N.; PANTOJA, L.; YUYAMA, L. K. O.; CHAAR, J. M. Determinação da formulação e caracterização do néctar de camu-camu (*Myrciaria dúbia McVaugh*). *Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, v. 26, n. 1, p. 70-74, 2006.
- MALACRITA, C. R.; MOTTA, S. Antocianinas em suco de uva: composição e estabilidade. *Boletim do CEPPA*, v. 24, n. 1, p. 59-82, 2006.
- MALGARIN, M. B.; GONÇALVES, E. D.; TREVISAN, R.; RISTOW, N. C.; CASTILLANO, F. R. F.; ANTUNES, L. E. C. Efeito do filme de polietileno e do resveratrol na conservação pós-colheita de amor-preta. In: 2° Simpósio Nacional do Morango e 1° Encontro de Pequenas Frutas e Frutas Nativas do Mercosul. *Anais*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004.
- MANOHAR, B.; RAMAKRISHNA, P.; UDAYSANKAR, K. Some physical properties of tamarind (*Tamarindus indica* L.) juice concentrates. *Journal of Food Engineering*, v. 13, p. 241-258, 1991.
- MATTIETTO, R. A.; LOPES, A. S.; MENEZES, H. C. Estabilidade do néctar misto de cajá e umbu. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 27, n. 3, p. 456-463, 2007.
- MIN, S.; SASTRY, S. K.; BALASUBRAMANIAM, V.M. In situ electrical conductivity measurement of select liquid foods under hydrostatic pressure to 800MPa. *Journal of Food Engineering*, v.82, p. 489-497, 2007.
- MOLINE, S. W.; SAWDY, J. A.; SHORT, A. J.; RINFRET, A. P. Thermal properties of foods at low temperatures. I. Specific Heat. *Food Technology*, p. 228-231, 1961.
- MONTEIRO, S. *Fruta para beber*. Frutas e Derivados, n.1, 2006.
- MOURA, S. C. S. R. Estudo da atividade de água e da condutividade elétrica em sucos concentrados de frutas tropicais. *Dissertação de mestrado*. Campinas: UNICAMP, 1998, 106p.
- MOURA, S. C. S. R.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, A. M. C. B. Propriedades termofísicas de soluções modelo similares a sucos – parte I. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 23, n. 1, p. 62-68, 2003.
- MOURA, S. C. S. R.; VITALI, A. A.; HUBINGER, M. D. A study of water activity and electrical conductivity in fruit juices: Influence of temperature and concentration. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 2, p. 31-38, 1999.
- NINO, A. F. P.; SILVA, F. O. X.; GOMES, J. C. C.; RASEIRA, M. C. B.; NICKEL, O. *Sistemas de Produção 9*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007.
- PAGOT, E.; HOFFMAN, A. Produção de pequenas frutas no Brasil. In: 1° Seminário Brasileiro Sobre Pequenas Frutas. *Anais...* Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, p. 7-15, 2003.
- PEREIRA, B. *Processamento agrega valor*. Frutas e Derivados, n.3, 2006.
- PEREIRA, E. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Massa específica de polpa de açaí em função do teor de sólidos e da temperatura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 3, p. 526-530, 2002.

- POLTRONIERI, E. Alternativas para o Mercado interno de frutas. In: 1º Seminário Brasileiro Sobre Pequenas Frutas. *Anais*. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2003.
- RAHMAN, S. *Food properties Handbook*. New York: CRC Press, 1995, 500p.
- RAMOS, A. M.; IBARZ, A. Density of juice and fruit puree as a function of soluble solids content and temperature. *Journal of Food Engineering*, v. 35, p. 57-63, 1998.
- RASEIRA, M. C. B.; GONÇALVES, E. D.; TREVISAN, R.; ANTUNES, L. E. C. *Aspectos Técnicos da cultura da framboeseira*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004.
- RISTOW, N. C.; FRANCHINI, E. R.; COUTINHO, E.; CASTILLANO, F. R. F.; MACHADO, N. P.; MALGARIM, M. B. Avaliação de Refrigeração com Oxigênio ionizado na Conservação Pós-Colheita de Mirtilo cv. Florida. In: 2º Simpósio Nacional do Morango e 1º Encontro de Pequenas Frutas e Frutas Nativas do Mercosul. *Anais*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004.
- SAKIYAMA, T., AKUTSU, M.; MIYAWAKI, O.; YANO, T. Effective thermal diffusivity of food gels impregnated with air bubbles. *Journal of Food Engineering*, v. 39, p. 323 - 328, 1999.
- SALGADO, J. M. O emprego da amora, framboesa, mirtilo e morango na redução do risco de doenças. In: 1º Seminário Brasileiro Sobre Pequenas Frutas. *Anais*. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2003.
- SARANG, E.; SASTRY, S. K.; KNIPE, L. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, v.87, p. 351-356, 2008.
- SARAVACOS, G.D.; KOSTAROPOULOS, A. E. Engineering properties in food processing simulation. *Computers chem. Engineering*, v. 20, p. 461-466, 1996.
- SHAMSUDIN, R.; MOHAMED, I. O.; YAMAN, N. K. M. Thermophysical properties of Thai seedless guava juice as affected by temperature and concentration. *Journal of Food Engineering*, v. 66, p. 395-399, 2005.
- SILVA, C. A. B. *Produção de Polpa de Fruta tratada Termicamente e Congelada*. Brasília: Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, 1995.
- SIMARELLI, M. *Frutas do Brasil*. Frutas e Derivados, n.1, 2006.
- SINGH, R. P. Thermal diffusivity in food processing. *Food Technology*, v. 36, p. 87-91, 1982.
- SOBOLÍK, V.; ZITNÝ, R.; TOUCIGRECKO, V.; DELGADO, M.; ALLAF, K. Viscosity and electrical conductivity of concentrated solutions of soluble coffee. *Journal of Food Engineering*, v. 51, p. 93-98, 2002.
- SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. *Engineering Properties of Foods*. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1995.
- TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; YAMASHITAH, F. Thermophysical Properties of Brazilian Orange Juice as Affected by Temperature and Water Content. *Journal of Food Engineering*, v. 38, p. 27-40, 1998.

TORALLES, R. P.; VENDRUSCOLO, J. L. S. Processamento do purê e néctar de pêssego. *Comunicado Técnico 159*, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007.

TOURNAS, V. H.; KATSOUDAS, E. Mould and yeast flora in fresh berries, grapes and citrus fruits. *International Journal of Food Microbiology*, v. 105, p. 11-17, 2005.

TSILINGIRIS, P. T. Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100°C. *Journal of Food Engineering*, v. 49, p. 1098-1110, 2008.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Departamento de Alimentos e Nutrição Experimental/BRASILFOODS. *Tabela de Composição de Alimentos – USP*, Versão 4.1, 1998. Disponível em: <<http://www.fcf.usp.br/tabela>> Acesso em 18 de junho de 2008.

URBICAIN, M. J.; LOZANO, J. E. Thermal and Rheological Properties of Foodstuffs. In: VALENTAS, K. J.; ROTSTEIN, E.; SINGH, R. P. *Handbook of Food Engineering Practice*. New York: CRC Press, 1997.

VENDRUSCOLO, J. L. S. Processamento de morangos e demais pequenas frutas. In: Palestras do 2º Simpósio Nacional do Morango e 1º Encontro de Pequenas Frutas e Frutas Nativas do Mercosul. *Anais*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004.

VENDRUSCOLO, J. L. S.; VENDRUSCOLO, C. T. *Sistemas de Produção 5*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005.

VIEIRA, J. A. G.; CARTAPATTI-STUCHI, G. A. S. Efeito do tamanho das partículas e da tensão aplicada sobre a condutividade elétrica e o tempo de descongelamento do suco de manga. *Sitientibus*, v. 35, p. 99-109, 2006.

ZAINAL, B. S.; RAHMAN, R. A.; ARI, A. B.; SAARI, B.N.; ASBI, B.A. Effects of temperature on the physical properties of pink guava juice at two different concentrations. *Journal of Food Engineering*, v. 43, p. 55-59, 2000.

ZURITZ, C.A.; MUNÔZ PUNTES, E.; MATHEY, H. H.; PÉREZ, E. H.; GASCÓN, A.; RUBIO, L. A.; CARULLO, C. A.; CHERNIKOFF, R. E.; CABEZA, M. S. Density, viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures. *Journal of Food Engineering*, v. 71, p. 143-149, 2005.

## Anexo A

# Correlações para Massa Específica de Sucos e Polpas

As Tabelas AA.1, AA.2 e AA.3 apresentam as principais correlações empíricas disponíveis na literatura para a determinação da variação da massa específica de uma série de sucos e polpas de frutas em função da temperatura ( $T$ ) e, em alguns casos, em função da concentração de sólidos solúveis do suco ( $B$ ).

Tabela AA.1: Correlações para predição da massa específica de sucos, publicadas até 1993.

Produto	Faixa de Aplicação	Equação [kg m <sup>-3</sup> ]	R <sup>2</sup>	Referência
Suco de tomate	NI*	$\rho = \rho_w X_w + \rho_s X_s, \text{ onde}$ $\rho_w = 999,89 - 0,060334.T - 0,003671T^2$ $\rho_s = 1469,3 + 0,54667.T - 0,0069646T^2$	NI	Choi e Okos (1983) <sup>2</sup>
Suco de maçã clarificado	20°C<T<80°C 12<B<68,5°Brix	$\rho = 0,8278 + 0,34708 \exp(0,01B) - 5,479 \times 10^{-4}.T$	0,9978	Constenla et al. (1989)
Suco de pêra clarificado	5°C<T<70°C 10<B<71°Brix	$\rho = 1,0113 - 5,4764.e^{-4T} + 3,713e^{-3B} + 1,744.e^{-5B^2}$	0,9997	Ibarz e Miguelsanz (1989)
Suco de Abacaxi	NI	$\rho = 1059 - 0,343.T + 1,509 \times 10^{-3}T^2 - 4,143 \times 10^{-5}T^3$	NI	Alvarado e Romero (1989) <sup>2</sup>
Suco de tamarindo	298K<T<343K 7<B<62°Brix	$d = 1,00 + 4,092 \times 10^{-3}.X_s + 3,136 \times 10^{-5} X_s^2$ <p>A equação proposta fornece a densidade do suco.</p>	0,9990	Manohar et al. (1991)
Suco de cereja	NI, T[K]	$\rho = 0,79 + 0,35 \exp(0,0108B) - 5,41 \times 10^{-4}.T$	NI	Bayindirli e Ozsan (1992) <sup>1</sup>
Suco de maçã	NI, T[K]	$\rho = 0,83 + 0,35 \exp(0,01B) - 5,64 \times 10^{-4}.T$	NI	Bayindirli e Ozsan (1992) <sup>1</sup>
Suco de uva	293K<T<353K 16,2<B<35°Brix	$\rho = 0,74 + 0,43 \exp(0,01B) - 5,55 \times 10^{-4}.T$	0,9973	Bayindirli (1993)

<sup>1</sup> Citados por Urbicain e Lozano (1997)<sup>2</sup> Citados por Araújo et al. (2007)

\*NI - não informado

Tabela AA.2: Correlações para predição da massa específica de sucos, publicadas após 1993.

Produto	Faixa de Aplicação	Equação [kg m <sup>-3</sup> ]	R <sup>2</sup>	Referência
Suco de laranja	0,5°C<T<62°C 0,34<X <sub>w</sub> <0,73	$\rho = 1428,5 - 454,9.X_w - 0,231.T$	>0,97	Telis-Romero et al. (1998)
Suco de pêssego clarificado	5°C<T<70°C 10<B<60°Brix	$\rho = 1006,56 - 0,5155.T + 4,1951.B + 0,0135.B^2$	0,9990	Ramos e Ibarz (1998)
Sucos de maçã turvo e clarificado	T=25°C 18<B<70°Brix	$\rho = 0,9671 + 0,0054.B$	0,9949	Cepeda e Villarán (1999)
Suco de goiaba rosa	65°C<T<85°C B=9°Brix B=11°Brix	$\rho = 1047 - 0,5293.T$ $\rho = 1047,9 - 0,45.T$	0,8312 0,8979	Zainal et al. (2000)
Suco de caju clarificado	T=30°C 5,5<B<25°Brix	$\rho = 0,99562 + 0,00412.B$ [g/cm <sup>3</sup> ]	0,9960	Azoubel et al. (2005)
Suco de goiaba sem semente	30°C<T<80°C 10<B<40°Brix	Os autores propõem o uso da correlação de Ramos e Ibarz (1998)	NI*	Shamsudin et al. (2005)
Suco de uva	20°C<T<80°C 22,9<B<70,6°Brix	$\rho = 2,0816.x10^3 - 9,4737.T + 3,9796.B + 2,8793.x10^{-2}.T^2 + 1,3724.x10^{-2}.B^2$	0,9993	Zuritz et al. (2005)

\*NI - não informado



Tabela AA.3: Correlações para predição da massa específica de polpas de fruta.

