



CRISTINA GUIMARÃES PEREIRA

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E
COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE POLPA
DE ACEROLA EM DIFERENTES
CONCENTRAÇÕES E TEMPERATURAS**

LAVRAS – MG

2013

CRISTINA GUIMARÃES PEREIRA

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DE POLPA DE ACEROLA EM DIFERENTES
CONCENTRAÇÕES E TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Jaime Vilela de Resende

LAVRAS - MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Pereira, Cristina Guimarães.

Propriedades termofísicas e comportamento reológico de polpa de acerola em diferentes concentrações e temperaturas / Cristina Guimarães Pereira. – Lavras: UFLA, 2013.

135 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Jaime Vilela de Resende.

Bibliografia.

1. *Malpighia* spp. 2. Condutividade térmica. 3. Difusividade térmica. 4. Reologia. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 664.80423

CRISTINA GUIMARÃES PEREIRA

**PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E COMPORTAMENTO
REOLÓGICO DE POLPA DE ACEROLA EM DIFERENTES
CONCENTRAÇÕES E TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, área de concentração em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de fevereiro de 2013.

Dr. Alexandre de Paula Peres UFLA

Dra. Lanamar de Almeida Carlos UFSJ

Dra. Mônica Elisabeth Torres Prado UFLA

Dr. Jaime Vilela de Resende

Orientador

LAVRAS - MG

2013

Aos meus pais, Edsel e Cleonice, e a minha irmã, Simone, pelo incentivo, amor e exemplo

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por fazer as coisas certas e no momento certo de nossas vidas, proporcionando-nos conforto e perseverança na realização de nossos sonhos e objetivos.

Ao professor Dr. Jaime Vilela de Resende pela orientação, paciência, amizade, dedicação e seus ensinamentos que foram de grande importância para a realização deste trabalho.

Aos meus pais e minha irmã pelo amor, carinho e estímulo.

A todos do Laboratório de Refrigeração de Alimentos pelo companheirismo e amizade, especialmente ao colega Tales pela ajuda indispensável.

Aos meus amigos pelo carinho e incentivo em todos os momentos.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência dos Alimentos (DCA), por possibilitarem o desenvolvimento deste trabalho.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa e concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

Neste trabalho, objetivou-se avaliar as propriedades termofísicas e o comportamento reológico da polpa de acerola nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix. As propriedades termofísicas determinadas foram a densidade, o calor específico, a condutividade e a difusividade térmica na faixa de temperaturas de 0 a -30 °C, tendo sido observadas influências da concentração e temperaturas em todas as propriedades estudadas. Para a densidade e o calor específico houve diminuição com a redução da temperatura e da concentração. Para a condutividade e difusividade térmica, observaram-se aumentos nestas propriedades com a redução da temperatura e da concentração de sólidos solúveis. Entretanto, para todas as propriedades determinadas, as maiores mudanças ocorreram na faixa de temperatura de 0 a -10 °C. Para melhor avaliação, equações foram ajustadas para a determinação direta da condutividade e difusividade térmica na faixa de temperatura e concentração estudada. O comportamento reológico das polpas, avaliado na faixa de temperaturas de 20 a 60 °C, apresentou influência tanto do teor de sólidos solúveis como da temperatura na relação entre tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação. Dentre os modelos matemáticos utilizados para testar o ajuste dos dados experimentais, o de Herschel-Bulkley foi o que proporcionou os melhores ajustes estatísticos, sendo, então, utilizado para a determinação dos parâmetros de tensão inicial (τ_0), índice de consistência (K_H) e índice de comportamento do fluido (n_H). Para o índice de comportamento do fluido (n_H) houve diminuição com o aumento da concentração da polpa e para o índice de consistência (K_H) observou-se uma diminuição dos seus valores com o aumento da temperatura e com a diminuição da concentração, para praticamente todas as concentrações analisadas.

Palavras-chave: *Malpighia* spp. Condutividade térmica. Difusividade térmica. Reologia.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate the thermophysical and rheological properties of the acerola pulp at concentrations of 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 and 13,5 °Brix. Thermophysical properties were determined as the density, specific heat, conductivity and thermal diffusivity at the temperature range 0 to -30 °C. The temperature and concentration factors influenced the thermophysical properties studied. The density and specific heat decreased with decreasing temperature and concentration. For conductivity and thermal diffusivity there were increases in these properties by reducing the temperature and concentration of soluble solids. For all the properties analyzed, the abrupt changes observed occurred in the temperature range of 0 to -10 °C. For better evaluation, equations were adjusted for the direct determination of thermal diffusivity and conductivity of the pulp for the concentration and temperature range studied. The rheological behavior of the pulp, measured in the temperature range 20 to 60°C showed influence both the soluble solids and the temperature of the relationship between shear stress *versus* shear rate. Among the mathematical models used to test the fit of the experimental data, the Herschel-Bulkley gave the best statistical adjustments. It was used to determine the parameters of the yield stress (τ_0), consistency index (K_H) and flow behavior index (n_H). For flow behavior index (n_H) there was decrease with increasing concentration of the pulp. The consistency index (K_H) observed a decrease in their values with increasing temperature and with decreasing concentration for practically all the concentrations tested.

Keywords: *Malpighia* spp. Thermal conductivity. Thermal diffusivity. Rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Calorímetro de mistura (RAHMAN, 2009)	29
Figura 2	Modelo da sonda linear de aquecimento, sendo 1 – fio de cobre, 2 – fio de Constantan, 3 – termopar, 4 - saídas para ligação com a fonte de aquecimento, 5 – resistência interna de níquel-cromo	37
Figura 3	Diagrama esquemático do modelo paralelo	44
Figura 4	Diagrama esquemático do modelo em série.....	45
Figura 5	Diagrama esquemático do modelo de Maxwell-Eucken ou disperso.....	45
Figura 6	Classificação geral do comportamento reológico dos fluidos (OLIVEIRA, 1997).....	55
Figura 7	Fluxograma da obtenção da polpa de acerola	64
Figura 8	Aparato experimental para a determinação da temperatura de início de congelamento.....	68
Figura 9	Sonda linear de aquecimento, construída para a determinação da condutividade térmica.....	69
Figura 10	Montagem experimental da sonda com aquecimento para a determinação da condutividade térmica das polpas: 1) amostra; 2) sonda com aquecimento; 3) banho ultratermostato; 4) fonte de corrente; 5) sistema de condicionamento de sinais 6) microcomputador; 7) amperímetro; A) fio constantan; B) fio cobre; C e D) alimentação da resistência	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Curva experimental do perfil de temperatura <i>versus</i> ln (tempo) (DAWSON; RIDES; NOTTAY, 2006).....	41
Gráfico 2	Curvas típicas de resfriamento. A: água, B: alimentos, S: sub-resfriamento. a: temperatura de cristalização do gelo, b: equilíbrio ou ponto de início de congelamento, c: fim do congelamento, d: formação do primeiro cristal de soluto (Adaptado de RAHMAN, 2009).....	48
Gráfico 3	Tensão de cisalhamento <i>versus</i> taxa de deformação para diversos tipos de fluidos - Adaptado de BOURNE (2002).....	59
Gráfico 4	Perfil de temperatura para a calibração das sondas	70
Gráfico 5	Cinética de congelamento para a polpa de acerola, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.....	80
Gráfico 6	Frações de gelo da polpa de acerola (5,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25	82
Gráfico 7	Frações de gelo da polpa de acerola (7,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25	82
Gráfico 8	Frações de gelo da polpa de acerola (9,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25	83
Gráfico 9	Frações de gelo da polpa de acerola (11,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25	83
Gráfico 10	Frações de gelo da polpa de acerola (13,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25	84
Gráfico 11	Aumento da fração mássica de gelo para as diferentes concentrações de polpa de acerola na faixa de 0 a -30 °C.....	85
Gráfico 12	Aumento da porcentagem de gelo nas polpas, durante o decaimento da temperatura de 0 °C para -30 °C. Cada um dos trechos corresponde a um decaimento de 5 °C	86
Gráfico 13	Modelo exponencial e condutividade térmica experimental das polpas de acerola, nas concentrações 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix, para a faixa de temperatura de 0 a -30 °C.....	89
Gráfico 14	Aumento da condutividade térmica, em termos percentuais, para decaimentos de -5 °C em -5 °C, iniciando-se do 0 °C e finalizando em -30 °C.....	91
Gráfico 15	Comportamento da condutividade térmica em relação às concentrações da polpa de acerola, quando as temperaturas são fixadas.....	92
Gráfico 16	Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 5,5 °Brix	94

Gráfico 17	Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 7,5 °Brix	95
Gráfico 18	Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 9,5 °Brix	95
Gráfico 19	Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 11,5 °Brix.	96
Gráfico 20	Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 13,5 °Brix	96
Gráfico 21	Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 5,5 °Brix	97
Gráfico 22	Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 7,5 °Brix	98
Gráfico 23	Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 9,5 °Brix	98
Gráfico 24	Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 11,5 °Brix	99
Gráfico 25	Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 13,5 °Brix	99
Gráfico 26	Variações da densidade da polpa de acerola, em função das concentrações e da temperatura.....	101
Gráfico 27	Comparação do calor específico da polpa de acerola nas diferentes concentrações e baixas temperaturas.....	104
Gráfico 28	Difusividade térmica da polpa de acerola, para as concentrações de 5,5 a 13,5 °Brix e na faixa de temperatura de 0 a -30 °C.....	105
Gráfico 29	Comportamento da difusividade térmica <i>versus</i> concentração da polpa de acerola, quando as temperaturas são fixadas	108
Gráfico 30	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 5,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.	110
Gráfico 31	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 7,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.	110
Gráfico 32	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 9,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.	111

Gráfico 33	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 11,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.....	111
Gráfico 34	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 13,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.....	112
Gráfico 35	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 5,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.....	113
Gráfico 36	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 7,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.....	113
Gráfico 37	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 9,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.....	114
Gráfico 38	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 11,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise....	114
Gráfico 39	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 13,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise....	115
Gráfico 40	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 20 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.....	121
Gráfico 41	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 30 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.....	122
Gráfico 42	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 40 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.....	122
Gráfico 43	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 50 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.....	123
Gráfico 44	Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 60 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.....	123
Gráfico 45	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 20 °C.....	124
Gráfico 46	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 30 °C.....	125
Gráfico 47	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 40 °C.....	125
Gráfico 48	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 50 °C.....	126
Gráfico 49	Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 60 °C.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição da polpa de acerola, segundo Brasil (2000).....	22
Tabela 2	Composição da polpa de acerola congelada por 100 gramas de parte comestível	23
Tabela 3	Modelos para a determinação da densidade dos componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$).....	26
Tabela 4	Modelos para a determinação do calor específico dos componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$).....	32
Tabela 5	Modelos para condutividade térmica dos componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$).....	43
Tabela 6	Modelos para condutividade térmica da água e gelo ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$).....	43
Tabela 7	Composição centesimal e desvio padrão (DP) da polpa de acerola nas diferentes concentrações de análise.....	78
Tabela 8	Temperatura de início de congelamento das polpas de acerola nas diferentes concentrações e com os respectivos desvios padrões	81
Tabela 9	Condutividades térmicas experimentais da solução de sacarose 10% e fator de correção f	87
Tabela 10	Condutividade térmica média e desvio padrão para as polpas de acerola, em suas respectivas temperaturas	88
Tabela 11	Equações para avaliação da condutividade térmica da polpa de acerola na faixa de temperatura de 0 a -30 °C	90
Tabela 12	Modelos lineares ajustados para determinação da condutividade térmica da polpa de acerola, na faixa de concentração de 5,5 a 13,5 °Brix	93
Tabela 13	Calor específico da polpa de acerola em diferentes concentrações e temperatura.....	103
Tabela 14	Equações para avaliação da difusividade térmica da polpa de acerola na faixa de temperatura de 0 a -30 °C	106
Tabela 15	Modelos ajustados para a difusividade térmica da polpa de acerola na faixa de concentração de 5,5 a 13,5 °Brix.....	108
Tabela 16	Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 5,5 °Brix.....	116
Tabela 17	Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 7,5 °Brix.....	116
Tabela 18	Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 9,5 °Brix.....	117
Tabela 19	Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 11,5 °Brix.....	117

Tabela 20	Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 13,5 °Brix.....	117
Tabela 21	Equações ajustadas para índice de consistência (K_H) versus temperatura para a polpa de acerola, nas concentrações de 5,5 a 13,5 °Brix.....	119
Tabela 22	Equações ajustadas para índice de consistência (K_H) versus concentração para a polpa de acerola, nas temperaturas de 20 a 60 °C.....	119
Tabela 23	Equações ajustadas para índice de comportamento do fluido (n_H) versus concentração para a polpa de acerola, nas temperaturas de 20 a 60 °C.....	120

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de transferência de calor	m^2
C	Capacidade colorífica	kJ/kg
E_a	Energia de ativação	kJ/gmol
K	Índice de consistência (Lei da Potência)	Pa.s
K_C	Viscosidade plástica de Casson	Pa.s
K_H	Índice de consistência (Herschel-Bulkley)	Pa.s
K_{oC}	Tensão de cisalhamento inicial de Casson	Pa
K_{oM}	Índice de consistência (Mizrahi-Berk)	Pa.s
Q	Calor transferido	W
L	Calor latente de fusão	kJ/kg
M	Peso molecular	kg/kg.mol
R	Constante universal dos gases	kJ/kg.mol.K
R	Resistência elétrica	Ω/m
T	Temperatura	$^\circ\text{C}$ ou K
X	Fração volumétrica	-
c	Concentração	$^\circ\text{Brix}$
c_p	Calor específico	$\text{kJ/kg.}^\circ\text{C}$ ou kJ/kg.K
f	Fator de correção	-
i	Corrente elétrica	A
k	Condutividade térmica	W/mK ou $\text{W/m.}^\circ\text{C}$
m	Inclinação da reta	-
m	Massa	kg
q	Potência de aquecimento por metro	W/m
r	Raio	m
t	Tempo	s
x	Fração mássica	-
α	Difusividade térmica	m^2/s
γ	Taxa de deformação	s^{-1}
ε	Porosidade	-
η	Viscosidade	Pa.s
ρ	Densidade	kg/m^3
τ	Tensão de cisalhamento	N/m^2
$\frac{dT}{dr}$	Gradiente de temperatura em relação ao raio	K/m

LISTA DE SUBSCRITOS

<i>A</i>	Amostra
<i>a</i>	Aparente
<i>b</i>	Água ligada
<i>c</i>	Contínua
<i>cal</i>	Calorímetro
<i>d</i>	Dispersa
<i>e</i>	Efetiva
<i>eq</i>	Equilíbrio
<i>exp</i>	Experimental
<i>f</i>	Alimento totalmente congelado
<i>i</i>	Componente puro
<i>ic</i>	Início de congelamento
<i>icA</i>	Início de congelamento da amostra
<i>icw</i>	Início de congelamento da água
<i>me</i>	Maxwell-Eucken
<i>n</i>	Número de componentes
<i>n</i>	Índice de comportamento de fluido (Lei da Potência)
<i>n_H</i>	Índice de comportamento de fluido (Herschel-Bulkley)
<i>n_M</i>	Índice de comportamento de fluido (Mizrahi-Berk)
<i>o</i>	Inicial
<i>ow</i>	Inicial da água
<i>oA</i>	Inicial da amostra
<i>pa</i>	Paralelo
<i>pic</i>	Picnômetro
<i>pred</i>	Predito
<i>re</i>	Material de referência
<i>s</i>	Sólidos
<i>se</i>	Série
<i>u</i>	Alimento não congelado
<i>w</i>	Água
<i>wa</i>	Água adicionada
<i>wo</i>	Água não congelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivos gerais.....	19
2.2	Objetivos específicos	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1	Acerola	21
3.2	Propriedades termofísicas.....	23
3.2.1	Densidade	24
3.2.2	Calor específico	27
3.2.3	Condutividade térmica	33
3.2.4	Difusividade térmica	46
3.3	Temperatura de início de congelamento	47
3.3.1	Método da curva de resfriamento.....	49
3.3.2	Método por calorimetria diferencial de varredura (DSC).....	49
3.4	Fração de água congelada.....	49
3.5	Reologia.....	53
3.5.1	Dependentes do tempo	57
3.5.2	Independentes do tempo	58
3.5.3	Modelos reológicos	60
4	MATERIAL E MÉTODOS	64
4.1	Obtenção da polpa	64
4.2	Análises físicas e químicas	65
4.2.1	Umidade	66
4.2.2	Sólidos solúveis.....	66
4.2.3	Proteínas.....	66
4.2.4	Gorduras	66
4.2.5	Fibras.....	66
4.2.6	Cinzas	67
4.2.7	Carboidratos	67
4.3	Determinação da temperatura de início de congelamento (T_{ic})	67
4.4	Determinação da fração de água congelada	68
4.5	Construção e calibração da sonda	69
4.6	Determinação das propriedades termofísicas	71
4.6.1	Condutividade térmica	71
4.6.2	Densidade	73
4.6.3	Calor específico	74
4.6.4	Difusividade térmica	74
4.7	Determinação das propriedades reológicas	75
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77

5.1	Caracterização físico-química da polpa de acerola.....	77
5.2	Temperatura de início de congelamento	79
5.3	Fração de água congelada.....	81
5.4	Medição da condutividade térmica da solução de sacarose 10% e determinação do fator de correção f	87
5.4.1	Condutividade térmica experimental	88
5.4.2	Condutividade térmica experimental corrigida	89
5.4.3	Comparação da condutividade térmica experimental com a determinada pelos modelos estruturais	94
5.4.4	Densidade	100
5.4.5	Calor específico	102
5.4.6	Difusividade térmica	105
5.5	Reologia.....	109
6	CONCLUSÕES.....	128
	REFERÊNCIAS.....	129

1 INTRODUÇÃO

A produção e o consumo de frutas tropicais brasileiras vêm crescendo em um ritmo considerável, representando um mercado em potencial. O interesse econômico pelas frutas tropicais vem sendo despertado em virtude das possibilidades de sua utilização no preparo de polpas, doces e sorvetes, como forma de agregar valor ao produto.