Produto	Faixa de Aplicação	Equação [kg m <sup>-3</sup> ]	R <sup>2</sup>	Referência
Sucos e polpas de 30 diferentes frutos	T>0°C B>30°Brix	$\rho = (1002 + 4,61B) - 0,46.T + 7,001 \times 10^{-3} T^2 + -9,175 \times 10^{-6} T^3$	NI*	Alvarado e Romero (1989) <sup>1</sup>
Polpa de manga	NI	$\rho = 1087 - 1,064.T + 21,877 \times 10^{-3} T^2 - 26,160 \times 10^{-5} T^3$	NI	Alvarado e Romero (1989) <sup>2</sup>
Purê de maçã	0°C<T<80°C B=12,3°Brix	$\rho = 1056,53 - 0,3610.T$	0,9940	Ramos e Ibarz (1998)
Purê de marmelo	0°C<T<80°C B=12,3°Brix	$\rho = 1063,69 - 0,6773.T$	0,9930	Ramos e Ibarz (1998)
Polpa de açaí	10°C<T<50°C 3<B<8°Brix	$\rho = 1068,65 - 0,4579.X_w - 0,3867.T$	0,9778	Pereira et al. (2002)
Polpa integral de cupuaçu	10°C<T<50°C B=12°Brix B=9°Brix	$\rho = 1039,8 - 0,46.T$	0,9842	Araújo et al. (200?)
		$\rho = 1049,3 - 1,067.T$	0,9991	
Polpa de umbu	20°C<T<40°C B=10°Brix	$\rho = 1073,89 - 0,5392.T$	0,9874	Lima et al. (2003)
	B=20°Brix	$\rho = 1105,48 - 0,4122.T$	0,9666	
	B=30°Brix	$\rho = 1169,85 - 0,4942.T$	0,9850	

<sup>1</sup> Citados por Urbicain e Lozano (1997)<sup>2</sup> Citados por Araújo et al. (200?)

\*NI - não informado

## Anexo B

# Correlações para Condutividade Elétrica de Frutos, Sucos e Polpas

As Tabelas BB.1 e BB.2 apresentam as principais correlações empíricas disponíveis na literatura para a determinação da variação da condutividade elétrica de uma série de frutos, sucos e polpas de frutas em função da temperatura ( $T$ ) e, em alguns casos, em função da concentração de sólidos solúveis do suco ( $B$ ).

**Tabela BB.1:** Correlações para predição da condutividade elétrica de frutos.

Produto	Faixa de Aplicação	Unidade	Equação	R <sup>2</sup>	Referência
Maçã golden	30<T<140°C	S.m <sup>-1</sup>	$ke = 0,049.T + 0,089$	0,9900	Sarang et al. (2008)
Maçã vermelha	30<T<140°C	S.m <sup>-1</sup>	$ke = 0,057.T + 0,079$	0,9900	Sarang et al. (2008)
Pêssego	30<T<140°C	S.m <sup>-1</sup>	$ke = 0,056.T + 0,179$	0,9900	Sarang et al. (2008)
Pêra	30<T<140°C	S.m <sup>-1</sup>	$ke = 0,041.T + 0,124$	0,9700	Sarang et al. (2008)
Abacaxi	30<T<140°C	S.m <sup>-1</sup>	$ke = 0,060.T + 0,076$	0,9900	Sarang et al. (2008)
Morango	30<T<140°C	S.m <sup>-1</sup>	$ke = 0,041.T + 0,234$	0,9900	Sarang et al. (2008)

**Tabela BB.2:** Correlações para predição da condutividade elétrica de sucos e polpas.

Produto	Faixa de Aplicação	Unidade	Equação	R <sup>2</sup>	Referência
Suco de tangerina	293<T<353K 10<B<45°Brix	mS.cm <sup>-1</sup>	$ke = 4,42303.B^{1,3141} \cdot \exp(-12,64 \cdot \exp(-0,0082.B)/RT)$ **	0,9912	Moura et al. (1999)
Suco de abacaxi	293<T<353K 10<B<45°Brix	mS.cm <sup>-1</sup>	$ke = 2,56776.B^{1,4493} \cdot \exp(-12,06 \cdot \exp(-0,0095.B)/RT)$	0,9903	Moura et al. (1999)
Suco de limão	293<T<353K 10<B<45°Brix	mS.cm <sup>-1</sup>	$ke = 2,9567.B^{1,4763} \cdot \exp(-11,51 \cdot \exp(-0,0105.B)/RT)$	0,9664	Moura et al. (1999)
Polpa de morango	5<T<65°C B=14,5°Brix B= 26,5°Brix	S.cm <sup>-1</sup>	$ke = 3E - 07.T^2 + 3E - 5.T + 0,0017$	0,9990	Castro et al. (2003)
			$ke = 3E - 07.T^2 + 7E - 5.T + 0,0012$	0,9990	
Polpa de pêssego	30<T<60°C 20<Eg* < 70Vcm <sup>-1</sup> <sub>1</sub> B=9,9°Brix	S.m <sup>-1</sup>	$ke = 0,0096.T + 0,2711$	0,922	Icier e Ilicali (2005)
Polpa de damasco	25<T<60°C 20<Eg < 70Vcm <sup>-1</sup> B=12,8°Brix	S.m <sup>-1</sup>	$ke = 0,0160.T + 0,3040$	0,925	Icier e Ilicali (2005)

\*Eg - gradiente de voltagem aplicado no reator ôhmico

\*\*R - constante dos gases ideais [kJ gmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

## Anexo C

# Correlações para Calor Específico de Sucos e Polpas

A Tabela CC.1 apresenta as principais correlações empíricas disponíveis na literatura para a predição do calor específico de sucos e polpas de frutas em função da temperatura ( $T$ ) em alguns casos, e/ou em função do conteúdo de umidade do suco ou polpa.

**Tabela CC.1:** Correlações para predição do calor específico à pressão constante de sucos e polpas.

Produto	Faixa de Aplicação	Unidade	Equação	R <sup>2</sup>	Referência
Sucos de frutas	$X_w > 0,5$	$\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$	$cp = 1674,7 + 25,12 X_w$	NI*	Dickerson (1968) <sup>1</sup>
Suco de maçã clarificado	$20^\circ\text{C} < T < 80^\circ\text{C}$ $12 < B < 68,5^\circ\text{Brix}$	$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$cp = 0,80380 - 4,3416 \times 10^{-3} \cdot B + 5,6063 \times 10^{-4} \cdot T$	0,9900	Constenla et al. (1989)
Polpas de frutas em geral	$20 < T < 40^\circ\text{C}$ $0,012 < X_w < 0,945$	$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$cp = 1,56[\exp(0,9446 X_w)]$	NI	Alvarado (1991) <sup>1</sup>
Suco de tamarindo	$308 < T < 338\text{K}$ $20,19 > X_s > 62,70$	$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$cp = 4,18 + (-5,03 \times 10^{-2} + 6,839 \times 10^{-5} \cdot T) X_s$	0,993	Manohar et al. (1991)
Suco de laranja	$0,5 < T < 62^\circ\text{C}$ $0,34 < X_w < 0,73$	$\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$	$cp = 1424,34 + 2673,19 \cdot X_w + 2,446 \cdot T$	>0,97	Telis-Romero et al. (1998)
Suco de goiaba rosa	$65 < T < 85^\circ\text{C}$ $B = 9^\circ\text{Brix}$ $B = 11^\circ\text{Brix}$	$\text{Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$	$cp = 3366,1 + 25536 \cdot T$ $cp = 3473,2 + 0,807 \cdot T$	0,9484 0,9596	Zainal et al. (2000)

\*NI - não informado

1- Citado por Rahman (1995)

## Apêndice A

### Dados complementares – Massa específica

#### A.1 Volumes Reais dos Picnômetros

Os volumes reais dos picnômetros, determinados a partir da calibração dos mesmos, são apresentados a seguir.

**Tabela A.1:** Volumes reais dos picnômetros.

Picnômetros Código	Massa vazio [g]	Volume real [mL]					
		30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
2	20,5487	22,9381	22,9657	22,9806	22,9493	22,9746	22,9534
3	16,3190	24,8148	24,8439	24,8304	24,8599	24,8266	24,8293
4	16,5461	24,7518	24,7797	24,7954	24,7851	24,7900	24,7624
6	16,5323	24,6305	24,6874	24,6897	24,7046	24,6856	24,6724
7	17,0707	24,1046	24,0933	24,1430	24,1454	24,1411	24,1093
8	15,6822	25,3571	25,3709	25,3698	25,3847	25,3846	25,3515
9	16,0468	25,0162	25,1021	25,0403	25,0602	25,0438	24,9990
10	28,3609	26,2415	26,2870	26,2821	26,2872	26,2549	26,2326
20	25,7137	27,5057	27,5415	27,5347	27,5575	27,5095	27,4622
40	28,6564	27,2885	27,3204	27,3198	27,3160	27,3055	27,2829
60	27,2197	28,0603	28,1172	28,1415	28,1395	28,0837	28,0837
70	28,3328	27,2872	27,3307	27,3554	27,3309	27,2891	27,2710

## A.2 Resultados da determinação da massa específica das polpas

Os resultados experimentais (médias e desvios padrão) são apresentados nas Tabelas A.2 e A.3.

Tabela A.2: Massa específica aparente das polpas.

Variáveis			Massa Específica aparente [kgm <sup>-3</sup> ]							
Polpa [%]	Açúcar [%]	T [°C]	Mirtilo		Amora		Framboesa		Morango	
100	0	30	1040,2	±1,2	988,5	±4,6	972,0	±2,5	952,6	±0,9
100	0	40	1036,3	±2,1	984,0	±2,2	971,4	±9,5	946,4	±1,6
100	0	50	1031,1	±2,4	981,5	±2,3	963,1	±9,9	941,1	±11,8
100	0	60	1023,7	±2,2	959,7	±1,7	946,1	±9,1	912,7	±2,2
100	0	70	1013,3	±0,4	938,6	±3,5	920,9	±8,6	878,8	±4,6
100	0	80	998,0	±2,1	912,4	±5,9	880,7	±14,2	826,7	±1,2
100	4,75	30	1054,4	±0,6	1020,9	±2,7	1014,7	±4,2	990,1	±0,8
100	4,75	40	1047,8	±3,3	1012,9	±1,2	1007,5	±2,8	980,7	±2,3
100	4,75	50	1035,0	±2,5	1000,9	±2,0	995,1	±4,0	968,6	±3,1
100	4,75	60	1030,2	±5,2	989,2	±2,2	986,1	±1,7	950,4	±2,9
100	4,75	70	1015,7	±1,3	977,1	±6,8	961,9	±7,8	927,5	±1,2
100	4,75	80	1002,0	±3,8	944,9	±5,4	922,6	±4,0	872,5	±3,4
100	9,08	30	1091,0	±0,6	1042,0	±3,0	1025,2	±5,1	1002,5	±6,2
100	9,08	40	1083,9	±1,5	1036,3	±3,6	1021,0	±2,8	994,7	±0,7
100	9,08	50	1077,4	±1,1	1022,1	±2,9	1012,5	±0,8	985,8	±2,0
100	9,08	60	1065,6	±2,1	1010,7	±2,2	1000,8	±4,9	968,5	±0,9
100	9,08	70	1058,0	±2,9	991,4	±4,0	981,1	±1,5	939,9	±7,5
100	9,08	80	1044,6	±3,7	960,6	±2,7	948,7	±1,5	884,0	±3,2

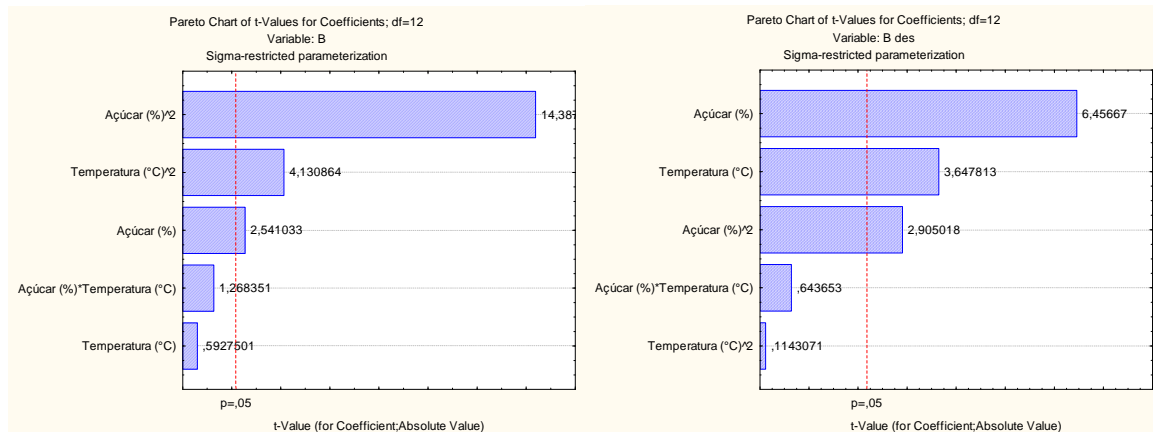
Tabela A.3: Massa específica das polpas desaeradas.