Para o processamento das frutas, há a necessidade da aplicação de processos térmicos que envolvam transferência de calor, dentre os quais aquecimento, resfriamento e congelamento. O conhecimento das propriedades termofísicas, como densidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica, se torna, então, fundamental para o dimensionamento dos equipamentos utilizados nos processos que envolvam transferência de calor, tanto em altas ou baixas temperaturas. Conhecendo-se essas propriedades, podem-se estimar o tempo de processamento e a quantidade de energia envolvida durante os processos térmicos.

Os valores das propriedades termofísicas de polpas de frutas podem ser determinados por diversos métodos, sendo importantes os parâmetros como temperatura, concentração de sólidos solúveis, umidade e composição centesimal (MATTOS, 2007). Uma grande quantidade desses dados foi publicada na literatura nacional e internacional, porém, para polpas de frutas tropicais são ainda escassos. Em baixas temperaturas, as dificuldades são ainda maiores, pois, em processos de congelamento, suas medições são relativamente complexas, sendo a maior dificuldade atribuída à dependência e a grandes variações em virtude da contínua mudança do conteúdo de gelo na faixa entre 0 e -40 °C (RENAUD et al., 1992).

Importância deve também ser dada ao comportamento reológico dos alimentos, pois seus dados são considerados uma ferramenta analítica, os quais

forneem uma melhor compreensão da organização estrutural dos alimentos (DINIZ, 2009), sendo também importantes para o cálculo de engenharia de processos, abrangendo equipamentos como agitadores, bombas, trocadores de calor, tubulações e homogeneizadores. São importantes também para determinar a funcionalidade de ingredientes em novos produtos, o controle da qualidade do produto final ou intermediário e a avaliação da textura pela correlação com dados sensoriais (STEFFE, 1996).

Assim, este trabalho foi realizado com a finalidade de contribuir para melhorar a compreensão sobre as propriedades termofísicas e reológicas da polpa de acerola.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

- a) determinar os valores das propriedades termofísicas de polpa de acerola em diferentes concentrações e em baixas temperaturas;
- b) avaliar o comportamento reológico da polpa de acerola em diferentes concentrações e temperaturas.

2.2 Objetivos específicos

- a) determinar, experimentalmente, por meio da Metodologia da Fonte Linear de Calor (Sonda), os valores da condutividade térmica da polpa de acerola e correlacioná-los com a concentração e a temperatura;
- b) comparar os valores experimentais da condutividade térmica com aqueles obtidos por meio de modelos matemáticos, como o em

paralelo, o em série e o de Maxwell-Eucken, calculando os erros experimentais envolvidos;

- c) determinar, por meio de modelos, os valores do calor específico e densidade da polpa para a obtenção da difusividade térmica, juntamente com os valores de condutividade obtidos experimentalmente;
- d) estudar o comportamento reológico da polpa em diversas concentrações e temperaturas, fazendo um ajuste dos dados experimentais aos modelos matemáticos de Herschel-Bulkley, Mizrahi-Berk, Casson e Lei da Potência.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Acerola

A acerola (*Malpighia* spp.), também chamada de cereja-das-antilhas, é uma pequena planta de clima tropical, a qual cresce e produz frutos muito ricos em vitamina C (MANICA et al., 2003). Originária da região das Antilhas, norte da América do Sul e América Central, é cultivada no Brasil, em Porto Rico, em Cuba e nos Estados Unidos (Havaí e Flórida), havendo registros de sua produção também na Venezuela, na Colômbia, em algumas ilhas do Caribe e em países asiáticos. No Brasil, é plantada em todas as regiões, sendo Pernambuco, Ceará, São Paulo e Bahia os principais estados produtores (RITZINGER; KOBAYASHI; OLIVEIRA, 2003). Entretanto, a produção está concentrada, basicamente, na zona tropical, mais especificamente na região nordeste, que detêm 70% da produção (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2006).

Devido à sua rusticidade, a acerola desenvolve-se bem tanto em climas tropicais como subtropicais, tendo sua frutificação normalmente concentrada na primavera e no verão, tendo três ou mais safras durante o ano, desde que haja disponibilidade de água.

O setor agroindustrial é o grande incentivador do plantio de acerola no Brasil. Sendo um fruto climatérico e altamente perecível, exige, portanto, um processo ágil de comercialização, o que foi conseguido por meio da integração da produção com as agroindústrias. No mercado interno, o consumo da acerola se dá na sua forma *in natura* ou industrializada, como sucos, polpas, geleias, sorvetes, xaropes, licores e doces em caldas, dentre outras. Para o mercado externo, que consome 80% da produção nordestina, são exportados a polpa da fruta e os frutos na forma *in natura* congelados, verdes e maduros. O Japão é o

grande importador de acerola do Brasil e é também o intermediário da distribuição para a Europa (RITZINGER; KOBAYASHI; OLIVEIRA, 2003).

Uma das formas de consumo da acerola, e a que será utilizada neste trabalho, é a de polpa que, segundo os padrões de identidade e qualidade para polpas de frutas aprovados pela Instrução Normativa n° 01, de 7 de janeiro de 2000 (BRASIL, 2000), é definida como “o produto não fermentado e não diluído, obtido da parte comestível da acerola (*Malpighia* spp.) por meio do processo tecnológico adequado, com teor mínimo de sólidos totais. A mesma Instrução Normativa estabelece que a polpa de acerola deve obedecer à composição apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 Composição da polpa de acerola, segundo Brasil (2000)

ITENS	MÍNIMO	MÁXIMO
Sólidos solúveis (°Brix)	5,5	-
pH	2,8	-
Acidez total expressa em ácido cítrico (g/100 g)	0,8	-
Ácido ascórbico (mg/100 g)	800	-
Açúcares totais naturais da acerola (g/100 g)	4,0	9,5
Sólidos totais (g/100 g)	6,5	-

O banco de dados da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO) (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011) apresenta um valor representativo baseado em um plano de amostragem que estabelece uma composição para polpa de acerola congelada para 100 g de parte comestível, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 Composição da polpa de acerola congelada por 100 gramas de parte comestível

Umidade (%)	Proteína (g)	Lipídio (g)	Carboidrato (g)	Fibra (g)	Cinzas (g)
93,6	0,6	Traço	5,5	0,7	0,3

Fonte: (Tabela Brasileira de Composição de Alimentos, 2011)

3.2 Propriedades termofísicas

O aumento da demanda dos produtos alimentícios no país traz como consequências a exigência de modernização, a adequação tecnológica e maior qualidade para as indústrias. O cumprimento dessas exigências só acontecerá com maiores informações científicas sobre as propriedades termofísicas dos alimentos, possibilitando cálculos eficientes de projetos e economia nas operações de processamento envolvendo transferência de calor (MOURA, 2005; ARAÚJO; QUEIROZ; FIGUEIREDO, 2004). O dimensionamento dos equipamentos utilizados no processamento de alimentos, tanto em altas como em baixas temperaturas, exige dados precisos das propriedades térmicas dos mesmos (condutividade térmica, difusividade térmica, densidade e calor específico) e de como essas propriedades se comportam durante o processo em função da temperatura (MOURA, 2005).

Atualmente, os inúmeros dados encontrados na literatura não abrangem referências às frutas tropicais e, para produtos brasileiros, nem mesmo são encontrados. Em baixas temperaturas, a escassez de dados é ainda maior, pois, segundo American Society of Heating (2002), a fração de gelo produzida durante o congelamento de um alimento afeta muito suas propriedades termofísicas, visto que a condutividade do gelo é quatro vezes maior do que da água líquida. Assim, é necessário tanto obter dados precisos das propriedades

termofísicas quanto predizer o comportamento dessas propriedades durante um processamento em função da temperatura (BECKER; FRICKE, 1999).

Falhas em equipamentos ou no projeto de processos podem ser atribuídas à falta de informações, quando da seleção de valores de propriedades termofísicas utilizadas na análise inicial dos sistemas em estudo. Propriedades físicas e termofísicas, como a umidade, a concentração de sólidos solúveis, a densidade, o calor específico, a difusividade e a condutividade térmica, são muito utilizadas nos projetos de bombas, trocadores de calor, evaporadores, misturadores e em simulações de processos térmicos (MERCALI et al., 2011). O calor específico e o calor latente determinam as quantidades de energia necessárias nos processos de resfriamento e de aquecimento, e são muito utilizados nos processos de congelamento, cristalização e evaporação (MATTOS, 2007).

Modelos teóricos para a predição das propriedades termofísicas dos alimentos estão presentes na literatura. Em American Society of Heating (2002), há modelos propostos por Choi e Okos, nos quais, para utilização, é considerada a composição em termos do teor de água, proteína, gordura, carboidrato, fibra e cinza.

3.2.1 Densidade

A densidade de um produto alimentar é medida pesando-se um volume conhecido do produto, sendo definida como a massa de um material por unidade de volume e expressa em kg/m^3 , no sistema internacional de unidade (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 1997). Sua determinação é, geralmente, feita em análise de alimentos que se apresentam no estado líquido (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). Pode ser medida por vários aparelhos, sendo o picnômetro o mais utilizado. Sua maior utilização está relacionada com a alta

precisão de análise. Os picnômetros são construídos e graduados de modo a permitir a pesagem de volumes exatamente iguais de líquidos a uma dada temperatura. Da relação destas massas e volumes resulta a densidade dos mesmos à temperatura de determinação. Usando água como líquido de referência, tem-se a densidade relativa à água ou peso específico (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

A densidade pelo método do picnômetro pode ser obtida por meio da equação 1.

$$\rho_A = \rho_w \times \frac{(m_{picA} - m_{picV})}{(m_{picw} - m_{picV})} \quad (1)$$

em que ρ_A é a densidade da amostra (kg/m^3) a uma dada temperatura, ρ_w é a densidade da água (kg/m^3) na mesma temperatura, m_{picA} é a massa (kg) do picnômetro cheio da amostra, m_{picw} é a massa do picnômetro (kg) cheio de água e m_{picV} é a massa do picnômetro (kg) vazio.

Uma vez que produtos alimentares possuem diferentes formas e tamanhos, a medição precisa do volume pode ser um desafio. Existem diversas técnicas para determinar o volume de alimentos descritas na literatura, contudo, as publicações apresentam poucas aplicações dos métodos para medir a densidade de alimentos congelados (RAO; RIZVI; DATTA, 2005).

Assim como para outras propriedades termofísicas, há, para determinação da densidade, modelos matemáticos que consideram a porosidade, a fração mássica dos componentes presentes no alimento, bem como as densidades intrínsecas de seus constituintes. A densidade dos alimentos em geral pode, então, ser calculada de acordo com a equação 2 (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2002).

$$\rho = \frac{(1 - \varepsilon)}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} \quad (2)$$

em que

ε : porosidade;

x_i : fração mássica dos constituintes do alimento;

ρ_i : densidade dos constituintes do alimento (kg/m^3).

A porosidade é requerida para alimentos granulares, sendo, para os outros, considerada zero. As densidades intrínsecas dos constituintes, necessárias para utilização na equação 2, podem ser determinadas segundo as equações da Tabela 3.

Tabela 3 Modelos para a determinação da densidade dos componentes dos alimentos ($-40 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 150 \text{ }^\circ\text{C}$)

Componentes	Funções de densidade (kg/m^3)
Proteína	$\rho = 1,3299 \times 10^3 - 5,1840 \times 10^{-1}T$
Gordura	$\rho = 9,2559 \times 10^2 - 4,1757 \times 10^{-1}T$
Carboidrato	$\rho = 1,5991 \times 10^3 - 3,1046 \times 10^{-1}T$
Fibra	$\rho = 1,3115 \times 10^3 - 3,6589 \times 10^{-1}T$
Cinzas	$\rho = 2,4238 \times 10^3 - 2,8063 \times 10^{-1}T$
Água	$\rho = 9,9718 \times 10^2 + 3,1439 \times 10^{-3}T - 3,7574 \times 10^{-3}T^2$
Gelo	$\rho = 9,1689 \times 10^2 - 1,3071 \times 10^{-1}T$

Fonte: AMERICAN SOCIETY OF HEATING (2002)

Muniz et al. (2006) determinaram, experimentalmente e por meio de equações teóricas, a densidade de polpa de bacuri em diferentes concentrações. Experimentalmente, obtiveram a densidade em uma faixa de 1.008,40 a 1.048,36

kg/m^3 , para uma faixa de concentração de 5,0 a 20,0 °Brix, em sextuplicata, utilizando picnômetro previamente calibrado nas temperaturas de 25 e 30 °C.

Cabral et al. (2007) avaliaram, por meio do método do picnômetro, a densidade de suco de amora nas concentrações de 9,4 a 58,4 °Brix e em uma faixa de temperatura de 0,5 a 80,8 °C. Estes autores obtiveram, na menor temperatura, 1.023,8 kg/m^3 , para 9,4 °Brix e 1.292,5 kg/m^3 , para 58,4 °Brix. Na temperatura de 80,8 °C, a densidade variou de 977,8 a 1.259,7 kg/m^3 , para a menor e a maior concentração, respectivamente.

3.2.2 Calor específico

Calor específico é uma medida da energia necessária para mudar a temperatura de um alimento em um grau, em uma unidade de massa, sem mudança de estado. Portanto, o calor específico de alimentos ou bebidas pode ser utilizado para calcular a carga térmica imposta aos equipamentos de refrigeração por resfriamento ou congelamento (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2002). Nos processos de transferência de calor a que são submetidos os materiais biológicos, a variação de pressão é muito pequena, portanto, utiliza-se o conceito de calor específico a pressão constante (MOHSENIN, 1980).

Vários métodos têm sido utilizados para medir o calor específico. Os equipamentos utilizados são o calorímetro diferencial de varredura (DSC) e o calorímetro de mistura (RAHMAN, 2009).

Calorímetro de mistura

No calorímetro de mistura, um calorímetro adiabático de capacidade calorífica conhecida, o material é mergulhado em um líquido inerte. Tem-se o conhecimento da massa e da temperatura, tanto do material quanto do líquido

inerte. Quando a temperatura de equilíbrio é atingida, ela é anotada. Para se determinar o calor específico do material, assume-se que o calor perdido pelo material é igual ao calor ganho pelo fluido e pelo calorímetro (RAHMAN, 2009). Como o isolamento entre o calorímetro e a vizinhança nem sempre é perfeito, pode haver perda ou ganho de energia através das paredes do sistema e ganho pela agitação. Por este motivo, é aconselhável que se realize a calibração do instrumento utilizando as mesmas condições da realização do ensaio. O balanço de calor é mostrado pela equação 3 (RAHMAN, 2009).

$$c_{pA} = \frac{c_{pw} \times m_{wa} \times (T_{eq} - T_{ow}) + C_{cal} \times (T_{eq} - T_{oA})}{m_A (T_{eq} - T_{oA})} \quad (3)$$

em que

c_{pA} : calor específico da amostra (kJ/kg.°C);

c_{pw} : calor específico da água (kJ/kg.°C);

C_{cal} : capacidade calorífica do calorímetro (kJ/°C).

m_{wa} : massa de água adicionada (kg);

m_A : massa da amostra (kg);

T_{eq} : temperatura de equilíbrio (°C);

T_{ow} : temperatura inicial da água (°C);

T_{oA} : temperatura inicial da amostra (°C).

Na Figura 1 é apresentado o esquema de um calorímetro de mistura.

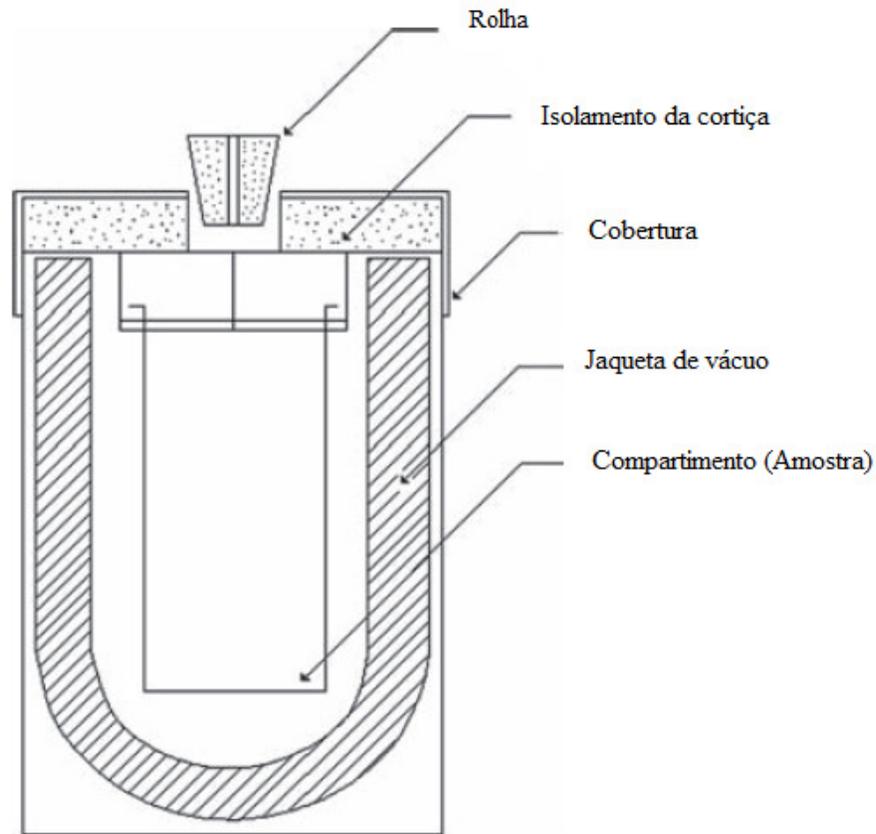


Figura 1 Calorímetro de mistura (RAHMAN, 2009)

Uma desvantagem do método de misturas é que apenas um valor de calor específico médio é obtido a partir da faixa correspondente. Se uma avaliação completa de calor específico com relação à temperatura é desejada, experimentos adicionais devem ser executados em diferentes temperaturas (RAHMAN, 2009). Também se deve ter em mente que maiores diferenças de temperatura entre a amostra e o fluido do calorímetro resultam em maiores perdas de calor. Devido à longa duração deste método, há uma fonte de erro que pode ser descrita como de fuga térmica.