Variáveis			Massa Específica [kgm <sup>-3</sup> ]							
Polpa [%]	Açúcar [%]	T [°C]	Mirtilo des		Amora des		Framboesa des		Morango des	
100	0	30	1063,1	±2,7	1044,0	±2,2	1057,7	±4,1	1031,1	±2,3
100	0	40	1058,9	±0,5	1038,7	±0,6	1051,9	±4,3	1025,6	±0,6
100	0	50	1054,6	±0,4	1034,5	±1,7	1046,7	±3,3	1019,6	±0,3
100	0	60	1048,1	±2,9	1027,8	±1,5	1042,7	±2,6	1015,6	±2,2
100	0	70	1044,9	±2,0	1026,0	±0,9	1035,4	±2,4	1011,1	±1,2
100	0	80	1036,7	±0,6	1019,1	±2,4	1028,4	±1,9	1005,0	±1,5
100	4,75	30	1076,5	±2,7	1060,1	±1,6	1074,0	±0,6	1048,8	±4,6
100	4,75	40	1071,4	±1,1	1054,6	±3,2	1069,7	±2,6	1046,6	±0,5
100	4,75	50	1067,3	±10,2	1049,5	±1,9	1064,5	±0,5	1041,5	±0,2
100	4,75	60	1062,1	±1,8	1042,8	±2,6	1059,0	±1,4	1038,8	±2,6
100	4,75	70	1056,0	±2,8	1039,2	±1,1	1054,0	±0,8	1032,5	±2,2
100	4,75	80	1054,6	±4,2	1033,1	±2,5	1049,7	±4,5	1031,9	±1,5
100	9,08	30	1094,9	±1,4	1081,8	±2,5	1091,5	±3,2	1070,6	±3,5
100	9,08	40	1088,3	±2,3	1075,2	±3,3	1085,8	±0,5	1064,4	±0,3
100	9,08	50	1084,0	±0,9	1070,9	±0,4	1081,9	±2,0	1060,8	±1,9
100	9,08	60	1077,1	±2,0	1066,8	±2,5	1076,0	±1,3	1056,9	±1,5
100	9,08	70	1072,3	±1,4	1059,5	±0,5	1070,4	±0,7	1048,7	±2,0
100	9,08	80	1067,6	±3,1	1056,1	±3,7	1060,5	±1,0	1044,4	±3,2



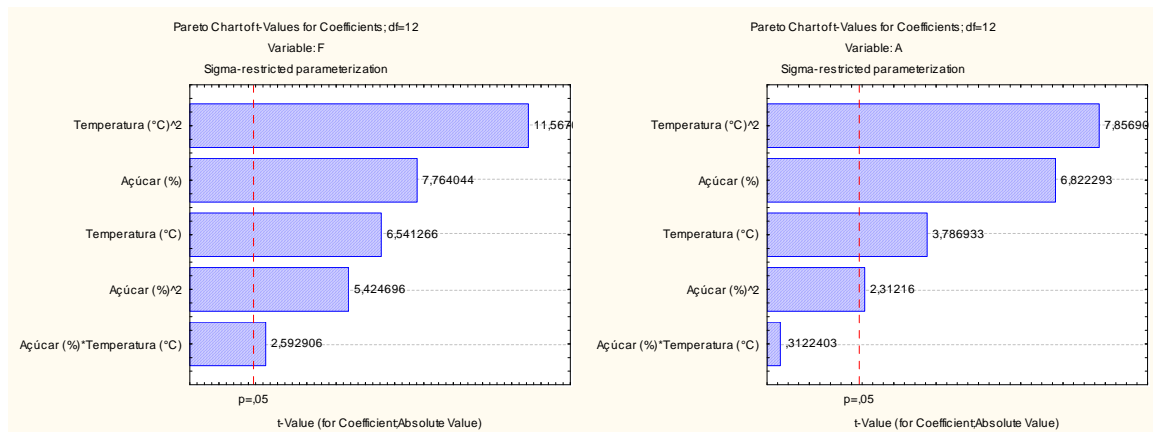
### A.3 Gráficos estatísticos

A seguir, são apresentados os gráficos de Pareto para os ajustes dos modelos de regressão múltipla das polpas e das polpas desaeradas, que informam se cada um dos parâmetros ajustados é significativo ou não.



(a)

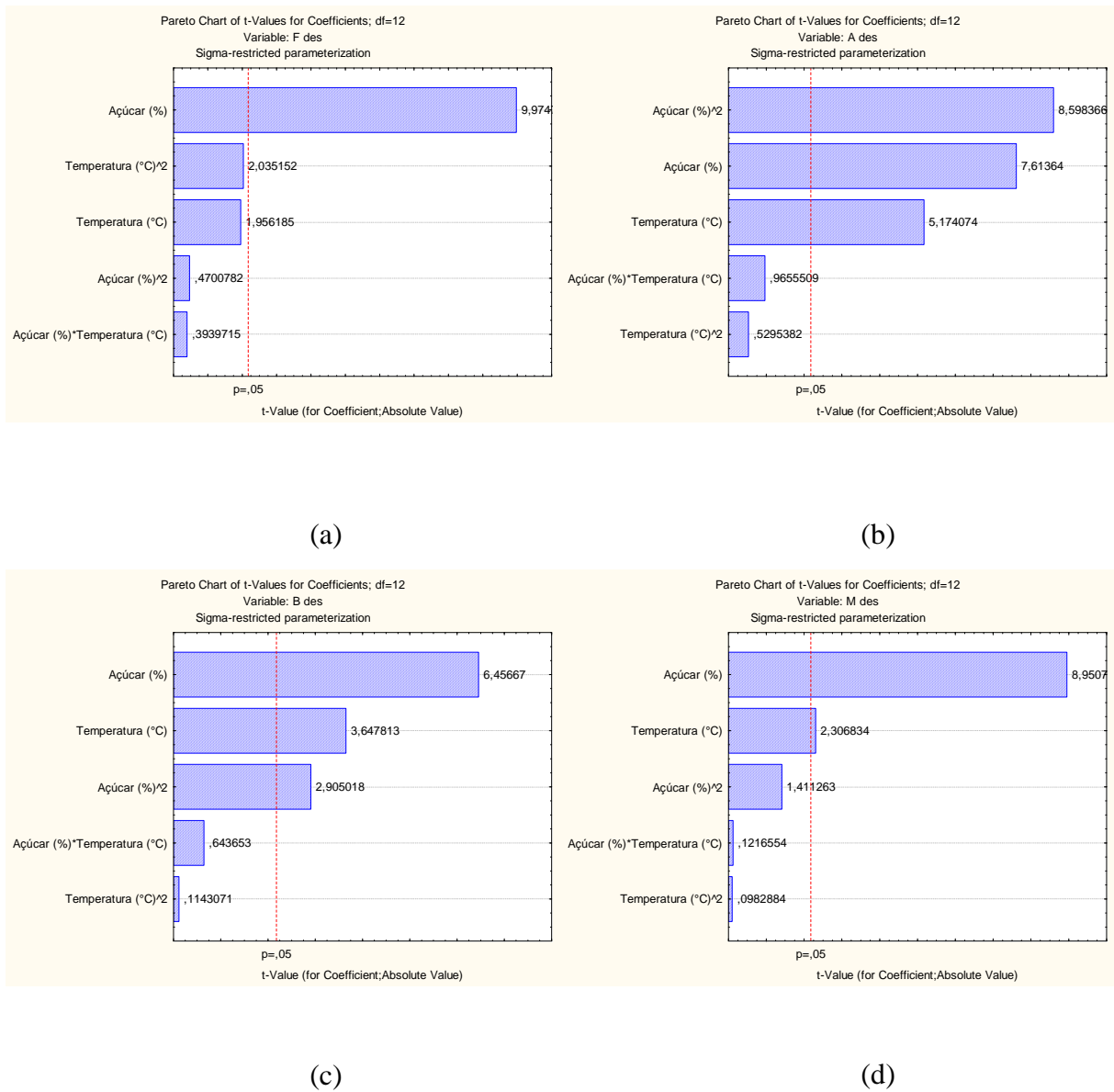
(b)



(c)

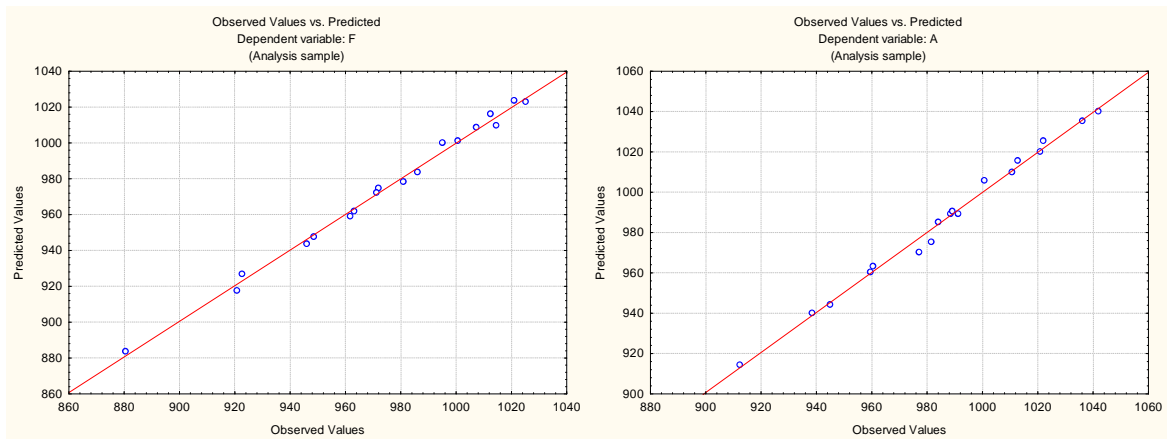
(d)

**Figura A.1:** Gráficos de significâncias dos parâmetros dos modelos de regressão múltipla, para a predição da massa específica das polpas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango



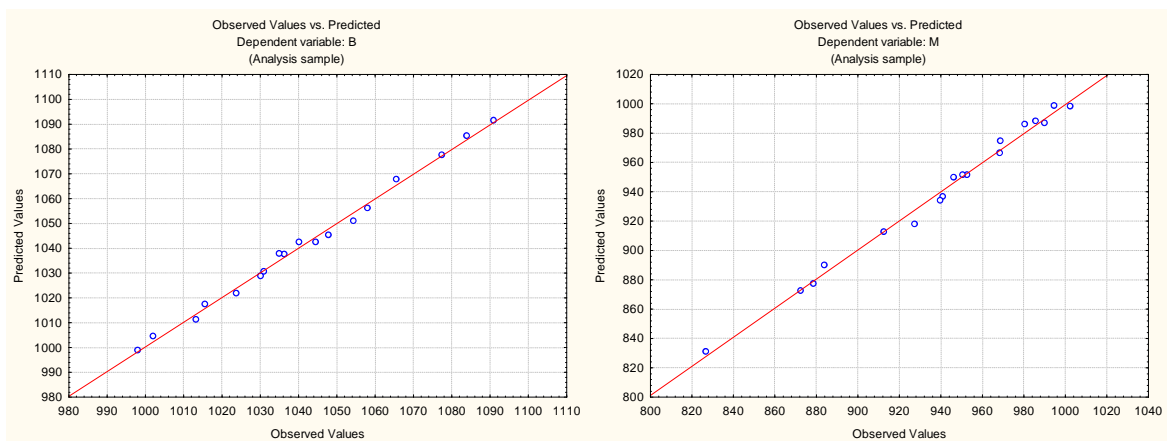
**Figura A.2:** Gráficos de significâncias dos parâmetros dos modelos de regressão múltipla, para a predição da massa específica das polpas desaeradas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango

As próximas figuras apresentam os gráficos que relacionam os valores preditos pelos modelos ajustados e os valores observados experimentalmente.



(a)

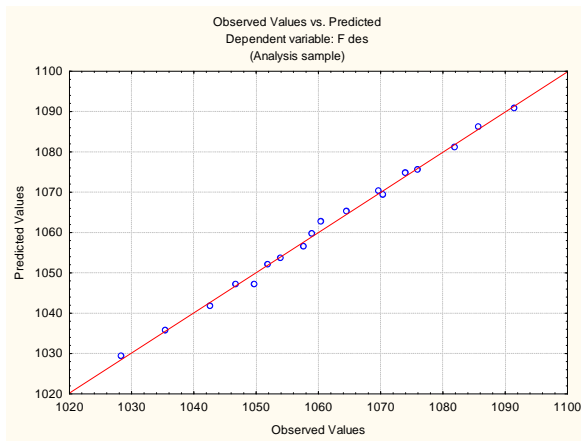
(b)



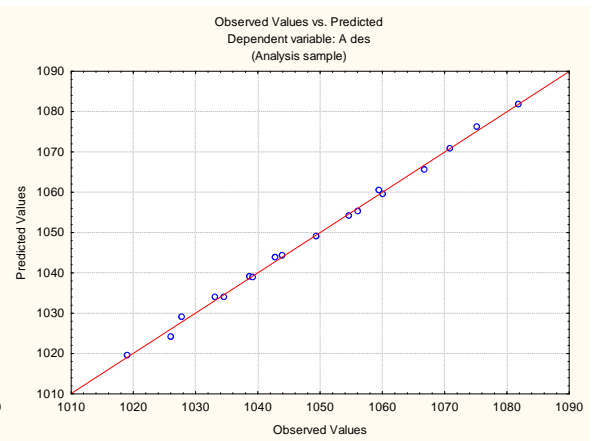
(c)

(d)

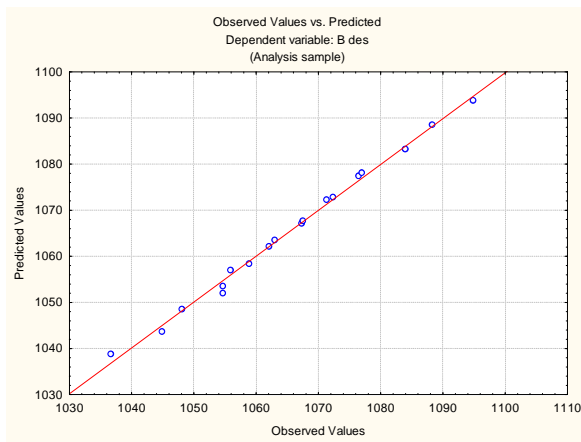
**Figura A.3:** Relação entre valores observados *vs* preditos pelos modelos de regressão múltipla para predição da massa específica de polpas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango



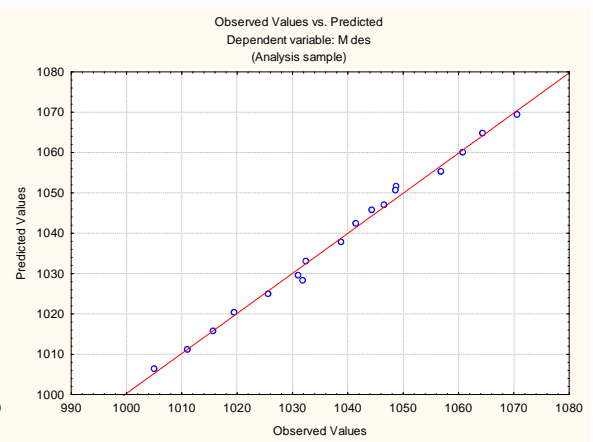
(a)



(b)



(c)

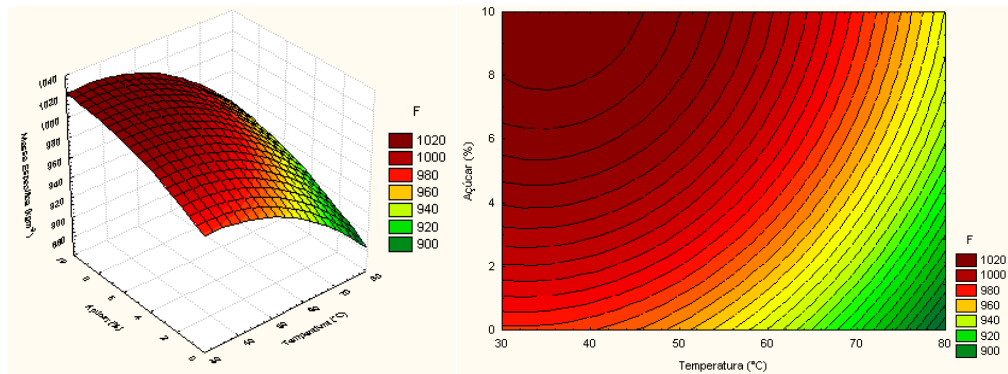


(d)

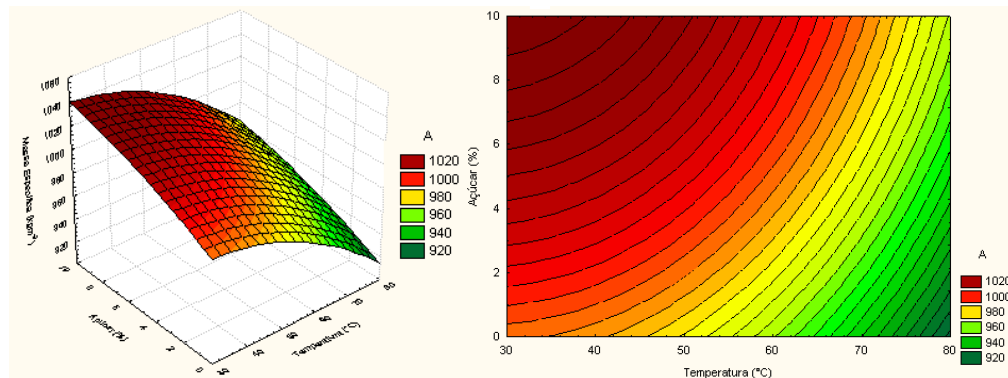
**Figura A.4:** Relação entre valores observados *vs* preditos pelos modelos de regressão múltipla para predição da massa específica de polpas desaeradas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango

## **A.4 Superfícies de Resposta e Curvas de Contorno**

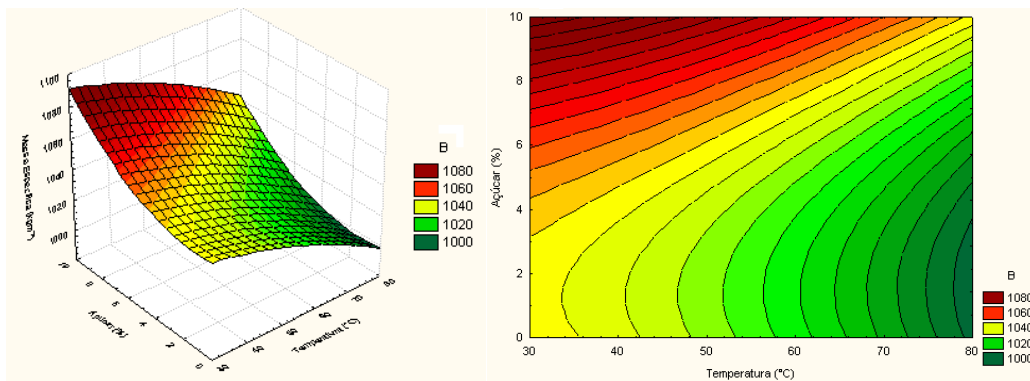
As Figuras A.5 e A.6 apresentam as superfícies de resposta e as curvas de contorno para os modelos de regressão múltipla ajustados para a variação da massa específica das polpas e das polpas desaeradas com a temperatura e com o teor de açúcar adicionado.



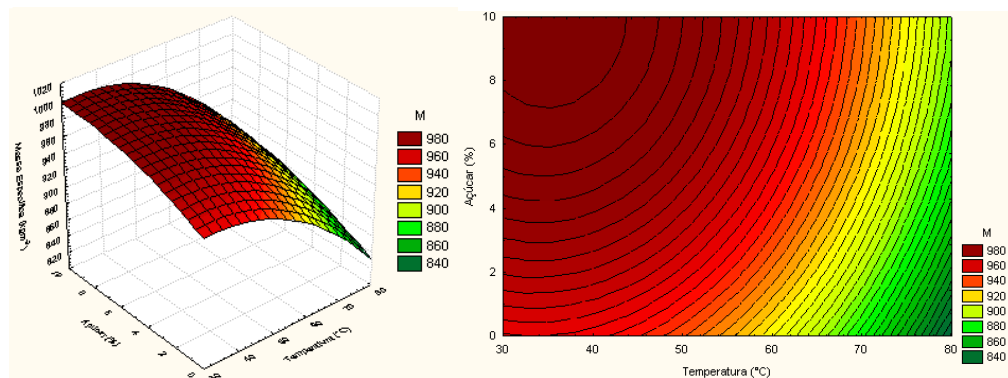
(a)



(b)