Muniz et al. (2006) determinaram experimental e teoricamente o calor específico de polpa de bacuri em diferentes concentrações na temperatura ambiente, obtendo uma diminuição do mesmo com o aumento da concentração. Para uma concentração de 5 °Brix, obtiveram 3,616 kJ/ kg°C de calor específico e, para 20 °Brix, o calor específico caiu para 2,986 kJ/ kg°C.

Calorímetro diferencial de varredura (DSC)

O calorímetro diferencial de varredura (DSC) é uma técnica termoanalítica, baseada na medição de pequenos efeitos produzidos em processos térmicos (MOHSENIN, 1980). As vantagens de se utilizar o DSC são a rapidez de medidas, a obtenção de dados múltiplos em um único termograma e o uso de uma pequena quantidade de amostras, gerando resultados precisos (MURPHY; MARKS; MARCY, 1998).

No método do DSC, a quantidade de energia necessária para variar a temperatura da amostra é comparada com a energia necessária para mudar a temperatura de um material de referência, sob a mesma taxa de aquecimento. O calor requerido para atingir a temperatura é gravado em um termograma, que registra o histórico do fluxo de calor relacionado com a temperatura (MATTOS, 2007). Os termogramas mostram qualquer ganho ou perda de energia térmica, referente a um aumento de temperatura em um dado intervalo de temperatura. A área do termograma é proporcional ao calor absorvido ou liberado pela amostra, durante um determinado processo. A natureza dinâmica do DSC permite a determinação do calor específico em função da temperatura (SINGH; GOSWAMI, 2000) e os fatores que podem afetar os valores medidos para o calor específico durante uma medição com DSC podem ser o tamanho da amostra, a taxa de aquecimento e as condições de vedação da amostra (RAHMAN, 2009).

Modelos teóricos para determinação do calor específico

Teoricamente, o calor específico de materiais compostos, como alimentos, pode ser determinado pela soma das capacidades caloríficas de cada componente.

Em American Society of Heating (2002), para alimentos não congelados, o calor específico pode ser obtido em termos das frações mássicas dos componentes e seus respectivos calores específicos intrínsecos, como apresentado na equação 4.

$$c_{p_u} = \sum c_{p_i} x_i \quad (4)$$

em que c_{p_i} é o calor específico dos componentes individuais, x_i a fração mássica e c_{p_u} o calor específico do alimento não congelado (kJ/kg.°C).

Se os dados detalhados da composição não se encontram disponíveis, o modelo de Chen apresentado na equação 5 pode ser utilizado para cálculo do calor específico de um item alimentar, sendo necessário apenas o termo referente à fração mássica dos sólidos (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2002).

$$c_{p_u} = 4,19 - 2,30x_s - 0,628x_s^3 \quad (5)$$

em que x_s é a fração mássica de sólidos no alimento.

O calor específico intrínseco pode ser avaliado por meio das equações presentes na Tabela 4.

Tabela 4 Modelos para a determinação do calor específico dos componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$)

Componentes	Funções de calor específico (kJ/kg.K)
Proteína	$c_p = 2,0082 + 1,2089 \times 10^{-3}T - 1,3129 \times 10^{-6}T^2$
Gordura	$c_p = 1,9842 + 1,4733 \times 10^{-3}T - 4,8008 \times 10^{-6}T^2$
Carboidrato	$c_p = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3}T - 5,9399 \times 10^{-6}T^2$
Fibra	$c_p = 1,8459 + 1,8306 \times 10^{-3}T - 4,6509 \times 10^{-6}T^2$
Cinzas	$c_p = 1,0926 + 1,8896 \times 10^{-3}T - 3,6817 \times 10^{-6}T^2$
Água ^a	$c_p = 4,0817 - 5,3062 \times 10^{-3}T + 9,9516 \times 10^{-4}T^2$
Água ^b	$c_p = 4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5}T + 5,4731 \times 10^{-6}T^2$
Gelo	$c_p = 2,0623 + 6,0769 \times 10^{-3}T$

Fonte: AMERICAN SOCIETY OF HEATING (2002)

^a Para a faixa de temperatura de (-40 °C a 0 °C)

^b Para a faixa de temperatura de (0 °C a 150 °C)

Já para os alimentos abaixo da temperatura de início de congelamento, o calor sensível devido à mudança de temperatura e o calor latente devido à mudança de fase da água devem ser considerados. Sendo o calor latente não liberado a uma temperatura constante, mas sim em uma faixa de temperatura, um calor específico aparente deve ser utilizado para dar conta tanto dos efeitos de calor sensível como latente (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2002). Em American Society of Heating (2002) está presente o modelo de Chen (Equação 6), que tem certa simplicidade para a determinação do calor específico dos alimentos a baixas temperaturas, além de possibilitar avaliar a descontinuidade existente quando na temperatura de início do congelamento, devido ao calor latente.

$$c_{p_a} = 1,55 + 1,26x_s - \frac{(x_{wo} - x_b)LT_{icA}}{T^2} \quad (6)$$

em que

c_{p_a} : calor específico aparente (kJ/kg.°C);

x_s : fração mássica de sólidos no alimento;

x_{wo} : fração mássica de água não congelada;

x_b : fração mássica de água ligada;

L : calor latente de fusão (333,13 kJ/kg);

T_{icA} : temperatura de início de congelamento da amostra (°C);

T : temperatura da amostra (°C).

3.2.3 Condutividade térmica

A transferência de calor é o processo que se identifica pela transferência de energia entre dois sistemas diferentes, como resultado da diferença de temperatura entre eles (PARK; ALONSO; NUNES, 1999). Há três meios distintos de transferência de calor denominados condução, radiação e convecção, que atuam de forma combinada. A convecção é o processo de transporte de calor decorrente da movimentação do fluido por diferença de densidades ou agitação. Na radiação, o calor é transferido mesmo quando os corpos estão separados. Neste caso, o calor é transmitido pela propagação de ondas eletromagnéticas e luminosas. A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de alta temperatura para outra de mais baixa temperatura dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato físico direto. O calor passa através do corpo sólido pela transferência física de elétrons livres e pela vibração de átomos e moléculas, e cessa quando a temperatura em todos os pontos do sistema atinge o equilíbrio térmico (HELDMAN, 1982).

Considerada uma das propriedades mais influentes durante um processamento que envolve transferência de calor (CARSON, 2006), a condutividade térmica é altamente dependente da composição e da temperatura do alimento. Ela é predita pela Primeira Lei de Fourier, conforme a equação 7, descrevendo que um gradiente de temperatura distribuído ao longo de uma espessura gera um fluxo de calor por unidade de área diretamente proporcional

ao gradiente, definindo a constante de proporcionalidade, conhecida como condutividade térmica (PARK; ALONSO; NUNES, 1999).

$$\frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dr} \quad (7)$$

em que

Q : calor transferido (W);

A : área de transferência de calor (m²);

k : condutividade térmica (W/mK);

T : temperatura (K);

r : raio (m);

$\frac{dT}{dr}$: gradiente de temperatura em relação ao raio (K/m).

A importância da condutividade térmica, quando se tem o processamento térmico de um alimento, está vinculada ao fato de que, durante um tratamento de aquecimento ou resfriamento, podem ocorrer mudanças na estrutura e nas propriedades físicas e químicas do produto, o que pode gerar grandes mudanças nesta propriedade (SWEAT, 1986). O efeito resultante da temperatura sobre a condutividade térmica não é facilmente estabelecido pelo emprego do conhecimento básico dos mecanismos de transferência de calor em sólidos, líquidos e gases. Assim, a condutividade térmica de alimentos depende tanto da sua composição como de qualquer fator que afeta o fluxo de calor através do material, como a densidade, o arranjo dos poros, a fração de gelo (PARK; ALONSO; NUNES, 1999), a temperatura e o teor de umidade (MOHSENIN, 1980).

Existem dois grandes grupos de técnicas para determinar a condutividade térmica de produtos alimentícios além de métodos indiretos. São eles:

- a) aqueles nos quais os valores locais da temperatura são constantes em relação ao tempo (métodos estacionários ou regime permanente);
- b) aqueles nos quais os valores locais da temperatura variam com relação ao tempo (métodos não estacionários ou regime transiente).

O regime permanente apresenta soluções matemáticas bastante simples, visto que o perfil de temperatura independe do tempo, ou seja, a temperatura constante é mantida em cada superfície da amostra teste, o que torna o controle de variáveis bastante preciso. Mas, como desvantagem desse método, podem-se citar o requerimento de um longo tempo para medição, a ocorrência de perdas de calor e os erros para produtos com umidade superior a 10% (PARK; MURR; SALVADEGO, 1997). No regime transiente, um perfil de temperatura é obtido em certo intervalo de tempo. Para a determinação da condutividade térmica pelo estado transiente, o método da Fonte Linear de Aquecimento vem se destacando como o mais utilizado para produtos alimentares, sendo sua popularidade devido, provavelmente, à sua relativa simplicidade, juntamente com tempos de medição relativamente curtos. No entanto, uma vez que as medições são localizadas, não é um método adequado para alguns alimentos que têm uma distribuição altamente heterogênea de fases (CARSON, 2006).

Sonda linear de aquecimento

A técnica de medição por sonda consiste em inseri-la no centro geométrico de uma amostra de alimento de dimensões consideradas infinitas e que está inicialmente a uma temperatura uniforme. A sonda é, então, submetida a uma taxa constante de aquecimento fornecida pela fonte de corrente, podendo, assim, determinar experimentalmente a condutividade térmica do alimento. Com o fornecimento de energia à sonda através de sua submissão à passagem de uma corrente elétrica, há um aquecimento do fio metálico que a compõe e dissipação de calor, o que promove um aumento da temperatura da amostra adjacente à sonda no decorrer do tempo, sendo esta elevação de temperatura medida por um sensor inserido na sonda. O aumento da temperatura em regiões próximas à sonda em função do tempo adquire um comportamento linear em escala logarítmica após um curto intervalo de tempo de análise, possibilitando, assim, a determinação da condutividade térmica (DAWSON; RIDES; NOTTAY, 2006). O esquema de uma fonte linear de aquecimento está representado na Figura 2.

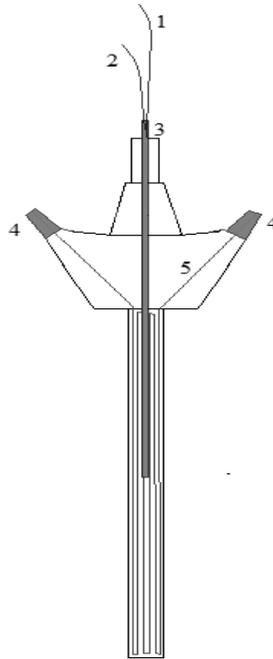


Figura 2 Modelo da sonda linear de aquecimento, sendo 1 – fio de cobre, 2 – fio de Constantan, 3 – termopar, 4 - saídas para ligação com a fonte de aquecimento, 5 – resistência interna de níquel-cromo

Mattio, Tadini e Matuda (2005) construíram uma sonda linear de aquecimento para a determinação da condutividade térmica aparente por método transiente. Testes foram realizados em materiais como o gel de ágar (0,5%) e glicerina p.a. As condutividades térmicas desses materiais foram determinadas em diferentes condições de temperatura e foram comparadas com valores de literatura.

Delgado et al. (1997) determinaram os valores da condutividade térmica de morango e espinafre, em temperaturas de congelamento, utilizando o método da sonda. Para o morango, na temperatura de $-15,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, obteve-se o valor de $0,93\text{ W/mK}$ para a condutividade térmica, com um desvio padrão de $0,60\%$ e, para o espinafre, na temperatura de $-5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, o valor da condutividade térmica foi de $0,39\text{ W/mK}$, com um desvio padrão de $0,01\%$.

Renaud et al. (1992) obtiveram valores experimentais de condutividade térmica para soluções modelo de alimentos (90% de água e 10% de sacarose, em massa) nas temperaturas de -40 °C a -10 °C. Os resultados mostraram que os valores da condutividade térmica variaram na faixa de 1,71 W/mK a 1,83 W/mK.

Oliveira et al. (2001) determinaram a condutividade térmica do suco de laranja em diferentes concentrações (11-59 °Brix), pelo método da sonda linear. Os resultados foram avaliados em relação ao conteúdo de umidade, mostrando que o suco mais concentrado apresentou condutividade de 0,2 W/mK e, para o mais diluído, foi de 0,57 W/mK.

Sarria e Honório (2004) determinaram a condutividade térmica do figo roxo-de-valinhos (*Ficus carica* L.) por meio do método transiente da fonte linear de calor. A sonda que continha a resistência elétrica e termopares foi introduzida nas frutas. Para manter constante a temperatura da fruta, montou-se um sistema de resfriamento com água. O figo apresentou valor médio de condutividade térmica de 0,52 W/mK, para o intervalo de temperatura de 5 a 21 °C.

Análise matemática do método da sonda linear de aquecimento

O procedimento usual para a medição da condutividade térmica baseia-se na aplicação de um fluxo de calor constante da fonte de aquecimento para o material, inicialmente em equilíbrio, o que gera uma variação de temperatura, T_o para T , em algum ponto do material (PARK; MURR; SALVADEGO, 1997). Essa elevação de temperatura pode ser expressa pela equação 8.

$$\Delta T = T - T_o = \frac{q}{4\pi k} \left[\ln \left(\frac{t}{t_o} \right) \right] \quad (8)$$

em que

ΔT : diferença de temperatura (K);

q : potência de aquecimento por metro (W/m);

k : condutividade térmica (W/mK);

t : tempo (s).

Para a determinação da potência de aquecimento gerada pela fonte (equação 9), utilizam-se os dados da resistência de aquecimento (níquel/cromo) presente no interior da sonda e da corrente fornecida pela fonte de aquecimento.

$$q = R \cdot i^2 \quad (9)$$

em que

q : potência de aquecimento por metro (W/m);

R : resistência elétrica (Ω/m);

i : corrente elétrica (A).

A equação 8 representa a relação entre a condutividade térmica e o deslocamento ($T - T_o$). Esse deslocamento e $\ln(t/t_o)$ estão correlacionados linearmente pela inclinação da reta, determinada pela equação 10 (BROCK et al., 2008).

$$m = \frac{q}{4\pi k} \quad (10)$$

em que

m : inclinação da reta;

q : potência de aquecimento por metro (W/m);

k : condutividade térmica (W/mK).

Dessa forma, a condutividade térmica demonstrada na equação 11 pode ser obtida a partir do coeficiente angular da equação 10.

$$k = \frac{q}{4\pi m} \quad (11)$$

Interpretação dos dados obtidos por sonda linear de aquecimento

Com os dados da temperatura e com o tempo de aquecimento da amostra, obtém-se a inclinação m da parte linear das curvas experimentais de temperatura *versus* logaritmo natural do tempo para a determinação dos valores da condutividade térmica. A representação esquemática para a determinação da condutividade pode ser visualizada no Gráfico 1.

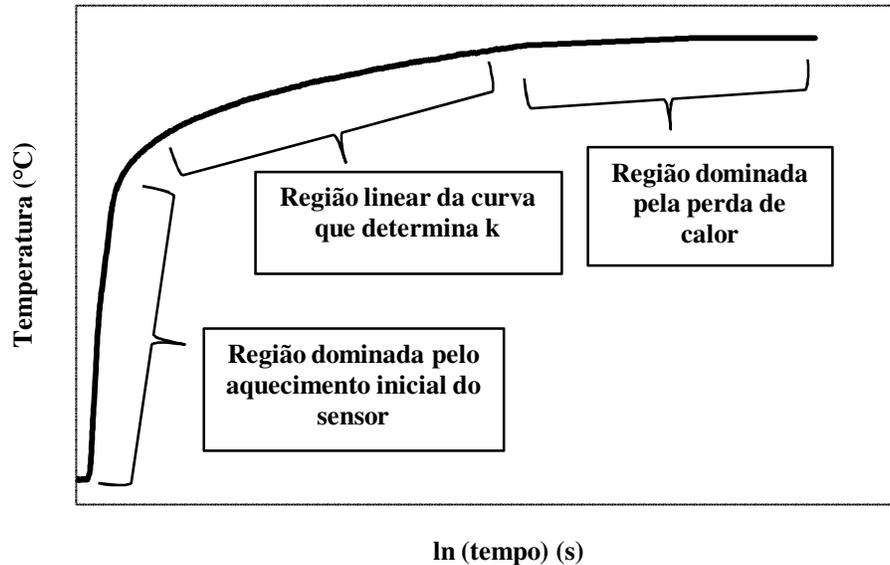


Gráfico 1 Curva experimental do perfil de temperatura *versus* ln (tempo) (DAWSON; RIDES; NOTTAY, 2006)

A inclinação da parte linear da curva é a relação $[(T - T_o)/\ln(t/t_o)]$, o que permite determinar a condutividade térmica experimental conforme a equação 8, que representa a relação entre a condutividade térmica e o deslocamento $(T - T_o)$. Esse deslocamento e $\ln(t/t_o)$ estão correlacionados linearmente pela inclinação $m = q/4\pi k$ (BROCK et al., 2008).

Modelos estruturais para a determinação da condutividade térmica

Na literatura existem modelos estruturados para a determinação da condutividade térmica de determinados tipos de alimentos e em certas faixas de temperatura, requerendo-se apenas o conhecimento de sua composição centesimal. Eles se baseiam no fato de que os alimentos são constituídos por uma mistura de substâncias puras, tais como carboidratos, proteínas, cinzas,

gordura, água e outros componentes que possuem suas condutividades térmicas próprias e que, juntas, dão origem à condutividade térmica do alimento como um todo. Para os componentes puros, diz-se que possuem uma condutividade térmica intrínseca.

A relação da condutividade térmica efetiva de um alimento com as condutividades intrínsecas de seus componentes e as frações volumétricas de cada componente podem ser descritas segundo a equação 12.

$$k_e = f(k_1, k_2, k_3, \dots, X_1, X_2, X_3, \dots) \quad (12)$$

em que k_e é a condutividade térmica efetiva do alimento e k_1, k_2, k_3, \dots são os valores das condutividades térmicas intrínsecas dos componentes do alimento e X_1, X_2, X_3, \dots são as frações volumétricas de cada componente (MIYAWAKI; PONGSAWATMANIT, 1994).

As frações volumétricas de cada componente são determinadas pela equação 13.

$$X_i = \frac{\frac{x_i}{\rho_i}}{\sum \frac{x_i}{\rho_i}} \quad (13)$$

em que x_i é a fração mássica de cada componente e $\sum X_i = 1$.

As equações para a determinação das condutividades térmicas dos componentes puros estão apresentadas na Tabela 5 e, para a água e gelo, na Tabela 6. Para a densidade, as equações foram apresentadas na Tabela 3.

Tabela 5 Modelos para condutividade térmica dos componentes dos alimentos ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$)

Componentes	Condutividade térmica (W/mK)
Proteína	$k = 1,7881 \times 10^{-1} + 1,1958 \times 10^{-3}T - 2,7178 \times 10^{-6}T^2$
Gordura	$k = 1,8071 \times 10^{-1} - 2,7604 \times 10^{-3}T - 1,7749 \times 10^{-7}T^2$
Carboidrato	$k = 2,0141 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3}T - 4,3312 \times 10^{-6}T^2$
Fibra	$k = 1,8331 \times 10^{-1} + 1,2497 \times 10^{-3}T - 3,1683 \times 10^{-6}T^2$
Cinzas	$k = 3,2962 \times 10^{-1} + 1,4011 \times 10^{-3}T - 2,9069 \times 10^{-6}T^2$

Fonte: (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2002)

Tabela 6 Modelos para condutividade térmica da água e gelo ($-40\text{ °C} \leq T \leq 150\text{ °C}$)

Componentes	Condutividade térmica (W/mK)
Água	$k_w = 5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3}T - 6,7036 \times 10^{-6}T^2$
Gelo	$k_{gelo} = 2,2196 - 6,2489 \times 10^{-3}T + 1,0154 \times 10^{-4}T^2$

Fonte: (ASHRAE, 2002)

Modelo paralelo

Nesse modelo, a condutividade térmica é calculada pela somatória do produto da condutividade térmica pela fração volumétrica de cada componente, segundo a equação 14 (MIYAWAKI; PONGSAWATMANIT, 1994). Para um sistema multifase em paralelo, conforme Figura 3, a condutividade térmica efetiva é calculada como

$$k_{pa} = \sum_{i=1}^n X_i k_i \quad (14)$$

em que

k_{pa} : condutividade térmica paralela (W/mK);

X : fração volumétrica dos componentes;

k : condutividade térmica dos componentes (W/mK);

i : componente puro (proteína, cinzas, fibra, carboidrato, gordura, água);

n : número de componentes.

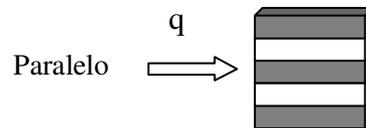


Figura 3 Diagrama esquemático do modelo paralelo

Modelo série

Nesse modelo, as fases encontram-se em série ou na direção perpendicular ao fluxo de calor, o que acarreta alta resistência ao fluxo de calor. Para um sistema multifase em série, mostrado na Figura 4, a condutividade térmica é descrita pela equação 15 (MIYAWAKI; PONGSAWATMANIT, 1994).

$$\frac{1}{k_{se}} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{k_i} \quad (15)$$

em que

k_{se} : condutividade térmica em série (W/mK);

X : fração volumétrica dos componentes;

k : condutividade térmica dos componentes (W/mK);

i : componente puro (proteína, cinzas, fibra, carboidrato, gordura, água);

n : número de componentes.

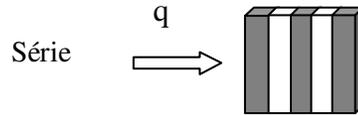


Figura 4 Diagrama esquemático do modelo em série

Modelo Maxwell-Eucken ou disperso

Esse modelo é o resultado de uma combinação entre os modelos em série e em paralelo, por isso apresenta uma resistência intermediária entre os dois. Seu esquema pode ser visualizado na Figura 5 e a condutividade térmica é descrita como na equação 16 (MIYAWAKI; PONGSAWATMANIT, 1994).

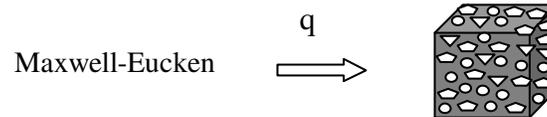


Figura 5 Diagrama esquemático do modelo de Maxwell-Eucken ou disperso

$$k_{me} = k_c \left\{ \frac{k_d + 2k_c - 2X_d(k_c - k_d)}{k_d + 2k_d + X_d(k_c - k_d)} \right\} \quad (16)$$

em que

k_{me} : condutividade térmica do modelo de Maxwell-Eucken (W/mK);

X : fração volumétrica;

k : condutividade térmica (W/mK);

em que os subscritos se referem a

c : fase contínua;

d : fase dispersa.

Para todos os modelos, há a necessidade de estimar a fração de gelo presente na amostra, a qual depende da temperatura em que se está analisando. E, para a determinação da fração de gelo, é necessário o conhecimento da temperatura de início de congelamento, a qual pode ser obtida por meio de modelos matemáticos de predição ou experimentalmente.

De acordo com Resende e Silveira Júnior (2002), no estado congelado, um sistema é composto de duas fases: a fase gelo e a fase água não congelada contendo os solutos. Para a aplicação do modelo de Maxwell-Eucken ou disperso em sistemas congelados, é considerado que o gelo encontra-se disperso na segunda fase, composta de água não congelada e solutos.

3.2.4 Difusividade térmica

A difusividade térmica de um meio ou produto, representada por α (com unidade no SI, m^2/s), indica o quão rápido o calor se propaga através de uma amostra durante o aquecimento ou resfriamento (RAHMAN, 2009), ou seja, é a razão entre a habilidade em transferir calor e a capacidade em armazená-lo. Como a taxa na qual o calor se difunde por condução através de um material depende da difusividade térmica, geralmente, ela é obtida mediante relação existente entre as duas propriedades, a densidade e o calor específico, como demonstrado na equação 17.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \times c_p} \quad (17)$$

em que

α : difusividade térmica (m^2/s);

k : condutividade térmica (W/mK);

ρ : densidade (kg/m^3);

c_p : calor específico (kJ/kg.K).

Materiais com alto valor de difusividade térmica respondem rapidamente a mudanças térmicas em seu ambiente, enquanto matérias de pequenos valores de difusividade respondem mais lentamente, demorando a alcançar um novo estado de equilíbrio.

3.3 Temperatura de início de congelamento

O ponto inicial de congelamento de alimentos é uma das propriedades mais importantes e é necessária na predição de propriedades termofísicas por causa da descontinuidade exibida nesse ponto (RAHMAN, 2009). A temperatura inicial de congelamento é aquela em que os cristais de gelo aparecem pela primeira vez em um ponto onde ambas as fases, líquido (água) e sólido (cristal de gelo), coexistem em equilíbrio. Os cristais se separam da solução e provocam a concentração cada vez maior do soluto na solução remanescente. Sendo os alimentos sistemas de multicomponentes, em que há minerais e compostos orgânicos, incluindo ácidos, gorduras, gases, proteínas, sais e açúcares, dispersos em água, que é o principal componente, a temperatura em que o fenômeno de formação dos cristais começa a acontecer é ligeiramente inferior ao ponto de congelamento da água pura (Gráfico 2) e é definida como a temperatura de início de congelamento do alimento (RAHMAN, 2009). Segundo Carson (2006), para alimentos com alto teor de umidade, como frutas frescas, legumes, carne e produtos do mar, a temperatura de início de congelamento está, normalmente, na faixa entre $-0,5\text{ }^\circ\text{C}$ e $-3\text{ }^\circ\text{C}$.

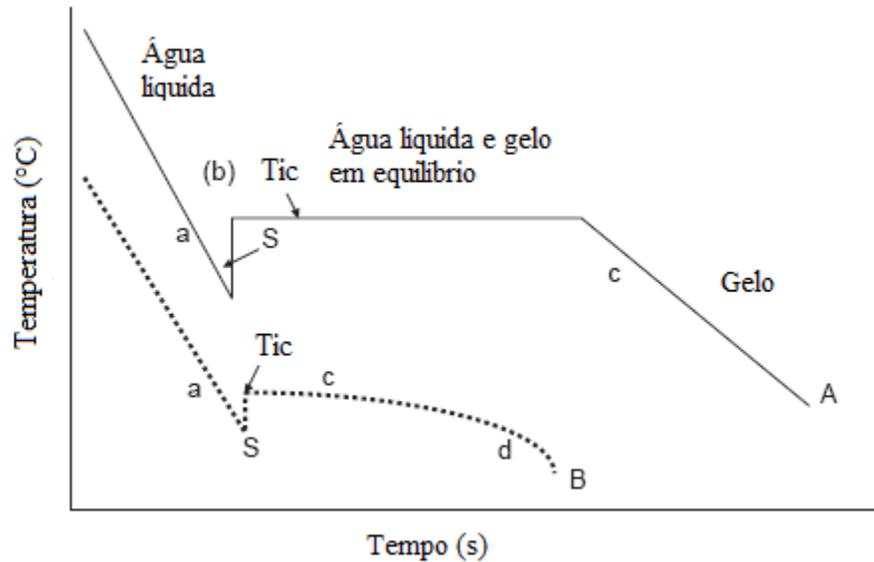


Gráfico 2 Curvas típicas de resfriamento. A: água, B: alimentos, S: sub-resfriamento. a: temperatura de cristalização do gelo, b: equilíbrio ou ponto de início de congelamento, c: fim do congelamento, d: formação do primeiro cristal de soluto (Adaptado de RAHMAN, 2009)

Embora existam várias informações sobre propriedades térmicas e ponto de início de congelamento de alimentos em geral, a grande variação na composição, na origem e no processamento de alimentos requer determinação experimental para cada tipo de alimento (RAHMAN, 2009). Diferentes tipos de aparelhos e equipamentos são utilizados para medir o ponto de congelamento, sendo os métodos de calorimetria diferencial de varredura (DSC) e o método de curva de resfriamento os mais comumente usados para alimentos (RAHMAN, 2009).

3.3.1 Método da curva de resfriamento

De acordo com Rahman (2009), um método amplamente utilizado para a determinação da temperatura de início de congelamento é a curva de resfriamento, por meio da aquisição de dados experimentais de temperatura em função do tempo durante o congelamento, sendo um método bastante simples e preciso.

3.3.2 Método por calorimetria diferencial de varredura (DSC)

A determinação da temperatura de início de congelamento por DSC se dá indiretamente (TOCCI; MASCHERONI, 1998). O início, o pico e o final do congelamento podem ser determinados a partir da exotérmica de calor. No método por DSC, a aquisição dos dados também se dá de forma rápida e simples, porém, com menor precisão, mesmo quando o DSC for calibrado com materiais puros e de ponto de fusão conhecidos (TOCCI; MASCHERONI, 1998).

Tocci e Mascheroni (2008) determinaram a temperatura de início de congelamento de kiwis frescos e desidratados osmoticamente por meio da metodologia por DSC. A temperatura foi determinada como a posição do pico de descongelamento no termograma (calor específico *versus* temperatura).

3.4 Fração de água congelada

Na medida em que um alimento é congelado, não se observa uma mudança de fase abrupta; em vez disso, a transição de água líquida para gelo ocorre num intervalo de temperatura (RAO; RIZVI; DATTA, 2005). A maioria dos produtos alimentares começa a congelar entre $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. A principal

mudança na fase ocorre em temperaturas de 4 a 10 °C abaixo da temperatura inicial de congelamento e o processo de mudança de fase só pode ser considerado como finalizado quando as temperaturas caem abaixo de -40 °C (RAO; RIZVI; DATTA, 2005).

Durante o congelamento, a diminuição da temperatura provoca o aumento da fração de água congelada do alimento. Essa fração é tanto maior quanto menor for a temperatura a que o alimento está submetido. O acréscimo na fração de água congelada ocorre com a contínua diminuição da temperatura e o conseqüente decréscimo da fração de água livre não congelada. Esta última fração representa a água contida no alimento que está intimamente ligada a compostos do mesmo e que não pode ser separada da solução ou não pode ser congelada a uma determinada condição de temperatura. A fração de água congelada afeta muito a condutividade térmica de materiais congelados, porque a condutividade térmica do gelo é quatro vezes maior do que a da água líquida (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2002).

Em American Society of Heating (2002), é apresentado um modelo proposto por Chen para a previsão da fração de gelo (x_{gelo}) em um alimento, (equação 18).

$$x_{gelo} = \frac{x_s R T_{icw}^2 (T_{icA} - T)}{M_s L T_{icA} T} \quad (18)$$

em que

x_s : fração mássica de sólidos;

M_s : peso molecular dos sólidos solúveis (kg/ kg.mol);

R : constante universal dos gases (8,314 kJ/ kg.mol.K);

T_{icw} : temperatura de congelamento da água pura (273,15 K);

L : calor latente de fusão da água a 273,15 K (333,13 kJ/kg);

T_{icA} : temperatura de início de congelamento da amostra (K);

T : temperatura do alimento (K).

A massa molecular relativa ao teor de sólidos solúveis no alimento pode ser estimada como segue na equação 19.

$$M_s = \frac{x_s RT_{icw}^2}{-(x_{wo} - x_b)LT_{icA}} \quad (19)$$

em que x_{wo} é a fração mássica de água no alimento não congelado e x_b é a fração mássica de água ligada. A água ligada é a água presente no alimento que está ligado aos seus sólidos e, portanto, não está disponível para congelamento (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, 2002). A fração mássica de água ligada pode ser estimada pela equação 20.

$$x_b = 0,4x_p \quad (20)$$

em que x_p é a fração mássica de proteína no alimento.

Em American Society of Heating (2002), combinando-se as equações 18 e 19, um método simples pode ser utilizado para a determinação da fração mássica de gelo, como representado na equação 21.

$$x_{gelo} = (x_{wo} - x_b) \left[1 - \frac{T_{icA}}{T} \right] \quad (21)$$

American Society of Heating (2002) apresenta os modelos empíricos propostos por Tchigeov para estimar a fração mássica de gelo em alimentos como carne, peixe, leite, ovo, frutas e vegetais. Estes modelos estão representados pelas equações 22 e 23.

$$x_{gelo} = \frac{1,105x_{wo}}{1 + \frac{0,8765}{\ln(T_{icA} - T + 1)}} \quad (22)$$

$$\frac{x_{gelo}}{x_{wo}} = 1 - \frac{\exp(-9,703 \times 10^{-3}T_{icA} + 4,794 \times 10^{-6}T_{icA}^2) - 1}{\exp(-9,703 \times 10^{-3}T + 4,794 \times 10^{-6}T^2) - 1} \quad (23)$$

A fração de água livre não congelada pode ser relacionada com o ponto de início de congelamento dos alimentos, como foi descrito por Heldman e Lund (1992) (equação 24).

$$\ln X_{wo}(T) = \frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_{icw}} - \frac{1}{T} \right) \quad (24)$$

em que

T_{icw} : ponto de congelamento da água (273,15K);

T : temperatura do alimento (K);

R : constante universal dos gases (8,314 kJ/kg.mol.K);

L : calor latente de fusão da água (333,6 kJ/kg).

A fração molar de água não congelada (X_{wo}) é determinada também pela equação 25.

$$X_{wo}(T) = \frac{\frac{m_{wo}(T)}{M_w}}{\frac{m_{wo}(T)}{M_w} - \frac{m_s}{M_s}} \quad (25)$$

em que $m_{wo}(T)$ é a massa de água não congelada na temperatura (T), m_s a massa de sólidos e M_w e M_s a massa molecular de água e sólidos, respectivamente.

3.5 Reologia

Reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de materiais, ou seja, o modo como os materiais respondem à aplicação de uma tensão ou deformação. Tem a finalidade de prever a força necessária para causar uma deformação ou escoamento em um corpo. Essa força pode ser de compressão, tração ou cisalhamento (VIANA, 2010). A deformação ocorre no caso de a matéria estar no estado sólido e o escoamento, quando a matéria está no estado líquido. A propriedade reológica de interesse no caso dos sólidos é a elasticidade e, no caso dos líquidos, é a sua viscosidade (DINIZ, 2009).