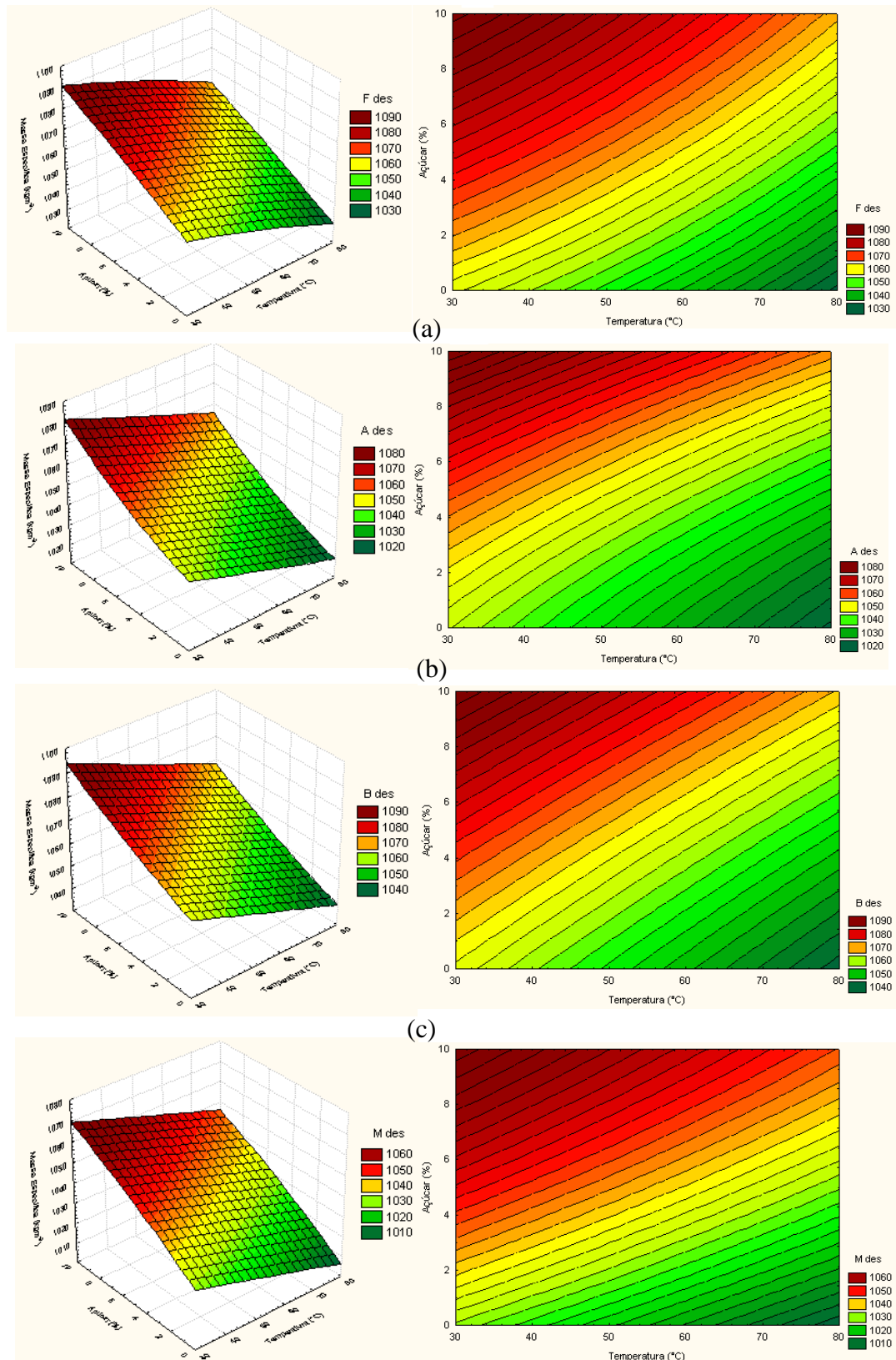


(c)



(d)

Figura A.5: Massa específica aparente das polpas em função da temperatura e do teor de açúcar; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.



(d)  
**Figura A.6:** Massa específica das polpas desaeradas em função da temperatura e do teor de açúcar adicionado; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.

## Apêndice B

### Dados complementares – Condutividade Elétrica

#### B.1 Resultados da determinação da condutividade elétrica das polpas e dos néctares

Os resultados experimentais (médias e desvios padrão) são apresentados nas Tabelas B.2, B.3 e B.4.

Tabela B.1: Condutividades elétricas das polpas.

Variáveis			Condutividade Elétrica [mScm <sup>-1</sup> ]							
Polpa [%]	Açúcar [%]	T [°C]	Mirtilo		Amora		Framboesa		Morango	
100	0	30	1,70	±0,12	3,32	±0,29	3,41	±0,17	3,59	±0,06
100	0	40	2,04	±0,01	4,31	±0,07	4,42	±0,07	4,38	±0,08
100	0	50	2,43	±0,32	5,27	±0,88	5,18	±0,78	5,23	±0,71
100	0	60	2,72	±0,15	5,85	±0,24	6,12	±0,12	5,94	±0,10
100	0	70	3,12	±0,07	6,67	±0,08	6,62	±0,23	7,13	±0,12
100	0	80	3,50	±0,04	7,50	±0,03	7,37	±0,20	7,61	±0,26
100	4,75	30	1,41	±0,11	3,12	±0,05	3,02	±0,11	3,28	±0,02
100	4,75	40	1,78	±0,03	3,70	±0,16	3,74	±0,11	4,00	±0,01
100	4,75	50	2,16	±0,06	4,55	±0,17	4,33	±0,09	4,74	±0,03
100	4,75	60	2,45	±0,02	5,20	±0,32	5,02	±0,08	5,38	±0,06
100	4,75	70	2,86	±0,07	5,94	±0,11	5,47	±0,11	6,11	±0,09
100	4,75	80	3,12	±0,03	6,73	±0,19	6,26	±0,24	6,70	±0,14
100	9,08	30	1,35	±0,05	2,80	±0,02	2,43	±0,05	2,88	±0,04
100	9,08	40	1,59	±0,01	3,40	±0,07	3,21	±0,03	3,57	±0,01
100	9,08	50	1,92	±0,04	4,06	±0,07	3,80	±0,07	4,26	±0,05
100	9,08	60	2,18	±0,08	4,50	±0,37	4,40	±0,15	4,90	±0,07
100	9,08	70	2,40	±0,10	5,16	±0,19	4,99	±0,11	5,49	±0,18
100	9,08	80	2,86	±0,02	5,77	±0,25	5,54	±0,15	6,06	±0,20



**Tabela B.2:** Condutividades elétricas dos néctares com 75 e 50% de polpa.

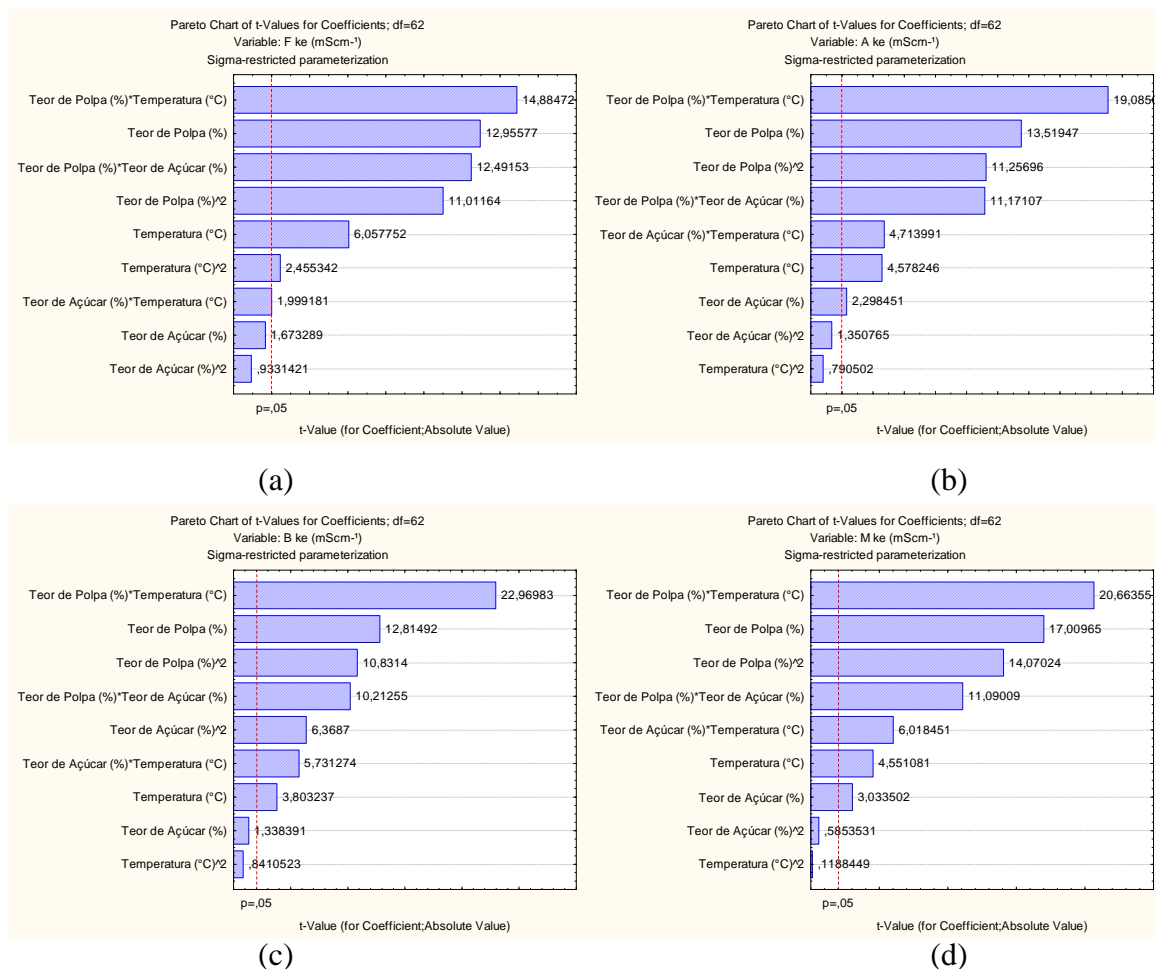
Variáveis			Condutividade Elétrica [mScm <sup>-1</sup> ]							
Polpa [%]	Açúcar [%]	T [°C]	Mirtilo		Amora		Framboesa		Morango	
75	0	30	1,41	±0,03	3,02	±0,13	3,00	±0,08	3,19	±0,02
75	0	40	1,72	±0,03	3,63	±0,18	3,79	±0,11	3,86	±0,02
75	0	50	2,03	±0,03	4,56	±0,16	4,46	±0,09	4,49	±0,03
75	0	60	2,33	±0,06	5,22	±0,20	5,16	±0,20	5,28	±0,02
75	0	70	2,71	±0,03	5,71	±0,09	5,66	±0,13	6,00	±0,03
75	0	80	3,02	±0,03	6,26	±0,13	6,08	±0,14	6,67	±0,11
75	5	30	1,27	±0,01	2,52	±0,07	2,42	±0,10	2,70	±0,04
75	5	40	1,51	±0,03	3,27	±0,10	3,31	±0,06	3,37	±0,03
75	5	50	1,76	±0,02	3,95	±0,07	4,02	±0,11	4,03	±0,04
75	5	60	2,07	±0,02	4,41	±0,11	4,69	±0,13	4,60	±0,10
75	5	70	2,32	±0,01	5,31	±0,14	5,16	±0,06	5,20	±0,04
75	5	80	2,58	±0,02	5,86	±0,15	5,73	±0,17	5,80	±0,04
75	10	30	1,20	±0,03	2,24	±0,06	2,06	±0,03	2,40	±0,02
75	10	40	1,45	±0,02	2,87	±0,04	2,65	±0,04	3,02	±0,02
75	10	50	1,70	±0,02	3,47	±0,02	3,34	±0,07	3,62	±0,01
75	10	60	1,98	±0,01	3,89	±0,03	4,18	±0,16	4,15	±0,04
75	10	70	2,27	±0,02	4,54	±0,06	4,84	±0,09	4,68	±0,03
75	10	80	2,52	±0,04	5,32	±0,19	5,25	±0,18	5,27	±0,11
50	0	30	1,21	±0,02	2,28	±0,04	2,43	±0,05	2,41	±0,00
50	0	40	1,46	±0,01	2,79	±0,04	3,08	±0,02	2,94	±0,04
50	0	50	1,65	±0,02	3,45	±0,08	3,58	±0,05	3,45	±0,04
50	0	60	1,94	±0,02	4,05	±0,01	4,05	±0,25	4,09	±0,10
50	0	70	2,18	±0,02	4,39	±0,11	4,61	±0,02	4,59	±0,02
50	0	80	2,42	±0,02	4,89	±0,05	5,15	±0,12	5,11	±0,02
50	5	30	1,03	±0,04	2,09	±0,04	2,28	±0,06	2,19	±0,01
50	5	40	1,26	±0,03	2,50	±0,05	2,81	±0,09	2,63	±0,03
50	5	50	1,44	±0,03	3,07	±0,03	3,23	±0,06	3,18	±0,01
50	5	60	1,68	±0,01	3,60	±0,08	3,72	±0,12	3,73	±0,04
50	5	70	1,89	±0,01	4,02	±0,05	4,16	±0,16	4,26	±0,04
50	5	80	2,07	±0,02	4,58	±0,11	4,73	±0,03	4,78	±0,05
50	10	30	0,99	±0,01	1,86	±0,05	1,96	±0,03	1,95	±0,01
50	10	40	1,17	±0,01	2,35	±0,02	2,46	±0,01	2,40	±0,01
50	10	50	1,39	±0,03	2,87	±0,07	2,98	±0,04	2,88	±0,02
50	10	60	1,63	±0,02	3,32	±0,11	3,52	±0,02	3,38	±0,02
50	10	70	1,82	±0,01	3,75	±0,03	3,98	±0,10	3,89	±0,02
50	10	80	2,01	±0,03	4,19	±0,02	4,34	±0,07	4,34	±0,02