Há numerosas áreas nas quais os dados reológicos são necessários na indústria de alimentos, sendo importantes para o controle e o dimensionamento de processos industriais, envolvendo uma ampla gama de equipamentos, como tubulações, bombas, extrusoras, misturadores, trocadores de calor, homogeneizadores, viscosímetros; no acondicionamento em tambores, estocagem a granel e transporte; na determinação de ingredientes no desenvolvimento de produtos; no controle de qualidade de produtos finais; em testes de vida de prateleira e na avaliação da textura de alimentos por correlação com os dados sensoriais (STEFFE, 1996).

A complexidade envolvida no comportamento reológico dos materiais é elevada, pois, além de sua natureza variada, eles podem ter comportamentos diferentes em virtude das condições a que se encontram submetidos (RODRIGUES et al., 2003).

Os fluidos são classificados de acordo com seu comportamento reológico por meio da análise da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação e para condições de temperatura (STEFFE, 1996). Reologicamente, os fluidos são divididos em duas categorias: newtonianos e não newtonianos (DINIZ, 2009). Na Figura 6 é apresentada uma classificação geral para o comportamento reológico dos fluidos.

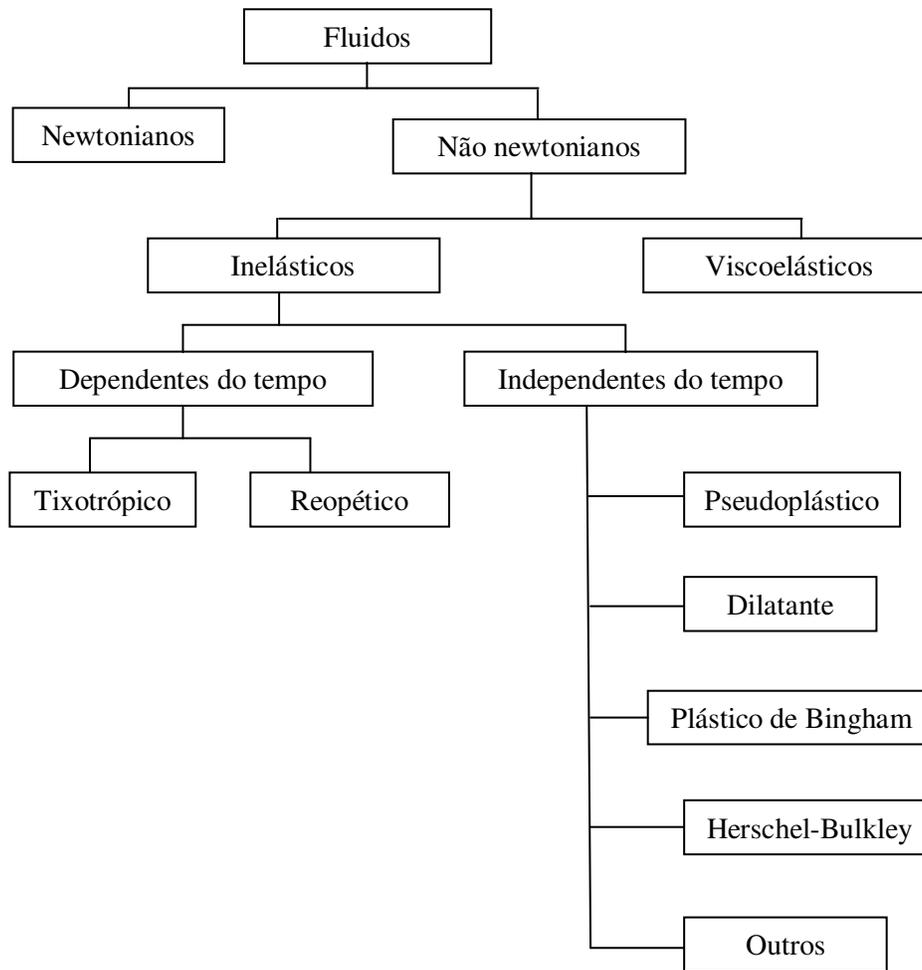


Figura 6 Classificação geral do comportamento reológico dos fluidos (OLIVEIRA, 1997)

Os fluidos newtonianos são aqueles que apresentam uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, independente da taxa de deformação e da tensão de cisalhamento inicial, dependendo somente de sua composição e da temperatura. Sua viscosidade é constante com a taxa de deformação. Para estes fluidos, o escoamento acontece logo após a tensão ser

aplicada, portanto, não resistem sequer a uma força infinitesimal, por isso escoam e se moldam ao recipiente que os contém (PELEGRINE, 1999).

A equação 26 é a representação matemática do comportamento reológico dos fluidos newtonianos.

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \quad (26)$$

em que

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

η : viscosidade absoluta (Pa.s);

$\dot{\gamma}$: taxa de deformação (s^{-1}).

Os fluidos que não seguem um comportamento newtoniano são caracterizados por uma relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação não linear. Nos fluidos não newtonianos, que não são homogêneos e nem puros (como grande parte dos alimentos), o termo viscosidade absoluta (η) é substituído por viscosidade aparente (η_a), como demonstrado na equação 27 (PELEGRINE, 1999).

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \neq \text{constante} \quad (27)$$

em que

η_a : viscosidade aparente (Pa.s);

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

$\dot{\gamma}$: taxa de deformação (s^{-1}).

3.5.1 Dependentes do tempo

Os fluidos dependentes do tempo têm um comportamento chamado de histerese, isto é, a viscosidade dos sistemas sujeitos a uma força por um intervalo de tempo não é a mesma, quando medida no mesmo tempo, depois de cessada a ação desta força (DINIZ, 2009).

Tixotrópico

Esse tipo de fluido apresenta comportamento semelhante ao pseudoplástico, entretanto, diferencia-se, pois a viscosidade aparente não está relacionada somente com a taxa de deformação, mas também com o tempo de aplicação da tensão. No entanto, Diniz (2009) afirma que, após o repouso, tendem a retornar à condição inicial de viscosidade. Exemplos desse fluido são pastas de frutas, gelatinas, manteigas e iogurte.

Reopético

Em Diniz (2009), para fluidos reopéticos, um acréscimo na viscosidade aparente é observado com o aumento da taxa de deformação. Assim como os fluidos tixotrópicos, após o repouso, o fluido tende a retornar ao seu comportamento reológico inicial. Esse tipo de comportamento não é comum em alimentos, mas pode ocorrer em soluções de amido altamente concentradas.

3.5.2 Independentes do tempo

Pseudoplástico

Neste tipo de fluido, a aplicação de uma taxa de deformação crescente gera um aumento mais que proporcional na tensão de cisalhamento, mas a curva começa na origem (BOURNE, 2002). Molhos para saladas são um bom exemplo desse tipo de fluido. Segundo Diniz (2009), a viscosidade aparente de um fluido pseudoplástico é dependente da tensão de cisalhamento, demonstrando um decréscimo na viscosidade quando há um aumento na tensão. Esses fluidos em repouso apresentam um estado desordenado e, quando submetidos a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. Quanto maior a tensão aplicada, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente

Dilatante

O comportamento desse tipo de fluido para tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação começa na origem, mas é caracterizado por incrementos maiores na taxa de deformação do que na tensão de cisalhamento. Exemplos podem ser citados, como alguns xaropes de chocolate e amido de milho em água. Esse tipo de fluido só é encontrado em líquidos que contêm uma alta proporção de partículas rígidas insolúveis em suspensão. Fluido dilatante é bastante raro na indústria de alimentos e extremamente rara em produtos alimentares acabados (BOURNE, 2002).

Plástico de Bingham

Para esse tipo de fluido, uma tensão mínima de cisalhamento, conhecida como a "elasticidade", deve ser excedida para que o escoamento comece. Caso contrário, ele se comportará como um sólido. É frequentemente encontrado em alimentos, como ketchup, maionese, creme chantilly, clara em neve e margarina (BOURNE, 2002).

No Gráfico 3 estão apresentadas as curvas típicas de escoamento para fluidos newtonianos e os não newtonianos: pseudoplástico, dilatante, plástico de Bingham e Herschel-Bulkley.

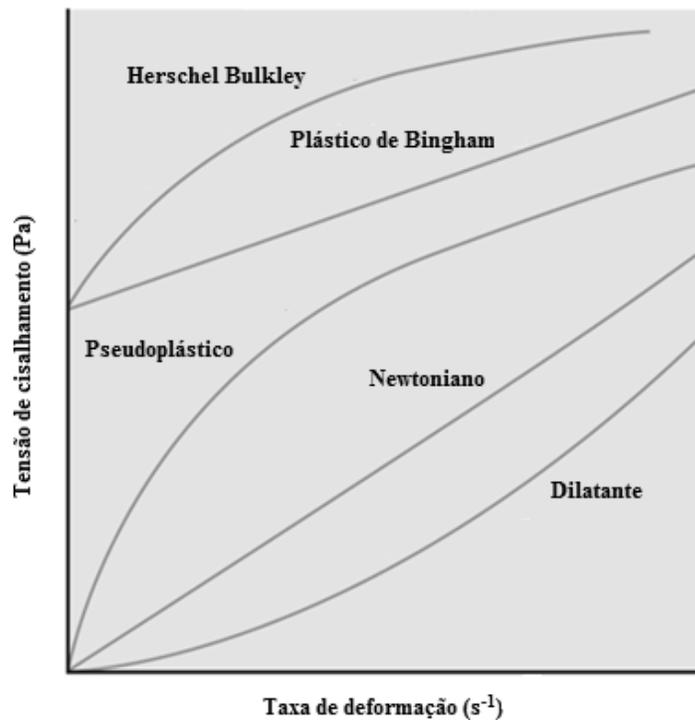


Gráfico 3 Tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação para diversos tipos de fluidos - Adaptado de BOURNE (2002)

3.5.3 Modelos reológicos

Para a caracterização reológica, são utilizados modelos empíricos que, geralmente, são utilizados para relacionar os dados de tensão de cisalhamento e taxa de deformação, facilitando os cálculos de engenharia.

A maioria dos alimentos fluidos não segue um simples modelo reológico newtoniano. Geralmente, apresentam propriedades reológicas dependentes da tensão aplicada, podendo depender também da duração do cisalhamento (PELEGRINE, 1999).

Na literatura são encontrados vários modelos reológicos, sendo os mais populares e comumente utilizados os de Ostwald-de-Waele, Herschel-Bulkley, Casson e Mizrahi-Berk (BRANCO, 1995; VIANA, 2010).

Ostwald-de-Waele (Lei da potência)

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (28)$$

em que

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

K : índice de consistência (Lei da Potência) (Pa.s);

$\dot{\gamma}$: taxa de deformação (s^{-1});

n : índice de comportamento de fluido (Lei da Potência).

O comportamento do fluido se apresenta como dilatante quando (n) for maior do que uma unidade e, quando menor que a unidade, o modelo descreve o comportamento de fluido pseudoplástico. Quando n for igual à unidade, o modelo representa um comportamento newtoniano, sendo $K = \eta_a$.

Herschel-Bulkley

Herschel-Bulkley é um modelo generalizado de um fluido não newtoniano, no qual a tensão de cisalhamento relacionada com a taxa de deformação segue um comportamento não linear. Três parâmetros caracterizam esta relação, sendo o índice de consistência (K_H) uma constante de proporcionalidade simples; índice de comportamento de fluido (n_H), um parâmetro que mede o grau de pseudoplasticidade e tensão de cisalhamento inicial (τ_o), que é a tensão experimentada pelo fluido antes de começar a fluir. O modelo de Herschel-Bulkley está representado na equação 29 (BOURNE, 2002).

$$\tau - \tau_o = K_H \dot{\gamma}^{n_H} \quad (29)$$

em que

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

τ_o : tensão de cisalhamento inicial (Pa);

K_H : índice de consistência (Herschel-Bulkley) (Pa.s);

$\dot{\gamma}$: taxa de deformação (s^{-1});

n_H : índice de comportamento de fluido (Herschel-Bulkley).

A equação para o modelo de Herschel-Bulkley é da mesma forma que a equação do modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da potência), mas com a adição do termo de tensão inicial (τ_o), que significa que, para haver escoamento do fluido, se torna necessária a aplicação de uma força que consiga romper esta tensão inicial (BOURNE, 2002).

Dentre os modelos utilizados para descrever o comportamento reológico da polpa de jenipapo, o plástico de Bingham e o de Herschel-Bulkley proporcionaram melhores parâmetros na maior parte das faixas de temperatura e

concentração estudadas, apresentando valores para o coeficiente de determinação (R^2) superiores a 0,90 (SILVA, 2008).

Casson

$$\tau^{0,5} = K_{oC} + K_C \dot{\gamma}^{0,5} \quad (30)$$

em que

τ_{oC} : tensão de cisalhamento inicial de Casson (Pa);

K_C : viscosidade plástica de Casson (Pa.s).

Branco e Gasparetto (2005) estudaram o comportamento reológico da mistura de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura, à temperatura de 60 °C, tendo as curvas de escoamento sido ajustadas ao modelo de Casson.

Mizrahi-Berk

Este é uma modificação do modelo de Casson, no qual Mizrahi-Berk modificaram a equação original para descrever a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, em suco de laranja concentrado (RAO; RIZVI; DATTA, 2005). O desenvolvimento foi baseado no modelo de uma suspensão de partículas interagindo em um solvente pseudoplástico. A equação 31 foi desenvolvida.

$$\tau^{0,5} - K_{oM} = K_M \dot{\gamma}^{n_M} \quad (31)$$

em que

τ : tensão de cisalhamento (Pa);

K_{oM} : índice de consistência (Mizrahi-Berk) (Pa.s);

n_M : índice de comportamento de fluido (Mizrahi-Berk).

O comportamento reológico da polpa de manga integral foi avaliado por Bezerra, Queiroz e Gasparetto (2001), em que as curvas de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação foram mais bem ajustadas pelo modelo de Mizrahi-Berk.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção da polpa

A acerola foi adquirida no mercado local da cidade de Lavras, MG e a obtenção da polpa foi realizada como descrito no fluxograma da Figura 7.

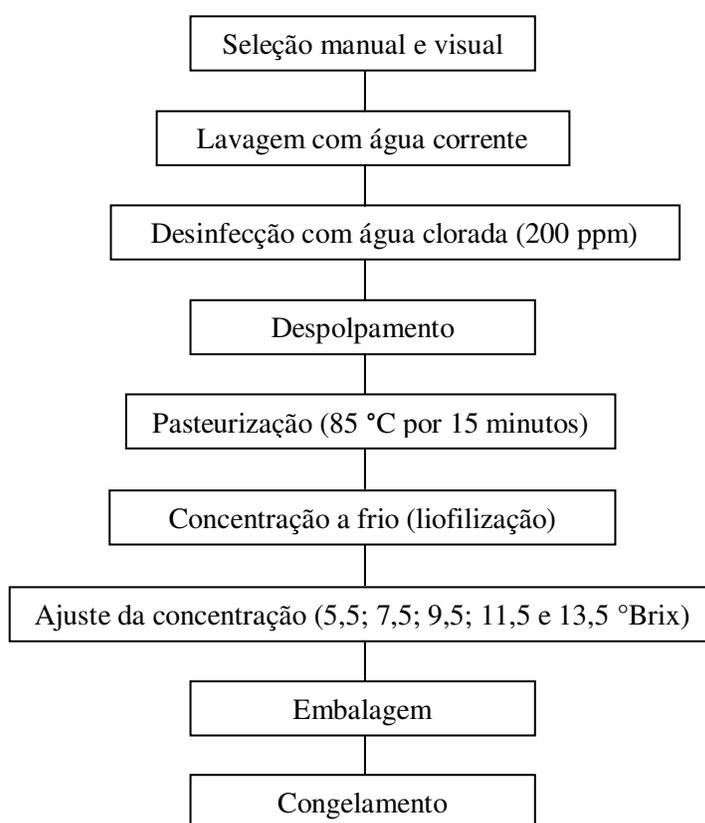


Figura 7 Fluxograma da obtenção da polpa de acerola

O despolpamento da acerola foi realizado na Planta Piloto de Processamento de Produtos Vegetais, no Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras (UFLA), utilizando-se

despolpadeira elétrica (Macanuda, Joinville, Santa Catarina). A pasteurização foi realizada em banho-maria, por 15 minutos, a 85 °C, no intuito de garantir uma integridade microbiológica da polpa e evitar alterações durante o experimento. Esta também foi uma etapa realizada com o objetivo de aproximar ao máximo a polpa do estudo a uma obtida industrialmente. Posteriormente, parte da polpa inicialmente obtida com 7,5 °Brix foi retirada e diluída até 5,5 °Brix e outra parte foi concentrada em liofilizador Edwards alto vácuo (Modelo - L4KR), retirando-se o produto após 34 horas, antes de estar totalmente liofilizado, obtendo-se uma concentração aproximada de 14,0 a 15,0 °Brix. Após secagem parcial, concentrações foram ajustadas para 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix, por meio da adição de água destilada à polpa.

Após ajuste das concentrações, as polpas foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e armazenadas em câmara fria, a -25 °C. Cada concentração foi dividida em porções adequadas, prontas para serem submetidas às análises físicas e químicas, reológicas e termofísicas. As porções de polpa foram: para a reologia, 350 g; para a condutividade térmica, 400 g; para a temperatura de início de congelamento, 250 g e, para as análises físico-químicas e de composição centesimal, 400 g.

Um dia antes de serem utilizadas, as polpas foram colocadas em refrigerador, para o descongelamento.

4.2 Análises físicas e químicas

As análises foram realizadas em triplicata, com a polpa *in natura* e nas diferentes concentrações de sólidos solúveis previamente determinadas.

4.2.1 Umidade

A umidade foi determinada segundo técnica gravimétrica, na qual foi empregado o calor em estufa, à temperatura de 105 °C, até a obtenção de peso constante, de acordo com métodos oficiais da Association of Official Analytical Chemists (1996).

4.2.2 Sólidos solúveis

A determinação de sólidos solúveis foi realizada por meio da leitura direta em refratômetro manual (Atago – N1) e expresso em °Brix.

4.2.3 Proteínas

O teor de proteínas foi determinado pelo método de Kjeldahl, pela determinação do nitrogênio total da amostra, segundo Association of Official Analytical Chemists (1996).

4.2.4 Gorduras

A determinação do teor de gorduras foi realizada por extração direta em Soxhlet, segundo o Instituto Adolfo Lutz (2008).

4.2.5 Fibras

A determinação de fibra foi realizada seguindo-se a metodologia proposta pela Association of Official Analytical Chemists (1996).

4.2.6 Cinzas

A determinação de cinzas foi realizada segundo método 940.26, da Association of Official Analytical Chemists (1996).

4.2.7 Carboidratos

A fração glicídica foi determinada por diferença entre o total (100%) e a porcentagem de umidade, extrato etéreo, proteína, fibra bruta e cinzas.

4.3 Determinação da temperatura de início de congelamento (T_{ic})

A temperatura de início de congelamento foi avaliada diretamente pelo método da curva de resfriamento. As análises experimentais foram realizadas em triplicata, por meio da aquisição de dados da queda de temperatura em função do tempo, durante o congelamento das polpas. Para aquisição dos dados, foi utilizado um termopar Omega Engineering Inc. USA (AWG 30) inserido no centro do béquer com a amostra, juntamente com um termômetro, para posterior ajuste da temperatura. Para resfriamento da polpa, foi utilizado um banho ultratermostato (Nova Ética – modelo 521/3DE), com controle digital de temperatura, e os dados de queda da temperatura com o tempo foram registrados por meio de um sistema de condicionamento de sinais (National Instruments Mod. SCXI – Hungria), utilizando-se o software Lab View 8.5, com intervalos de 1segundo entre cada registro. Na Figura 8 mostra-se o aparato experimental para a determinação da temperatura de início de congelamento das polpas nas diferentes concentrações.



Figura 8 Aparato experimental para a determinação da temperatura de início de congelamento

As amostras foram colocadas em béqueres de 250 mL preenchidos com um volume de 200 mL de polpa, que se encontrava à temperatura ambiente. O banho foi ajustado, primeiramente, em $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, quando a polpa em seu interior atingiu $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, deu-se início à aquisição dos dados. Quando a temperatura da amostra atingiu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, o banho teve sua temperatura abaixada para $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, após a detecção da temperatura de início de congelamento, o banho foi fixado em $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este abaixamento gradual da temperatura do banho foi realizado no intuito de se detectar o sub-resfriamento e, com isso, ter uma maior visibilidade da T_{ic} .

4.4 Determinação da fração de água congelada

Para avaliação da fração de água congelada presente nas polpas nas várias temperaturas de análise, foram utilizadas as equações 21, 22, 23, 24 e 25. Após análise, a melhor equação foi utilizada nos modelos para determinação da densidade, calor específico e condutividade térmica.

4.5 Construção e calibração da sonda

A sonda foi construída com uma agulha hipodérmica de 0,6 mm de diâmetro externo e 70 mm de comprimento, no interior da qual foi colocada uma resistência de aquecimento (níquel-cromo) de 0,36 m de comprimento e 0,08 mm de diâmetro, juntamente com um pequeno termopar Omega Engineering Inc. USA (AWG 30), localizado exatamente no centro da sonda. Estes componentes foram isolados com resina epoxi. Na Figura 9 observa-se a sonda utilizada para as medições da condutividade térmica.



Figura 9 Sonda linear de aquecimento, construída para a determinação da condutividade térmica

A sonda foi calibrada em relação à temperatura medida com um termômetro inserido na amostra juntamente com a sonda. O banho foi ajustado às temperaturas de -30, -25, -20, -15, -10, -5 e 0 °C e, para cada temperatura,

foram correlacionados os valores medidos pelo termômetro e os valores adquiridos através da sonda. Equações lineares foram obtidas, as quais foram utilizadas no ajuste da temperatura. A relação entre as medições é apresentado no Gráfico 4.

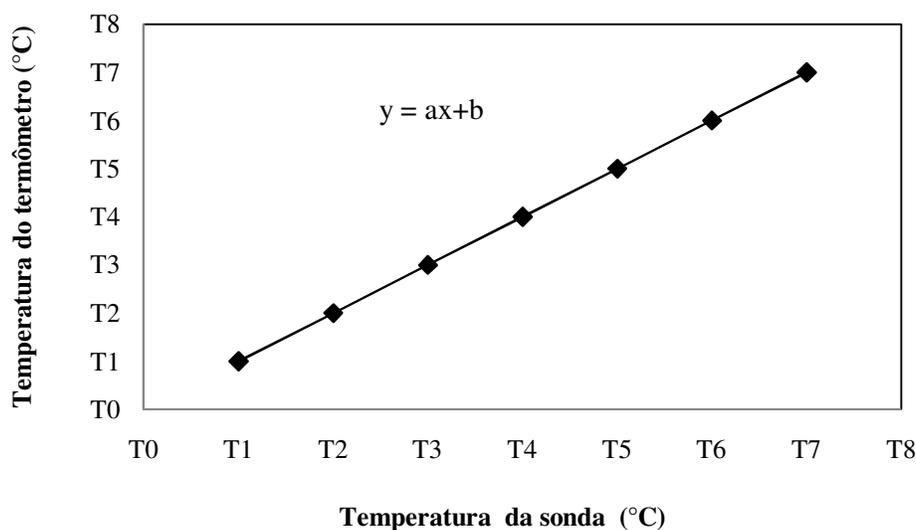


Gráfico 4 Perfil de temperatura para a calibração das sondas

Além da calibração em relação à temperatura, a sonda foi calibrada com a utilização de solução de sacarose 10% (massa/volume de H₂O), que tem a condutividade térmica conhecida. Sua condutividade foi determinada nas mesmas condições utilizadas para a polpa e, então, comparadas com valores encontrados na literatura, de 1,81; 1,78; 1,74; 1,71 e 1,65 W/mK, para a condutividade térmica da sacarose 10%, nas temperaturas de -30, -25, -20, -15 e -10 °C, respectivamente (RENAUD et al., 1992).

Segundo Pereira et al. (2013), com a calibração das sonda é possível determinar um fator f , mostrado na equação 32 e com a média dos fatores se obtém uma correção para a condutividade térmica experimental da polpa.

$$f = \frac{k_{teórico}}{k_{experimental}} \quad (32)$$

4.6 Determinação das propriedades termofísicas

A etapa experimental de determinação das propriedades termofísicas foi realizada no Laboratório de Refrigeração de Alimentos, no Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras.

4.6.1 Condutividade térmica

As medidas da condutividade térmica foram realizadas utilizando-se o método da sonda com aquecimento. O esquema de todo o aparato está demonstrado na Figura 10. No intuito de estabilizar e manter as amostras em baixas temperaturas, foi montado um sistema de resfriamento com solução alcoólica (Etanol 60 °GL), utilizando-se de um banho ultratermostato (Nova Ética – modelo 521/3DE), com controle digital de temperatura. As amostras de polpa foram colocadas em béqueres de vidro de 250 mL e estes imersos no banho.

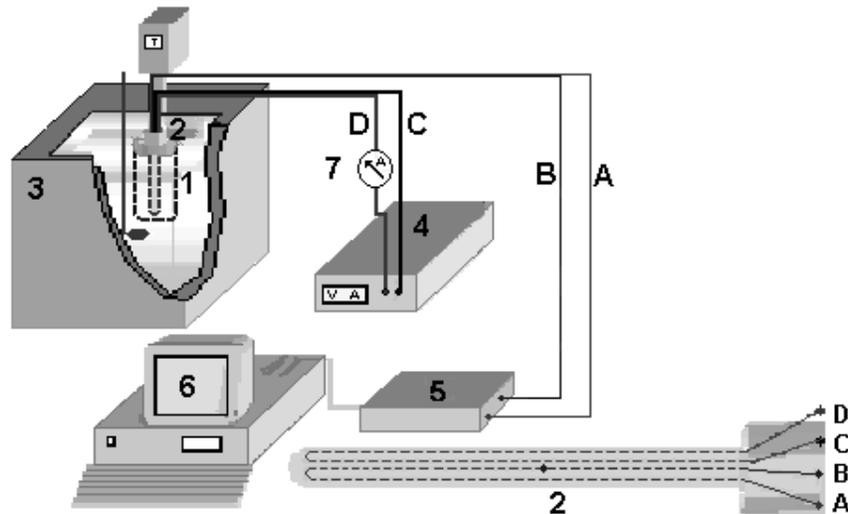


Figura 10 Montagem experimental da sonda com aquecimento para a determinação da condutividade térmica das polpas: 1) amostra; 2) sonda com aquecimento; 3) banho ultratermostato; 4) fonte de corrente; 5) sistema de condicionamento de sinais 6) microcomputador; 7) amperímetro; A) fio constantan; B) fio cobre; C e D) alimentação da resistência

A sonda foi inserida no centro geométrico da amostra da polpa que estava, inicialmente, a uma temperatura uniforme dentro do banho ultratermostato. Quando a temperatura interna da polpa (determinada pelo termopar) atingiu $T \pm 1$ °C, a sonda foi, então, submetida a uma potência constante de aquecimento fornecida pela fonte de corrente. Uma potência de aquecimento linear de 3,412 W/m foi obtida por meio da equação 9. Por essa equação, obteve-se a potência conhecendo-se os dados da resistência de aquecimento níquel/cromo ($21,325 \Omega/m$ – Omega Engineering Inc. USA) e a corrente (0,4A), fornecida pelo amperímetro ligado em série com a fonte.

A aplicação da potência na sonda gerou um aumento de temperatura no interior da polpa, o qual foi registrado pelo sistema de condicionamento de

senais (National Instruments Mod. SCXI – Hungria), utilizando o software Lab View 8.5, com intervalos de 1 segundo entre cada registro.

Com os dados da temperatura e de tempo de aquecimento da amostra, foi obtida uma inclinação m da parte linear da curva experimental de temperatura *versus* logaritmo natural do tempo, para a determinação dos valores da condutividade térmica que foram mensurados em triplicata.

A condutividade térmica efetiva da polpa foi, posteriormente, comparada aos valores preditos pelos modelos matemáticos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken e um erro percentual foi calculado por meio da equação 33. Esse erro permitiu indicar em qual modelo melhor se ajustou às condutividades térmicas experimentalmente mensuradas.

$$Erro (\%) = \left| \frac{(k_{exp} - k_{pred})}{k_{exp}} \right| 100 \quad (33)$$

em que

k_{exp} : condutividade térmica experimental (W/mK);

k_{pred} : condutividade térmica predita por modelos (W/mK).

4.6.2 Densidade

Uma vez que produtos alimentares possuem diferentes formas e tamanhos, a medição precisa do volume pode ser um desafio. Há, na literatura, diversas técnicas para determinar o volume e a posterior densidade dos alimentos, sendo o método do picnômetro o mais utilizado. Contudo, esta metodologia é mais utilizada para líquidos, havendo poucas aplicações dos métodos para medir a densidade de alimentos congelados (RAO; RIZVI; DATTA, 2005). Sendo assim, neste trabalho, a densidade da polpa de acerola foi

avaliada por modelos matemáticos encontrados na literatura. As densidades intrínsecas dos componentes proteínas, gorduras, carboidratos, fibras, cinzas e água (gelo e água não congelada) foram determinadas pelas equações presentes na Tabela 3 e a densidade da polpa como um todo foi determinada pela equação 2.

4.6.3 Calor específico

Para a determinação do calor específico, como a composição da polpa de acerola foi determinada detalhadamente, utilizou-se, então, a equação 4 para avaliação do calor específico a 0, 5, 10 e 15 °C, ou seja, para a polpa não congelada. Já para as temperaturas de -5, -10, -15, -20, -25 e -30 °C, foi utilizada a equação 6, que é uma equação simplificada para a determinação do calor específico, além de possibilitar a determinação do calor latente. Para a determinação deste calor latente foi utilizada, em cada concentração da polpa, a temperatura de início de congelamento mais -0,01 °C, possibilitando, então, avaliar a descontinuidade presente no limiar da T_{ic} , ou seja, o calor latente.

4.6.4 Difusividade térmica

Segundo American Society of Heating (2002), a taxa na qual o calor se difunde por condução através de um material depende da difusividade térmica e, para a sua determinação, é muito utilizada a relação existente entre condutividade, densidade e calor específico. Também segundo Rao, Rizvi e Datta (2005), medidas diretas da difusividade térmica não são muito comuns. A maior parte dos dados publicados sobre difusividade se baseia em cálculos a partir de valores de condutividade térmica, densidade e calor específico. Sendo assim, neste trabalho, a difusividade térmica foi calculada segundo a equação 17,

utilizando-se os dados experimentais da condutividade térmica, obtidos por meio da metodologia da sonda linear de aquecimento. Para densidade e calor específico, utilizaram-se os modelos teóricos já descritos anteriormente.

4.7 Determinação das propriedades reológicas

Neste trabalho, as medidas reológicas foram realizadas por meio de um reômetro rotacional de cilindros concêntricos Brookfield DVIII Ultra (Brookfield Engineering Laboratories, Stoughton, USA). Um banho termostato Brookfield (Brookfield Engineering Laboratories – Modelo EX 200) foi acoplado ao cilindro encamisado do reômetro que continha a amostra para estabilização da temperatura, sendo o ajuste conferido pela leitura e registro do sensor do reômetro. As temperaturas de análise foram 20, 30, 40, 50 e 60 °C. As amostras foram submetidas a uma rampa crescente de taxa de deformação, que variou linearmente de 3,3 a 61,2 s⁻¹, durante 6 minutos de ensaio, sendo tomados 12 pontos. Foi utilizado o spindle SC4-31 (11,76 mm de diâmetro e 30,68 mm de comprimento), para a polpa com 5,5 °Brix, o spindle SC4-34 (9,39 mm de diâmetro e 29,36 mm de comprimento), para a concentração de 7,5 °Brix e o spindle SC4-25 (4,78 mm de diâmetro e 17,70 mm de comprimento), para as concentrações de 9,5, 11,5 e 13,3 °Brix.

Com os valores de tensão de cisalhamento (τ) e taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), foram calculados os parâmetros reológicos pelo modelo de Herschel-Bulkley (Equação 29), utilizando o *software* Reocalc (versão V.3.1, Brookfield Engineering Laboratories, Stoughton, USA) para a captura dos dados. A viscosidade aparente aplicada ao modelo de Herschel-Bulkley foi calculada utilizando-se os parâmetros do modelo através da equação 34.

$$\eta_a = K_H (\dot{\gamma})^{n_H - 1} + \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} \quad (34)$$

em que

η_a : viscosidade aparente (Pa.s);

K_H : índice de consistência (Herschel-Bulkley) (Pa.s);

$\dot{\gamma}$: taxa de deformação (s^{-1});

n_H : índice de comportamento de fluido (Herschel-Bulkley)

τ_o : tensão de cisalhamento inicial (Pa).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização físico-química da polpa de acerola

Na Tabela 7 apresenta-se a composição da polpa de acerola nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.

Tabela 7 Composição centesimal e desvio padrão (DP) da polpa de acerola nas diferentes concentrações de análise

Item (%)	Concentração (°Brix)				
	5,5	7,5	9,5	11,5	13,5
Umidade	94,077 (0,0038)	92,102 (0,0153)	90,113 (0,0198)	87,949 (0,0120)	85,624 (0,0946)
Proteínas	0,744 (0,0161)	0,992 (0,0215)	1,242 (0,0269)	1,513 (0,0328)	1,805 (0,0391)
Gorduras	0,074 (0,0219)	0,099 (0,0292)	0,124 (0,0366)	0,151 (0,0446)	0,180 (0,0532)
Carboidratos	4,336 (0,0165)	5,729 (0,0304)	7,183 (0,0316)	8,754 (0,0313)	10,455 (0,0515)
Fibras	0,541 (0,0428)	0,752 (0,0570)	0,902 (0,0714)	1,100 (0,0870)	1,312 (0,1038)
Cinzas	0,228 (0,0141)	0,325 (0,0594)	0,436 (0,0349)	0,532 (0,0112)	0,623 (0,0183)

Tendo como base a polpa com concentração de 7,5 °Brix, que foi a concentração encontrada para o produto *in natura*, os valores de umidade (92,102%), carboidratos (5,729%), fibras (0,752%) e cinzas (0,325%) encontrados estão de acordo com os apresentados na Tabela 2, referente à Tabela Brasileira de Composição de Alimentos, TACO (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011), para polpa de acerola congelada, com 93,6% para umidade, 5,5% para carboidratos, 0,7% para fibras e 0,3% para cinzas. Com relação às gorduras, apesar de a TACO apresentar traços, foram encontrados 0,099%. Já em relação ao teor de proteínas (0,992%), houve uma pequena diferença em relação ao presente na TACO (0,6%). Esta variação, segundo Silva (2000), pode ser decorrente de fatores como variedade, grau de maturação, local de plantio e colheita.

5.2 Temperatura de início de congelamento

No Gráfico 5 apresenta-se a dinâmica de congelamento para a polpa de acerola, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.