**Tabela B.3:** Condutividades elétricas dos néctares com 25% de polpa.

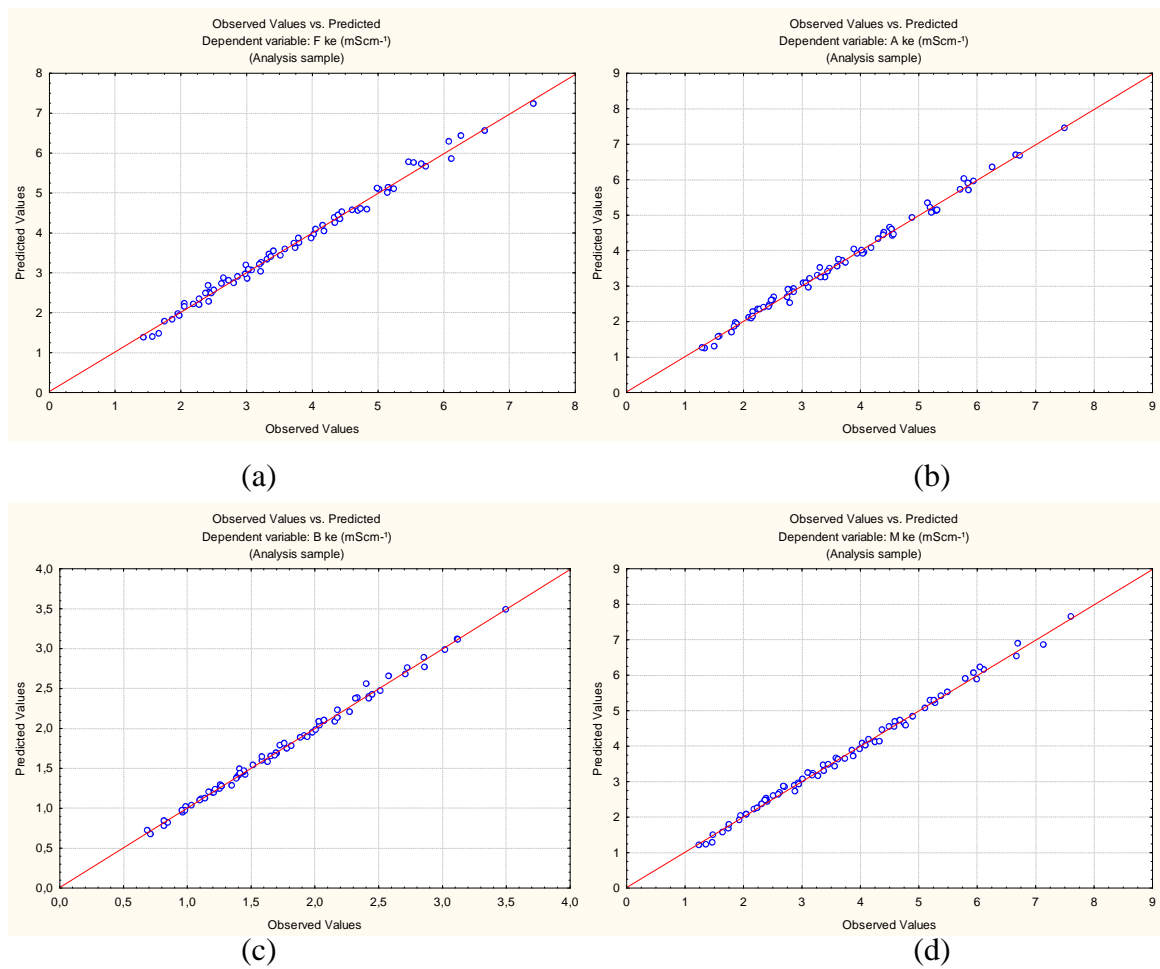
Variáveis			Condutividade Elétrica [ $\text{mScm}^{-1}$ ]							
Polpa [%]	Açúcar [%]	T [°C]	Mirtilo		Amora		Framboesa		Morango	
25	0	30	0,817	$\pm 0,003$	1,50	$\pm 0,03$	1,66	$\pm 0,04$	1,47	$\pm 0,01$
25	0	40	0,966	$\pm 0,003$	1,80	$\pm 0,02$	1,98	$\pm 0,01$	1,74	$\pm 0,01$
25	0	50	1,11	$\pm 0,01$	2,14	$\pm 0,01$	2,28	$\pm 0,03$	2,05	$\pm 0,02$
25	0	60	1,26	$\pm 0,03$	2,44	$\pm 0,04$	2,63	$\pm 0,02$	2,37	$\pm 0,02$
25	0	70	1,44	$\pm 0,01$	2,79	$\pm 0,04$	3,03	$\pm 0,01$	2,69	$\pm 0,04$
25	0	80	1,59	$\pm 0,02$	3,13	$\pm 0,04$	3,38	$\pm 0,01$	3,11	$\pm 0,04$
25	5	30	0,71	$\pm 0,01$	1,34	$\pm 0,00$	1,57	$\pm 0,01$	1,36	$\pm 0,02$
25	5	40	0,85	$\pm 0,01$	1,59	$\pm 0,03$	1,87	$\pm 0,02$	1,64	$\pm 0,01$
25	5	50	0,98	$\pm 0,01$	1,88	$\pm 0,01$	2,19	$\pm 0,01$	1,93	$\pm 0,01$
25	5	60	1,14	$\pm 0,00$	2,16	$\pm 0,04$	2,51	$\pm 0,02$	2,24	$\pm 0,01$
25	5	70	1,27	$\pm 0,01$	2,47	$\pm 0,01$	2,87	$\pm 0,04$	2,51	$\pm 0,02$
25	5	80	1,42	$\pm 0,01$	2,76	$\pm 0,03$	3,19	$\pm 0,01$	2,95	$\pm 0,03$
25	10	30	0,67	$\pm 0,01$	1,30	$\pm 0,01$	1,43	$\pm 0,03$	1,24	$\pm 0,00$
25	10	40	0,82	$\pm 0,00$	1,57	$\pm 0,02$	1,75	$\pm 0,01$	1,48	$\pm 0,01$
25	10	50	0,96	$\pm 0,00$	1,85	$\pm 0,02$	2,06	$\pm 0,03$	1,75	$\pm 0,01$
25	10	60	1,10	$\pm 0,01$	2,16	$\pm 0,01$	2,38	$\pm 0,01$	2,05	$\pm 0,01$
25	10	70	1,22	$\pm 0,02$	2,44	$\pm 0,04$	2,73	$\pm 0,05$	2,32	$\pm 0,01$
25	10	80	1,38	$\pm 0,01$	2,75	$\pm 0,05$	3,03	$\pm 0,04$	2,60	$\pm 0,00$

## B.2 Gráficos estatísticos

A seguir (Figuras B.1 e B.2), são apresentados os gráficos de Pareto para os ajustes dos modelos de regressão múltipla da condutividade elétrica das polpas e dos néctares, que informam se cada um dos parâmetros ajustados é significativo ou não. Também são apresentados os gráficos que relacionam os valores preditos pelos modelos ajustados e os valores observados experimentalmente.



**Figura B.1:** Gráficos de significâncias dos parâmetros dos modelos de regressão múltipla, para a predição da condutividade elétrica dos néctares, em função da temperatura, do teor de açúcar adicionado, e do teor de polpa cujos parâmetros são apresentados na Tabela 5.6; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.



**Figura B.2:** Relação entre valores observados *vs* preditos pelos modelos de regressão múltipla, para a predição da condutividade elétrica dos néctares, em função da temperatura, do teor de açúcar adicionado e do teor de polpa, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 5.5; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.

## Apêndice C

### Dados complementares – Difusividade Térmica

#### C.1 Calibração dos sensores de temperatura

Os sensores de temperatura (termopares tipo T) foram calibrados no mesmo banho termostático utilizado para os experimentos (banho de medição), utilizando como referência um termômetro de mercúrio com precisão de 0,5°C. Para cada sensor de temperatura foi ajustada uma equação de correção, ou seja, um modelo linear que relaciona a temperatura medida pelo sensor e a temperatura real da amostra. Assim, a temperatura indicada por cada sensor era corrigida mediante o uso da respectiva equação de correção. Os modelos ajustados podem ser observados na Tabela C.1.

**Tabela C.1:** Equações de correção da temperatura dos termopares tipo T.

Sensor	Local de uso	Equação [°C]	R <sup>2</sup>
1	Célula de difusividade térmica	$T_{real} = (1,125076882 * T_{sensor}) - 2,164870816$	0,99985
2	Célula de difusividade térmica	$T_{real} = (1,12702236 * T_{sensor}) - 1,747662013$	0,99981
3	Banho de medição (medição de T <sub>e</sub> )	$T_{real} = (1,123878288 * T_{sensor}) - 1,011673096$	0,99980
4	Célula de difusividade térmica	$T_{real} = (1,123878288 * T_{sensor}) - 1,011673096$	0,99984
5	Célula de difusividade térmica	$T_{real} = (1,130165615 * T_{sensor}) - 3,011553535$	0,99980
6	Célula de difusividade térmica	$T_{real} = (1,127669861 * T_{sensor}) - 2,833326695$	0,99982
7	Calorímetro	$T_{real} = (1,126646578 * T_{sensor}) - 2,990948186$	0,99986

## C.2 Resultados da determinação da difusividade térmica de água, aditivada com 0,3% de goma xantana

Os resultados experimentais (médias e desvios padrão), bem como os valores da difusividade térmica da água disponíveis na literatura (INCROPERA, 2003) são apresentados na Tabela C.2.

Tabela C.2: Difusividade térmica da água.

Temperatura [°C]	Difusividade Térmica [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]		
	Experimental		Literatura
22,9	1,46E-07	± 2,50E-09	1,45E-07
24,7	1,46E-07	± 1,90E-09	1,47E-07
30,1	1,47E-07	± 2,63E-09	1,49E-07
35,4	1,50E-07	± 2,09E-09	1,51E-07
40,7	1,53E-07	± 3,08E-09	1,53E-07
45,5	1,55E-07	± 2,18E-09	1,55E-07
50,7	1,56E-07	± 1,89E-09	1,56E-07
55,0	1,55E-07	± 2,08E-09	1,58E-07
59,7	1,58E-07	± 2,37E-09	1,60E-07
64,3	1,61E-07	± 1,99E-09	1,61E-07
69,4	1,62E-07	± 3,73E-09	1,63E-07

### C.3 Resultados da determinação da difusividade térmica aparente das polpas

Os resultados experimentais (médias e desvios padrão) são apresentados nas Tabelas C.3 e C.4.