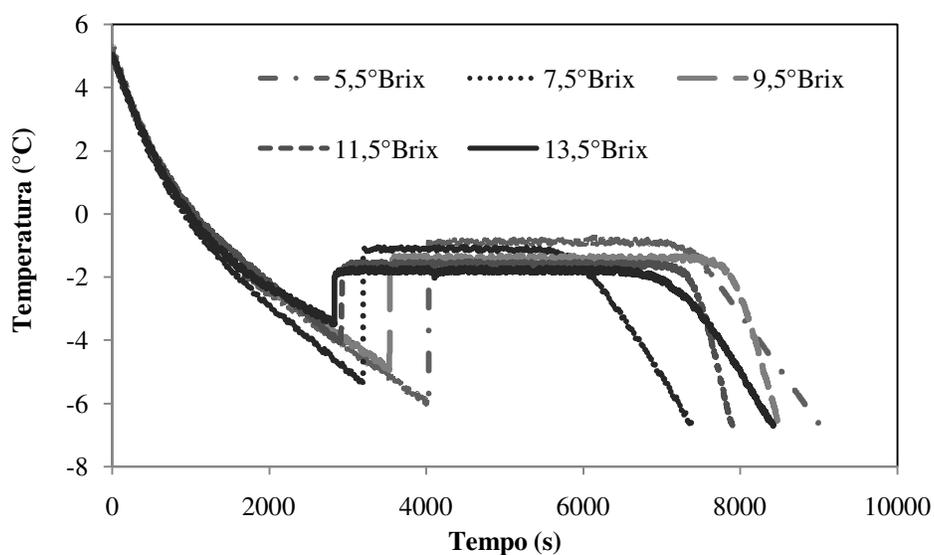


Gráfico 5 Cinética de congelamento para a polpa de acerola, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix

Em todas as análises, foi observado o sub-resfriamento, facilitando a visualização da temperatura de início de congelamento. Observa-se que quanto mais concentrada a polpa, menor é o sub-resfriamento. Segundo Rahman (2009), existem muitos fatores envolvidos na tendência de um sistema em apresentar sub-resfriamento, incluindo temperatura, taxa de resfriamento, volume e quantidade de soluto. Quanto maior a concentração, menor é o sub-resfriamento, por dois motivos: nucleação mais rápida e temperatura de início de congelamento mais baixa.

Em relação ao tempo necessário para a ocorrência do congelamento das amostras, nada se pode concluir, pois não foram utilizadas quantidades exatamente iguais de amostras durante as medições da T_{ic} .

Na Tabela 8 é apresentada a temperatura de início de congelamento obtida para todas as concentrações da polpa, juntamente com os respectivos desvios padrões.

Tabela 8 Temperatura de início de congelamento das polpas de acerola nas diferentes concentrações e com os respectivos desvios padrões

Concentração da polpa (°Brix)	Temperatura de início de congelamento (°C)
5,5	-0,9 (0,058)
7,5	-1,1 (0,058)
9,5	-1,4 (0,058)
11,5	-1,7 (0,058)
13,5	-2,0 (0,000)

Observou-se uma diminuição da T_{ic} em função do aumento da concentração dos sólidos nas polpas. Essa queda do ponto de congelamento é causada pelo aumento da concentração de sólidos na fase não congelada, que ocorre devido ao processo de concentração e separação da água na forma de gelo, durante o congelamento. Com o aumento da concentração da polpa, há, conseqüentemente, um incremento de soluto não volátil, o que reduz a pressão parcial do vapor da água e, portanto, o equilíbrio entre a fase líquida e sólida somente pode ser alcançado por intermédio de uma redução da temperatura, ocasionando um abaixamento crioscópico (RAHMAN, 2009).

5.3 Fração de água congelada

Uma das características dos processos de congelamento dos alimentos é o aumento contínuo da fração de água livre congelada do alimento, abaixo da temperatura de início de congelamento.

A fração de água livre congelada foi determinada segundo as equações 21, 22, 23, 24 e 25, às temperaturas de -30, -25, -20, -15, -10 e -5 °C. Os resultados para as concentrações de polpa com 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix são apresentados nos Gráficos 6, 7, 8, 9 e 10, respectivamente.

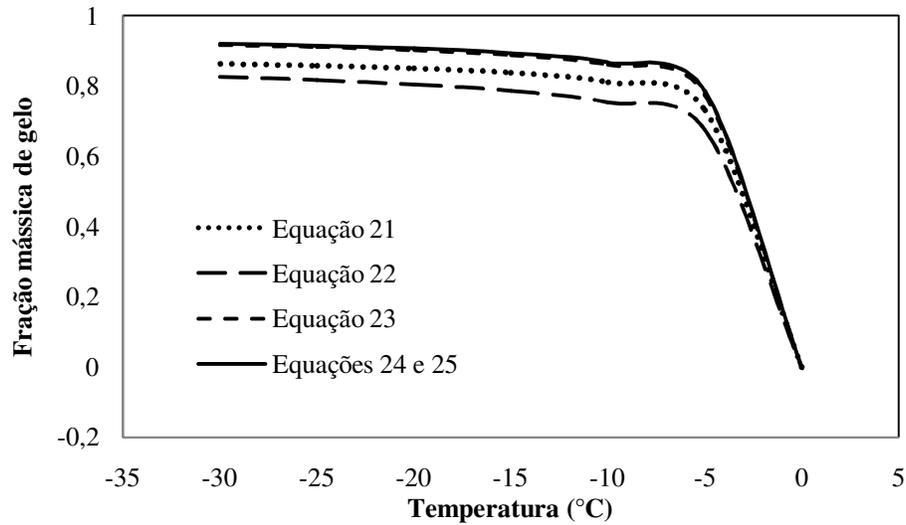


Gráfico 6 Frações de gelo da polpa de acerola (5,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25

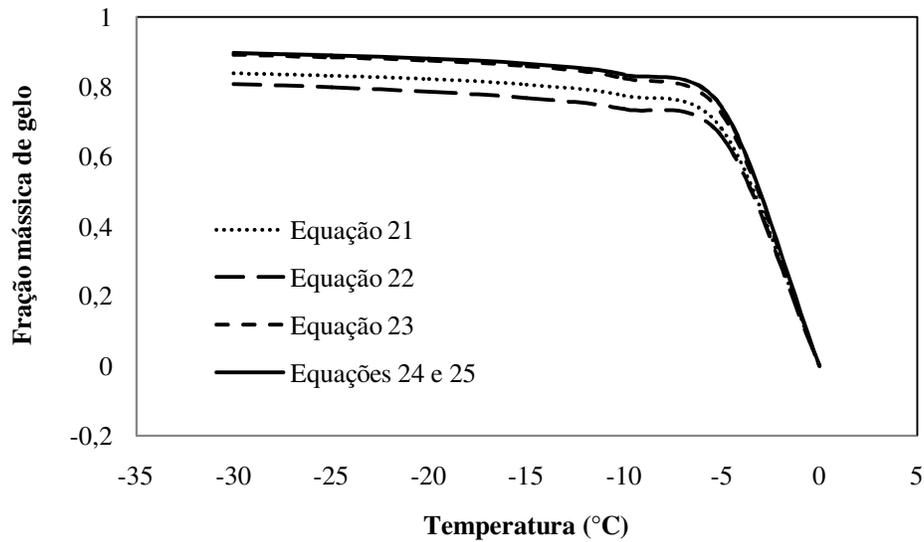


Gráfico 7 Frações de gelo da polpa de acerola (7,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25

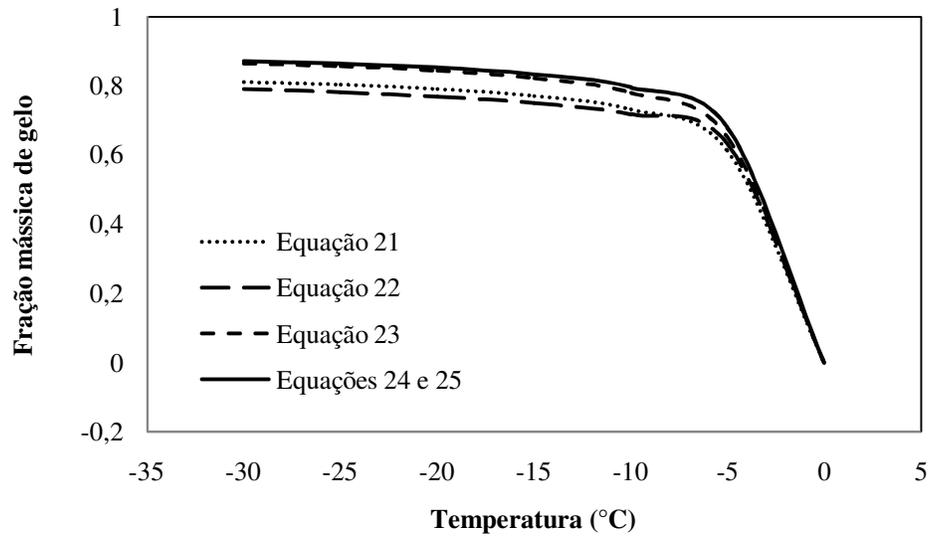


Gráfico 8 Frações de gelo da polpa de acerola (9,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25

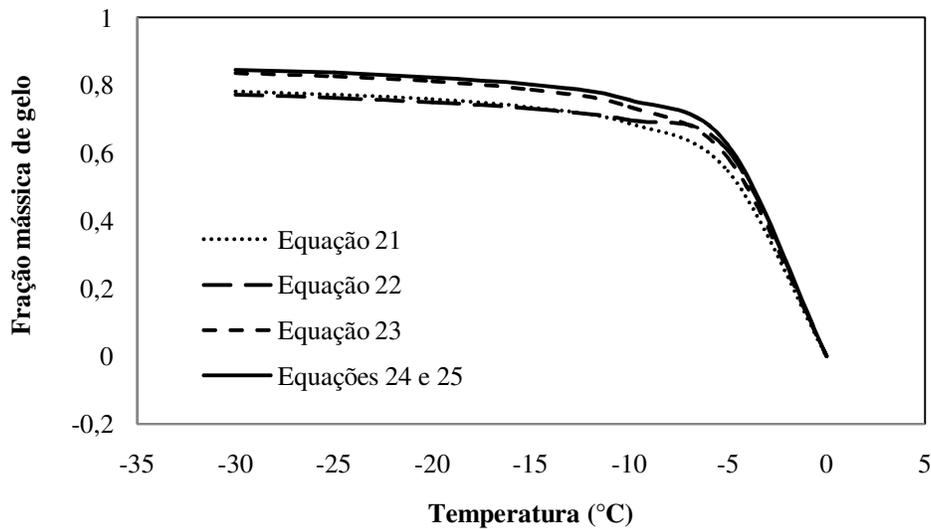


Gráfico 9 Frações de gelo da polpa de acerola (11,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25

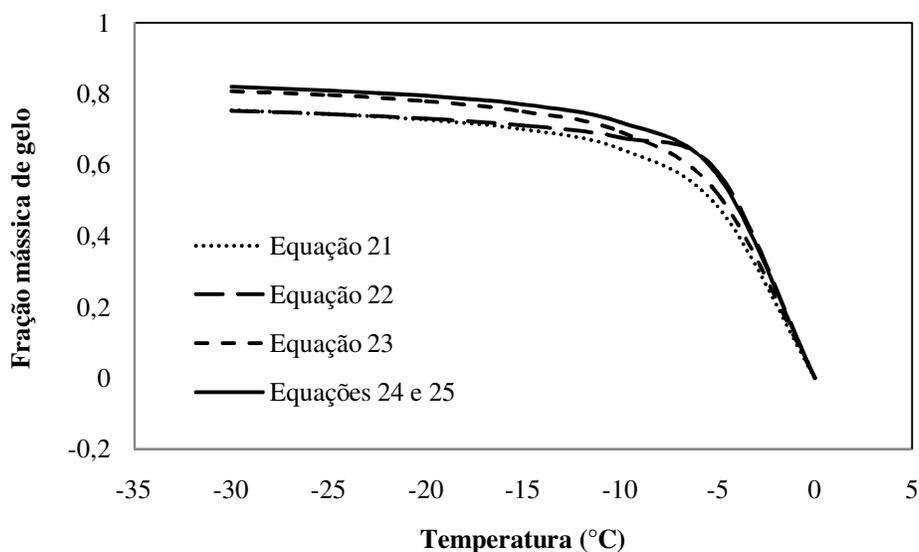


Gráfico 10 Frações de gelo da polpa de acerola (13,5 °Brix), determinadas por meio das equações 21, 22, 23, 24 e 25

Observa-se que, independente das equações utilizadas, um aumento contínuo da fração de gelo foi obtido com a diminuição da temperatura. Para as mesmas temperaturas, a fração de gelo para as polpas mais concentradas é sempre menor do que a daquelas com um conteúdo de umidade maior. Isso se deve ao fato de a temperatura de início de congelamento das polpas com um maior °Brix ser mais baixa que as mais diluídas e à menor disponibilidade de água livre das polpas mais concentradas.

Apesar da similaridade do comportamento da fração mássica de gelo com a diminuição da temperatura obtida por meio das equações apresentadas, as equações 24 e 25 foram adotadas para utilização nos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken, durante a avaliação da condutividade, pois, segundo Pereira et al. (2013), na literatura elas são apresentadas como os modelos que produzem o menor erro de predição da fração mássica de gelo.

No Gráfico 11 pode-se observar a formação de gelo em termos de fração mássica para cada concentração da polpa e, no Gráfico 12, demonstra-se o comportamento, em termos dos ganhos percentuais para decaimentos em intervalos de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo a faixa analisada de 0 a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para ambos os Gráficos (11 e 12), foram utilizadas as equações 24 e 25, na determinação da fração de gelo.

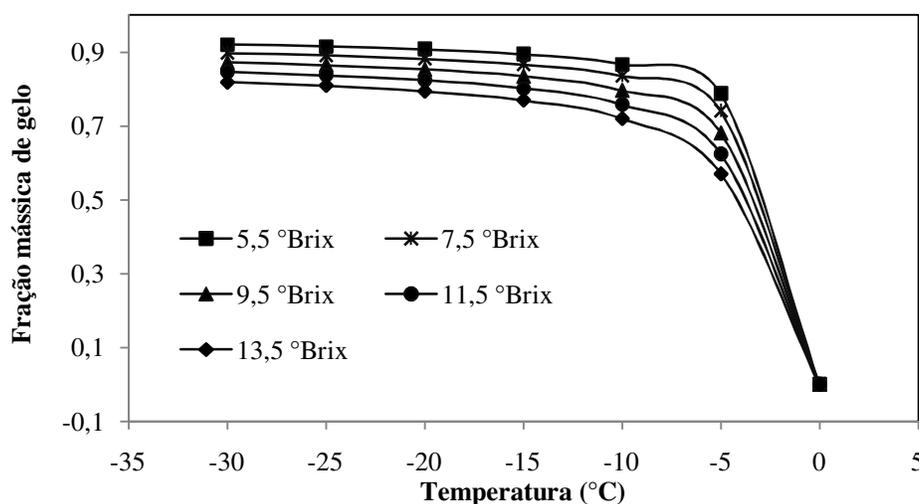


Gráfico 11 Aumento da fração mássica de gelo para as diferentes concentrações de polpa de acerola na faixa de 0 a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Os dados do Gráfico 11 demonstram que, na faixa de 0 a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, há, para todas as concentrações da polpa, um aumento brusco na fração mássica de gelo e, após os $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ainda se observam aumentos, mas estes sempre em menores proporções. Em relação às diferentes concentrações, pode-se observar que, para todas as temperaturas de análise, a polpa mais concentrada apresenta menor fração mássica de gelo em relação à polpa mais diluída. Este comportamento é justificável pelo fato de a polpa com menor concentração de sólidos ter resultado em uma temperatura de início de congelamento maior ($-0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Já na polpa mais concentrada, por ter uma T_{ic} mais baixa ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$), em virtude da menor

presença de água livre e maior concentração de solutos, a mobilidade das moléculas de água é menor. Isto porque a maior viscosidade da solução dificulta o aumento dos cristais de gelo.

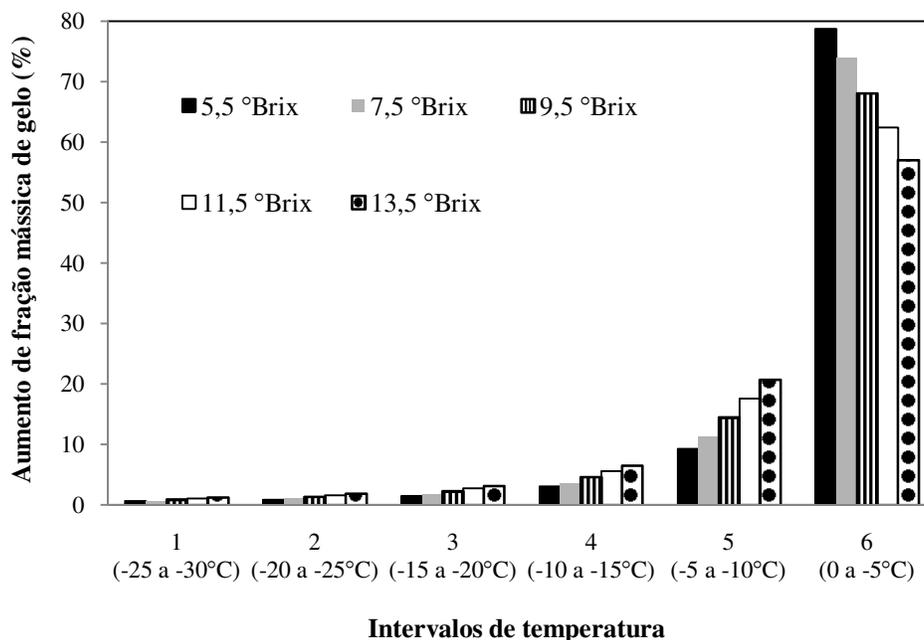


Gráfico 12 Aumento da porcentagem de gelo nas polpas, durante o decaimento da temperatura de 0 °C para -30 °C. Cada um dos trechos corresponde a um decaimento de 5 °C

Os dados do Gráfico 12 também demonstram que há um aumento brusco na porcentagem de formação de gelo na faixa de 0 a -5 °C. Nesta faixa de temperatura, para a polpa menos concentrada (5,5 °Brix), há uma maior formação percentual de gelo do que para as polpas mais concentradas. Nos demais intervalos, a maior porcentagem de formação de gelo é observada para as polpas mais concentradas. Esse comportamento pode ser justificável pelo fato de que, como a polpa mais diluída começou a congelar antes que as outras, em um primeiro momento (0 a -5 °C) ela apresenta sempre uma maior porcentagem de

sua água congelada, então, para os próximos decaimentos de temperatura a sua água remanescente contribuirá sempre menos para o aumento da porcentagem de gelo. Para cada temperatura separadamente, esse comportamento pode ser explicado em virtude da quantidade de água disponível para congelamento, que está presente sempre em maiores quantidades nas polpas mais concentradas, as quais têm temperaturas de início de congelamento mais baixas.