**Tabela C.3:** Difusividades térmicas das polpas de framboesa e amora.

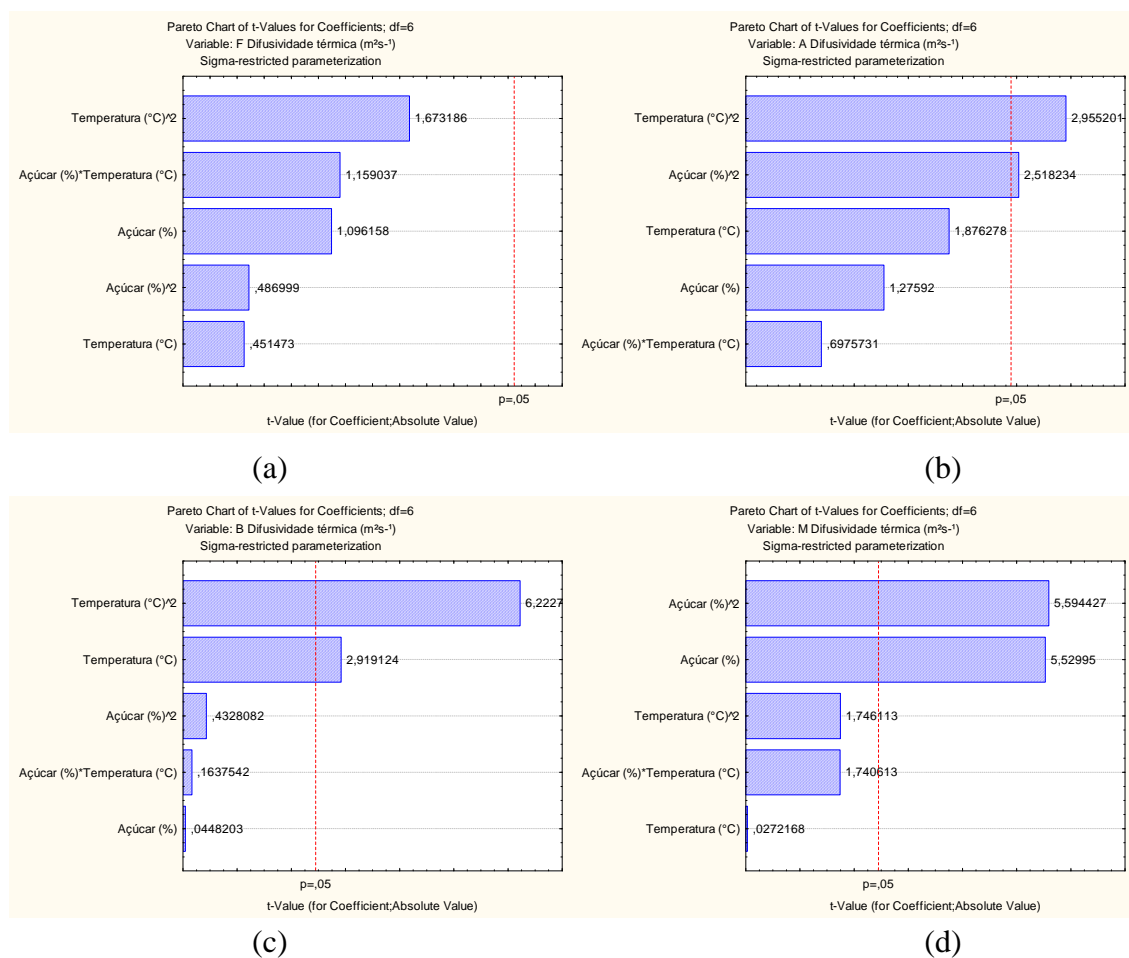
Açúcar [%]	Framboesa				Amora			
	T[°C]		$\alpha$ [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]		T[°C]		$\alpha$ [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	
0	25,6	±0,4	1,43E-07	±4,8E-09	24,4	±0,3	1,41E-07	±7,1E-09
0	40,7	±1,4	1,47E-07	±4,9E-09	40,1	±0,3	1,47E-07	±7,3E-09
0	55,6	±1,0	1,50E-07	±3,6E-09	54,2	±0,6	1,48E-07	±2,3E-09
0	69,8	±0,0	1,65E-07	±6,0E-09	69,3	±0,6	1,60E-07	±2,7E-08
4,75	25,5	±0,2	1,42E-07	±4,3E-09	24,5	±0,5	1,43E-07	±1,1E-08
4,75	40,1	±0,2	1,46E-07	±5,2E-09	39,5	±1,4	1,42E-07	±3,7E-09
4,75	54,6	±0,3	1,52E-07	±1,2E-08	53,5	±0,4	1,44E-07	±1,6E-08
4,75	71,2	±2,0	1,61E-07	±3,5E-08	68,2	±0,4	1,52E-07	±2,0E-08
9,08	24,4	±0,4	1,37E-07	±1,9E-09	24,3	±0,8	1,47E-07	±3,1E-09
9,08	39,3	±0,7	1,48E-07	±2,9E-08	39,9	±0,9	1,43E-07	±9,6E-09
9,08	54,2	±0,7	1,52E-07	±9,9E-09	53,3	±0,5	1,52E-07	±1,2E-08
9,08	67,7	±1,7	1,64E-07	±2,4E-09	68,4	±0,7	1,60E-07	±1,9E-08

**Tabela C.4:** Difusividades térmicas das polpas de mirtilo e morango.

Açúcar [%]	Mirtilo				Morango			
	T[°C]		$\alpha$ [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]		T[°C]		$\alpha$ [m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	
0	25,7	±0,5	1,40E-07	±3,8E-09	24,7	±0,6	1,45E-07	±1,1E-08
0	40,9	±0,3	1,49E-07	±9,2E-09	40,4	±0,5	1,54E-07	±5,8E-09
0	53,0	±0,6	1,53E-07	±4,3E-09	54,7	±0,1	1,59E-07	±7,9E-09
0	68,9	±0,8	1,72E-07	±4,0E-08	70,5	±2,4	1,71E-07	±4,7E-08
4,75	23,0	±0,5	1,40E-07	±3,1E-09	24,3	±0,5	1,37E-07	±7,3E-09
4,75	39,6	±0,7	1,47E-07	±6,3E-09	35,9	±7,9	1,39E-07	±6,1E-09
4,75	54,4	±0,7	1,54E-07	±1,3E-08	53,5	±0,4	1,48E-07	±1,3E-10
4,75	68,4	±1,0	1,73E-07	±1,5E-08	68,0	±1,0	1,63E-07	±2,1E-08
9,08	23,3	±0,4	1,40E-07	±6,3E-09	24,2	±0,4	1,40E-07	±6,5E-09
9,08	40,0	±1,0	1,44E-07	±7,9E-09	40,6	±0,6	1,48E-07	±2,6E-09
9,08	54,1	±1,0	1,54E-07	±1,2E-08	54,1	±0,4	1,62E-07	±5,2E-08
9,08	68,1	±0,6	1,71E-07	±3,2E-08	68,8	±0,4	1,70E-07	±3,7E-08

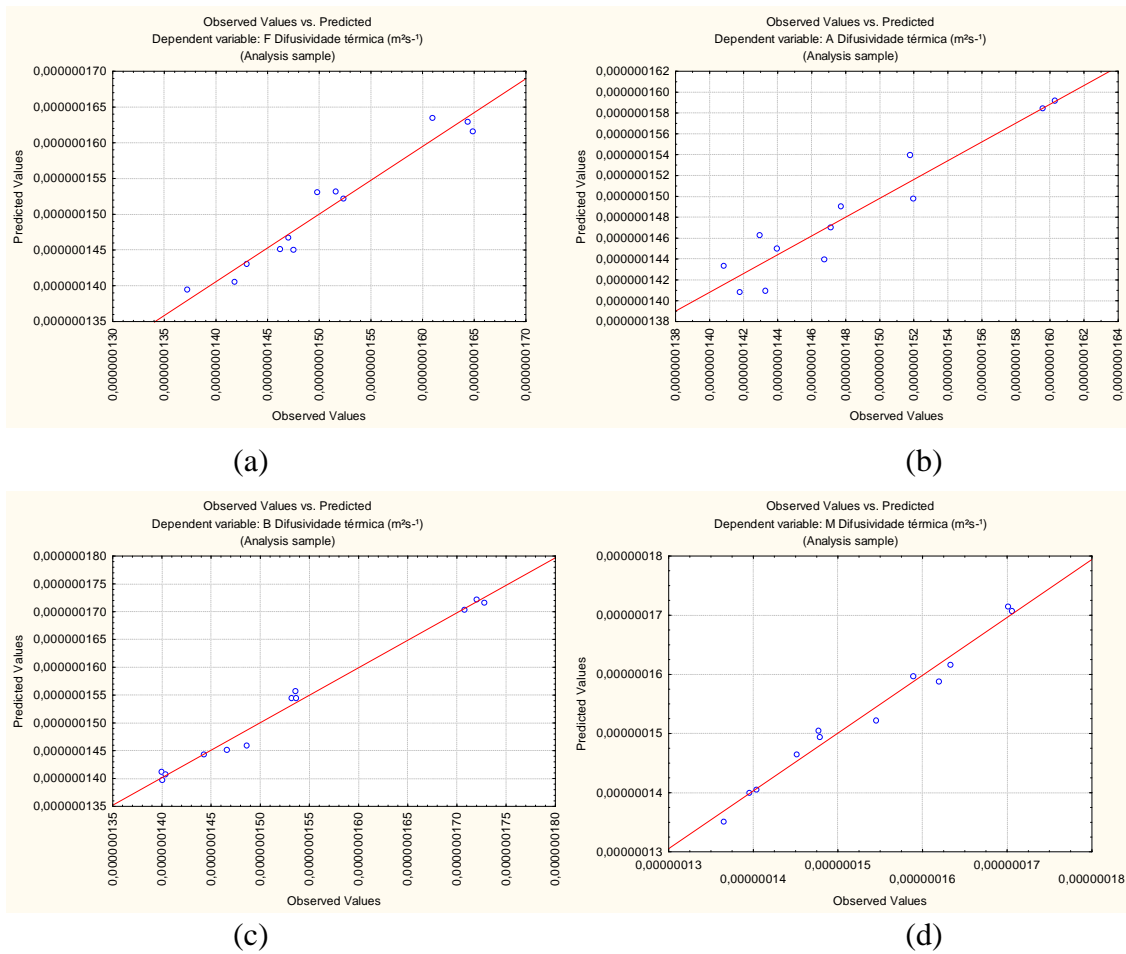
## C.4 Gráficos estatísticos

A seguir (Figuras C.1 a C.2), são apresentados os gráficos de Pareto para os ajustes dos modelos de regressão múltipla da difusividade térmica das polpas, que informam se cada um dos parâmetros ajustados é significativo ou não. Também são apresentados os gráficos que relacionam os valores preditos pelos modelos ajustados e os valores observados experimentalmente.



**Figura C.1:** Gráficos de significâncias dos parâmetros dos modelos de regressão múltipla, para a predição da difusividade térmica aparente das polpas, em função da temperatura e do teor de açúcar, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 6.5; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.





**Figura C.2:** Relação entre valores observados *vs* preditos pelos modelos de regressão múltipla, para a predição da difusividade térmica aparente das polpas, em função da temperatura e do teor de açúcar, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 6.5; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.

## **C.5 Superfícies de Resposta e Curvas de Contorno**

A Figura C.3 apresenta as superfícies de resposta e as curvas de contorno para os modelos de regressão múltipla ajustados para a variação da difusividade térmica aparente das polpas.

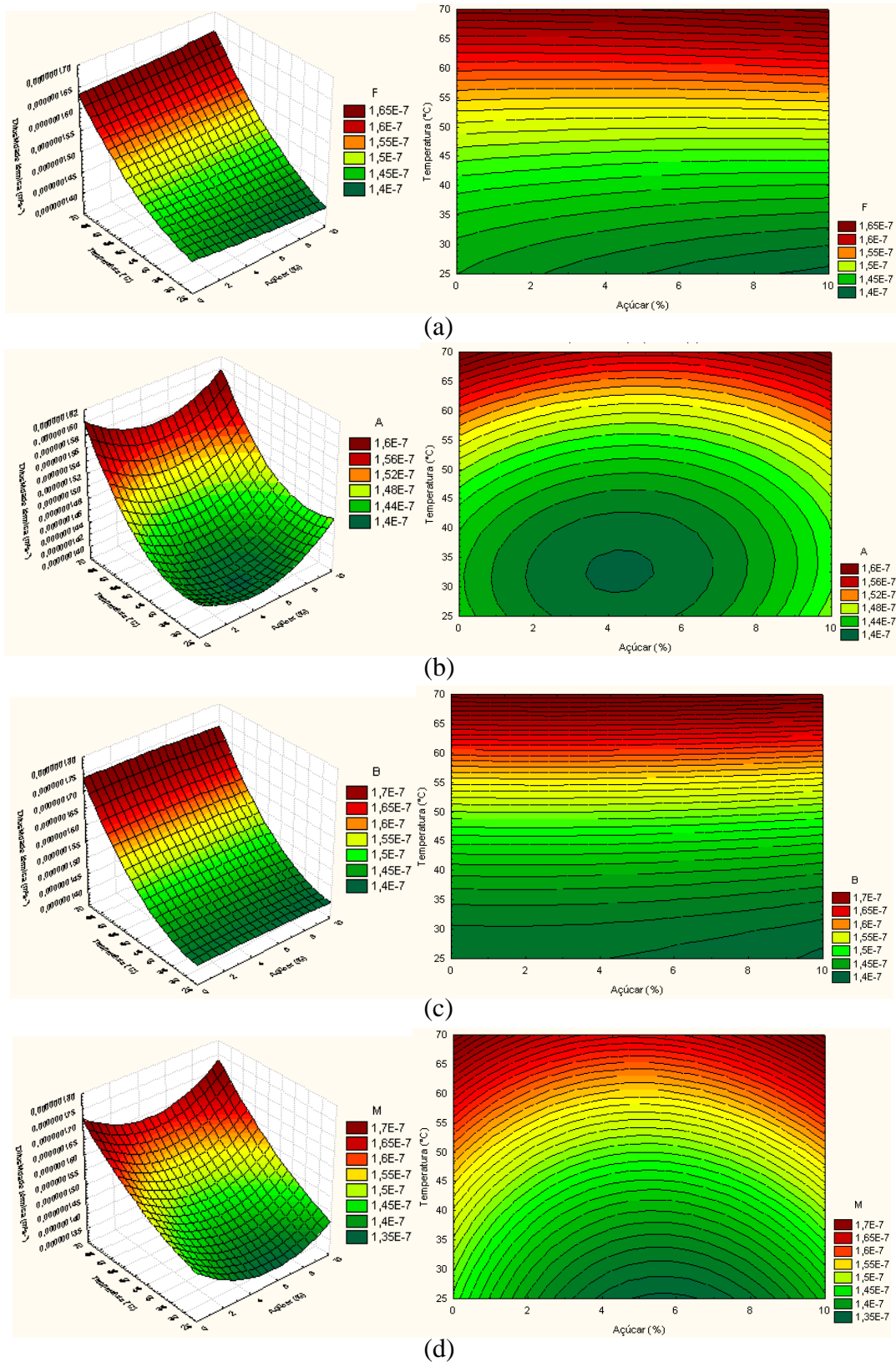


Figura C.3: Superfícies de resposta e curvas de contorno dos modelos para a predição da difusividade térmica aparente das polpas; (a) Polpa de Framboesa, (b) Polpa de Amora, (c) Polpa de Mirtilo, (d) Polpa de Morango.

## Apêndice D

### Dados complementares – Calor Específico

#### D.1 Capacidade calorífica do calorímetro

A tabela a seguir apresenta os resultados da determinação da capacidade calorífica do calorímetro. O  $H_k$  médio foi de  $119,87 \pm 20,26 \text{ J}^\circ\text{C}^{-1}$ .

**Tabela D.1:** Capacidade calorífica.

Teste n°	$H_k \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}$
1	147,88
2	103,89
3	134,95
4	108,26
5	104,38

## D.2 Resultados da determinação do calor específico aparente das polpas

Os resultados experimentais (médias e desvios padrão) são apresentados nas Tabelas D.2 e D.3.

**Tabela D.2:** Calores específicos aparentes das polpas de framboesa e amora.

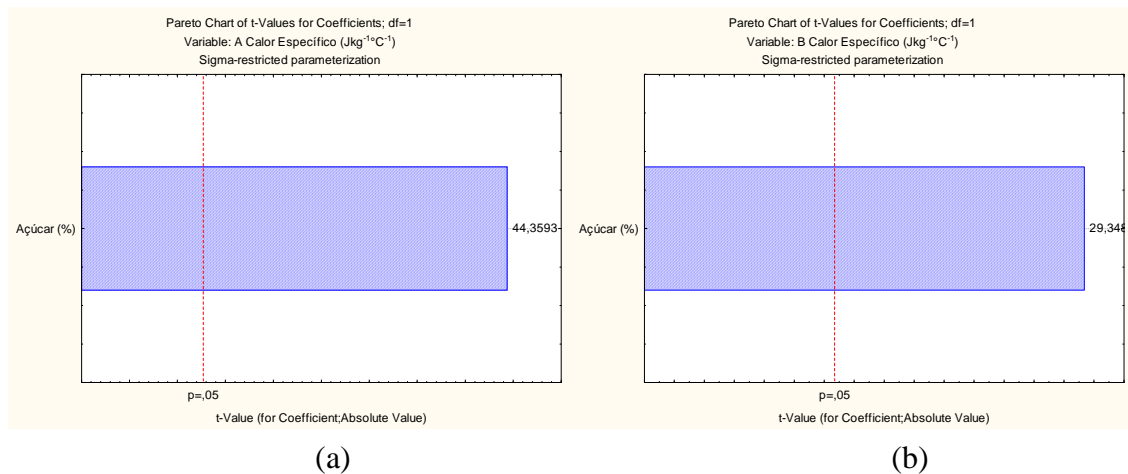
Açúcar [%]	Framboesa				Amora			
	T[°C]		Cp [Jkg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]		T[°C]		Cp [Jkg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]	
0	31,1	±1,1	3754,4	±68,8	31,6	±1,3	3931,1	±25,1
4,75	32,9	±0,6	3666,3	±65,8	32,2	±0,2	3823,5	±19,9
9,08	32,9	±0,4	3542,2	±99,0	29,7	±0,0	3717,4	±35,6

**Tabela D.3:** Calores específicos aparentes das polpas de mirtilo e morango.

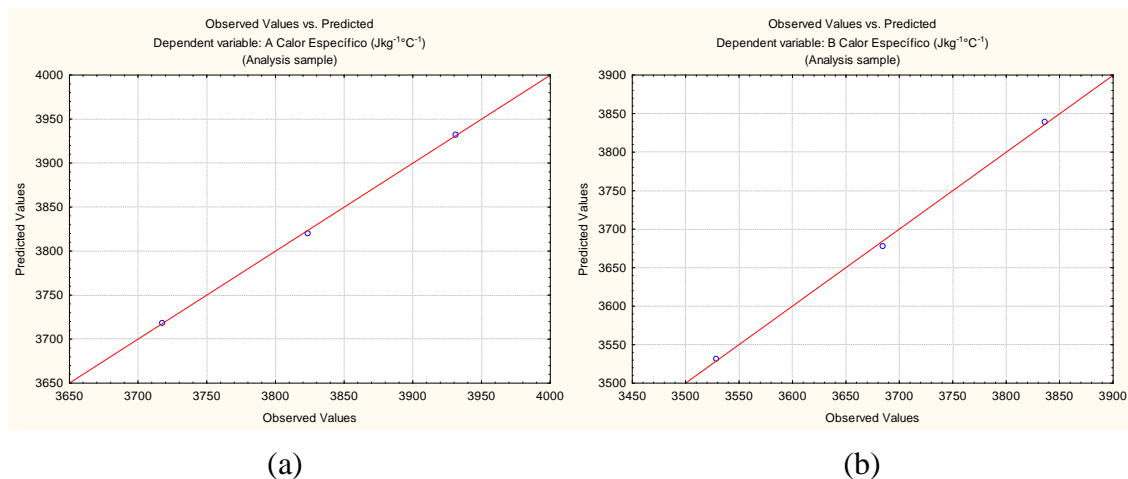
Açúcar [%]	Mirtilo				Morango			
	T[°C]		Cp [Jkg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]		T[°C]		Cp [Jkg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> ]	
0	31,7	±1,1	3836,2	±129,8	29,2	±2,0	3966,6	±15,0
4,75	28,8	±1,5	3684,3	±78,8	29,2	±0,2	3900,7	±41,1
9,08	29,2	±1,3	3528,4	±186,0	30,8	±0,7	3755,4	±3,7

### D.3 Gráficos estatísticos

A seguir, são apresentados os gráficos de Pareto para os ajustes ao modelo linear das polpas, que informam se cada um dos parâmetros ajustados é significativo ou não. Em seguida são apresentados os gráficos que relacionam os valores preditos pelos modelos ajustados e os valores observados experimentalmente.



**Figura D.1:** Gráficos de significâncias dos parâmetros do modelo linear, para a predição do calor específico aparente das polpas; (a) Polpa de Amora, (b) Polpa de Mirtilo.



**Figura D.2:** Relação entre valores observados *vs* preditos pelo modelo linear para predição do calor específico aparente das polpas; (a) Polpa de Amora, (b) Polpa de Mirtilo.

## D.4 Gráficos dos modelos

As Figuras D.3 e D.4 apresentam os gráficos dos modelos lineares ajustados para a variação do calor específico das polpas de amora e de mirtilo com o teor de açúcar adicionado.

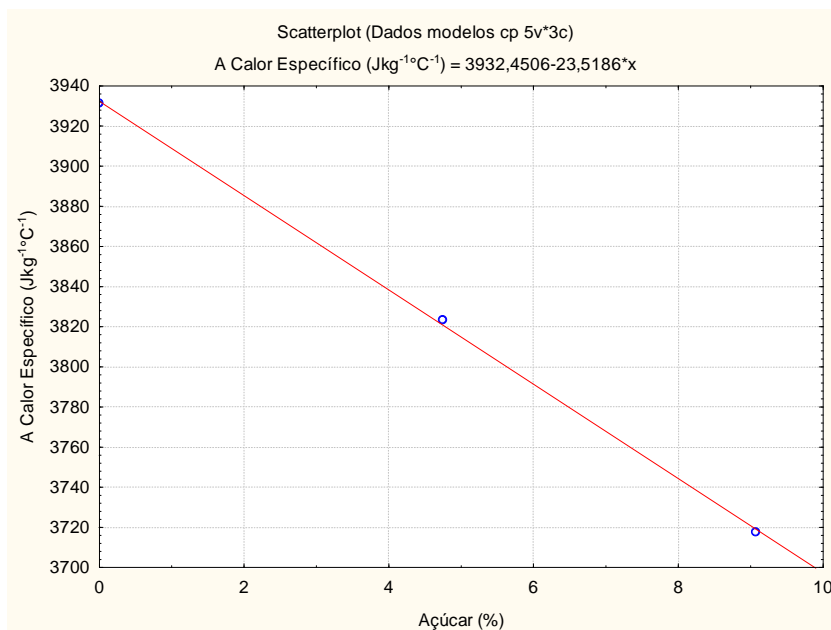


Figura D.3: Variação do calor específico da polpa de amora em função do teor de açúcar adicionado.

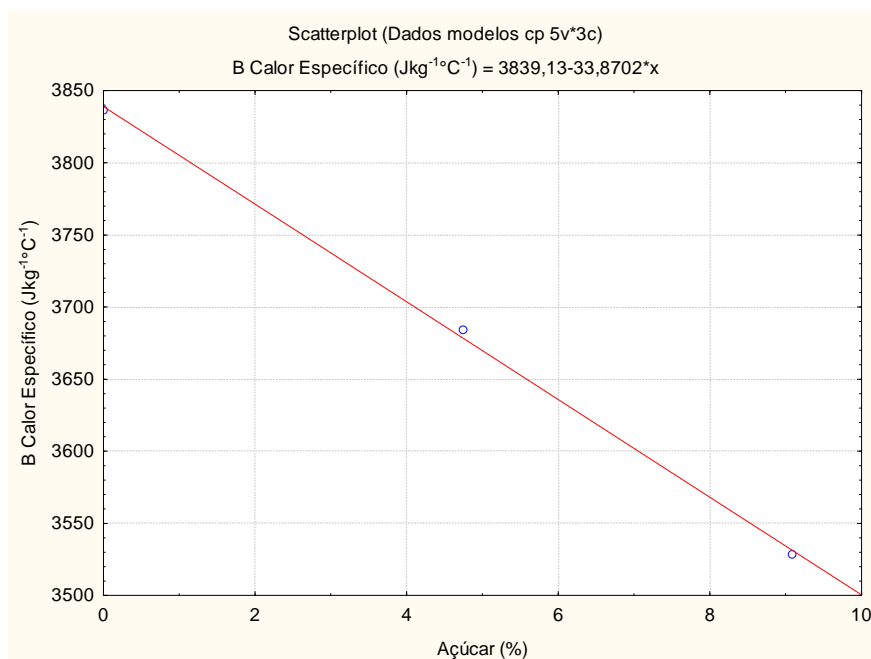


Figura D.4: Variação do calor específico da polpa de mirtilo em função do teor de açúcar adicionado.