5.4 Medição da condutividade térmica da solução de sacarose 10% e determinação do fator de correção f

Na Tabela 9 são mostrados os resultados experimentais das condutividades térmicas da solução de sacarose 10%, em função da temperatura, bem como as inclinações das retas obtidas por meio do ajuste linear dos dados experimentais. Neste caso, a potência de aquecimento aplicada por metro linear de resistência foi de 3,412W/m. O fator f foi calculado por meio da equação 32.

Tabela 9 Condutividades térmicas experimentais da solução de sacarose 10% e fator de correção f

Temperatura (°C)	Coefficiente angular (m)	Condutividade térmica (W/mK)	Fator f
-30	0,425	0,640	2,830
-25	0,432	0,629	2,832
-20	0,442	0,615	2,829
-15	0,451	0,602	2,840
-10	0,468	0,580	2,846
		Média	2,836

5.4.1 Condutividade térmica experimental

Na Tabela 10 observa-se a média dos resultados experimentais das três medições das condutividades térmicas obtidas para as polpas de acerola nas diferentes temperaturas de análise, bem como os respectivos desvios padrões.

Tabela 10 Condutividade térmica média e desvio padrão para as polpas de acerola, em suas respectivas temperaturas

Temperatura (°C)	Concentrações (°Brix)				
	5,5	7,5	9,5	11,5	13,5
	$k_{\text{experimental}}$ (W/mK)				
-30	0,673 (0,013)	0,642 (0,027)	0,620 (0,005)	0,589 (0,040)	0,552 (0,011)
-25	0,664 (0,009)	0,634 (0,012)	0,608 (0,010)	0,569 (0,025)	0,529 (0,011)
-20	0,650 (0,012)	0,619 (0,017)	0,588 (0,003)	0,540 (0,036)	0,501 (0,009)
-15	0,623 (0,004)	0,589 (0,015)	0,558 (0,008)	0,505 (0,031)	0,466 (0,009)
-10	0,579 (0,007)	0,539 (0,001)	0,507 (0,022)	0,458 (0,044)	0,418 (0,020)
-5	0,518 (0,007)	0,458 (0,015)	0,403 (0,011)	0,353 (0,043)	0,303 (0,008)
0	0,193 (0,001)	0,184 (0,004)	0,179 (0,004)	0,171 (0,008)	0,161 (0,001)

As condutividades experimentais foram posteriormente corrigidas com o fator f , obtido por meio da calibração da sonda utilizando-se a condutividade térmica experimental obtida para a solução de sacarose (10%) e seus valores teóricos já conhecidos.

5.4.2 Condutividade térmica experimental corrigida

Para a determinação da condutividade térmica corrigida das polpas, utilizou-se a média do fator de correção f , multiplicando-o pelas condutividades térmicas experimentais medidas em cada temperatura. Os valores médios obtidos para as condutividades térmicas experimentais corrigidas foram plotados em função da temperatura, com os respectivos desvios padrões e ajustados por modelo exponencial, como mostrado no Gráfico 13, para as polpas de acerola, nas concentrações de 5,5; 7,7; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix.

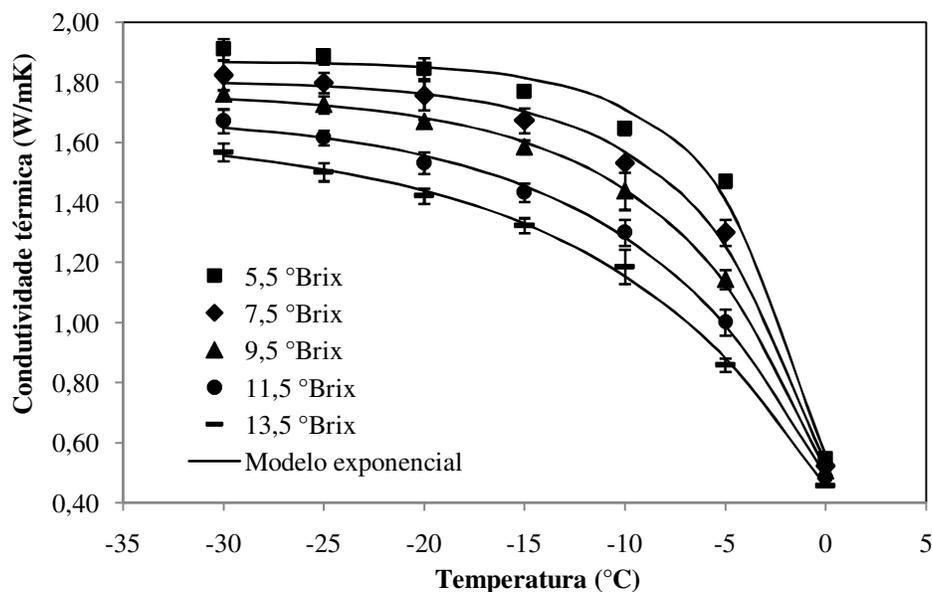


Gráfico 13 Modelo exponencial e condutividade térmica experimental das polpas de acerola, nas concentrações 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix, para a faixa de temperatura de 0 a -30 °C

O comportamento das curvas do Gráfico 13 apresentou-se compatível com o que foi demonstrado por Heldman (1982), pois as condutividades térmicas das polpas aumentaram com a redução da temperatura, o que evidencia a dependência entre esses dois fatores.

Para todas as concentrações, observou-se um aumento brusco na condutividade térmica na faixa de temperatura de 0 a -10 °C, devido às fortes variações da fração de gelo neste intervalo. Segundo Renaud et al. (1992), a fração de água congelada afeta muito a condutividade térmica de materiais congelados porque a condutividade do gelo é quatro vezes maior do que a da água líquida.

Pode-se observar que, para as polpas com uma maior porcentagem de água, a condutividade térmica manteve-se sempre superior à das polpas menos concentradas, analisando-se em uma mesma temperatura.

Utilizando-se os resultados experimentais apresentados no Gráfico 13 foram ajustadas equações exponenciais para a determinação específica da condutividade térmica da polpa de acerola para as concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5; e 13,5 °Brix e na faixa de temperatura de 0 a -30 °C, como apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 Equações para avaliação da condutividade térmica da polpa de acerola na faixa de temperatura de 0 a -30 °C

Concentração (°Brix)	Equações ($-30^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C}$)	R ²
5,5	$k = -1,313e^{\left(\frac{T}{4,771}\right)} + 1,871$	0,987
7,5	$k = -1,274e^{\left(\frac{T}{5,982}\right)} + 1,807$	0,994
9,5	$k = -1,253e^{\left(\frac{T}{7,416}\right)} + 1,767$	0,999
11,5	$k = -1,208e^{\left(\frac{T}{9,384}\right)} + 1,700$	0,997
13,5	$k = -1,181e^{\left(\frac{T}{11,113}\right)} + 1,635$	0,997

Onde: k - condutividade térmica (W/mK); T - temperatura (°C)

Para um melhor entendimento e avaliação da influência da concentração da polpa de acerola na sua condutividade térmica, o ganho em porcentagem dessa propriedade foi avaliado para as diferentes concentrações da polpa e para cada variação de queda de temperatura de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, iniciando-se do 0 até $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. O comportamento apresentado pode ser observado no Gráfico 14.

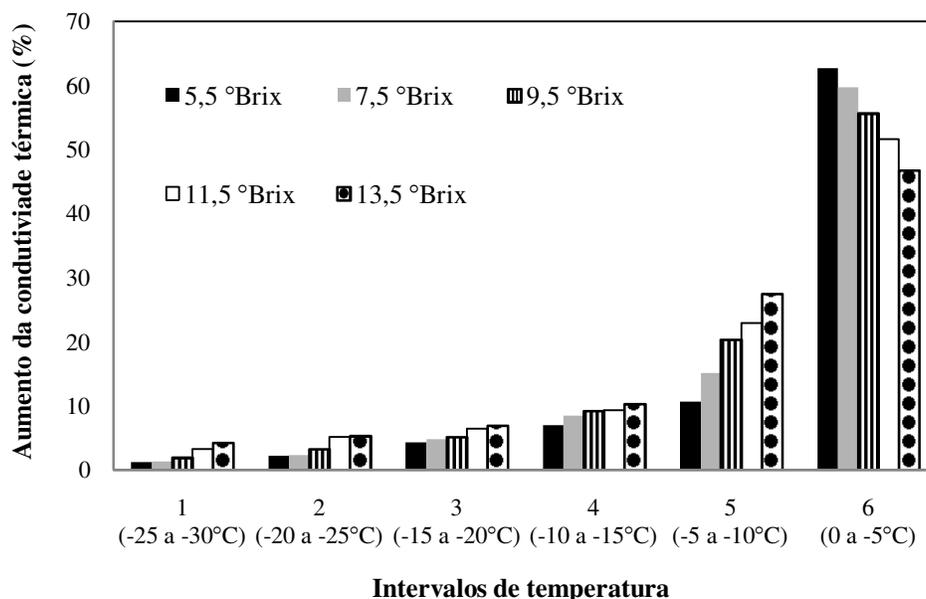


Gráfico 14 Aumento da condutividade térmica, em termos percentuais, para decaimentos de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ em $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, iniciando-se do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e finalizando em $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

O comportamento do Gráfico 14 permite concluir que, para a faixa de temperatura de 0 a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a polpa com uma menor concentração de sólidos ($5,5\text{ }^{\circ}\text{Brix}$), apresentou maior aumento percentual da condutividade térmica em relação às polpas mais concentradas. Já para o restante dos decaimentos das temperaturas, as polpas mais concentradas, apesar de terem sempre condutividades mais baixas do que as menos concentradas, como visto no Gráfico 13, o incremento percentual de condutividade térmica é sempre maior

para as polpas mais concentradas. Esse comportamento pode ser comparado com o observado no Gráfico 12, em que, pelo fato de a água, principalmente na forma de gelo, ser o componente do alimento que mais contribui para a sua condutividade térmica, a dinâmica de formação de gelo é similar à dinâmica de aumento da condutividade térmica, em função do abaixamento da temperatura.

No Gráfico 15 apresenta-se o comportamento da condutividade térmica da polpa de acerola quando as temperaturas são fixadas.

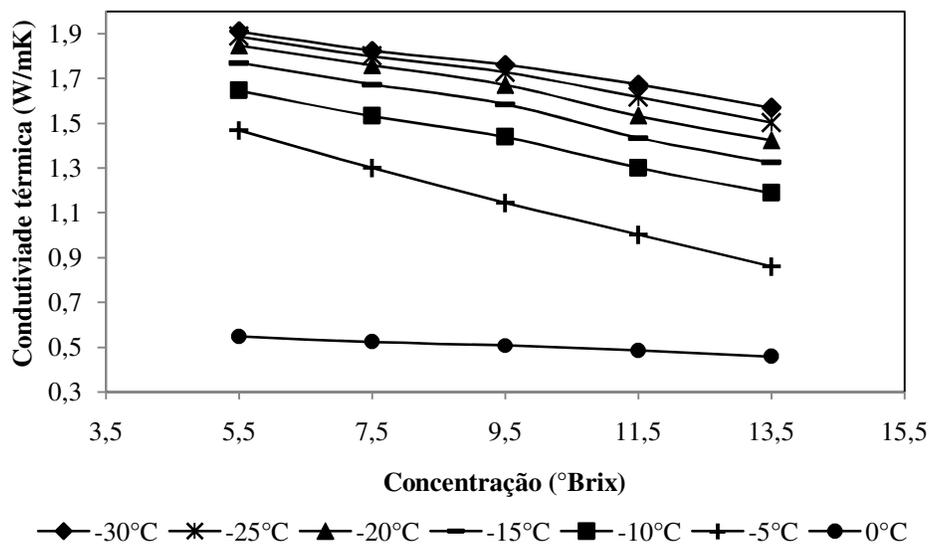


Gráfico 15 Comportamento da condutividade térmica em relação às concentrações da polpa de acerola, quando as temperaturas são fixadas

Pode-se observar que, para todas as temperaturas, quando se avaliou a condutividade térmica em função da concentração de sólidos, o comportamento das curvas foi linear. Para 0 °C, em todas as concentrações, as condutividades foram próximas e, conseqüentemente, verificou-se um menor coeficiente angular. Para a temperatura de -5 °C, que é a mais próxima da T_{ic} , houve um maior aumento da condutividade dentre as concentrações da polpa, sendo, por

isso, a reta com maior coeficiente angular. Em sequência, para as temperaturas de -15, -20, -25 e -30 °C, os coeficientes das respectivas curvas foram diminuindo. Este comportamento pode ser mais bem visualizado quando se comparam o Gráfico 15 e o Gráfico 13, observando-se que quanto maior a inclinação da reta presente no Gráfico 15, representa, no Gráfico 13, um maior distanciamento dos pontos da condutividade térmica da polpa de acerola para uma mesma temperatura de análise. As equações lineares obtidas com a avaliação da condutividade *versus* concentração da polpa de acerola estão presentes na Tabela 12.

Tabela 12 Modelos lineares ajustados para determinação da condutividade térmica da polpa de acerola, na faixa de concentração de 5,5 a 13,5 °Brix

Temperaturas (°C)	Equações ($5,5^{\circ}\text{Brix} \leq c \leq 13,5^{\circ}\text{Brix}$)	R ²
-30	$k = -0,041c + 2,144$	0,993
-25	$k = -0,047c + 2,158$	0,992
-20	$k = -0,053c + 2,155$	0,992
-15	$k = -0,056c + 2,092$	0,991
-10	$k = -0,057c + 1,965$	0,997
-5	$k = -0,075c + 1,876$	0,998
0	$k = -0,010c + 0,606$	0,992

Onde: k - condutividade térmica (W/mK); c - concentração da polpa de acerola (°Brix)

A avaliação da condutividade térmica em função da concentração de sólidos possibilitou o ajuste de modelos matemáticos lineares simples que possibilitam a obtenção direta da condutividade térmica da polpa de acerola, sem necessidade de avaliações experimentais, sendo necessários somente de dados de temperatura de análise e concentração da polpa.

5.4.3 Comparação da condutividade térmica experimental com a determinada pelos modelos estruturais

As condutividades térmicas experimentais e as obtidas pelos modelos teóricos em paralelo, em série e o de Maxwell-Eucken (ME), utilizando-se as equações 24 e 25 para determinação da fração de gelo, são apresentadas nos Gráficos 16, 17, 18, 19 e 20, para as polpas com 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix, respectivamente.

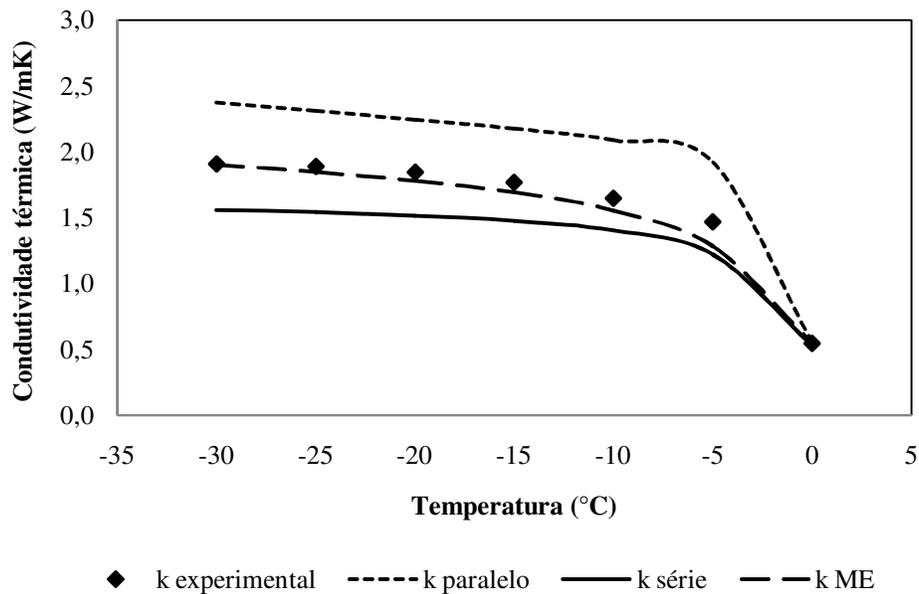


Gráfico 16 Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 5,5 °Brix

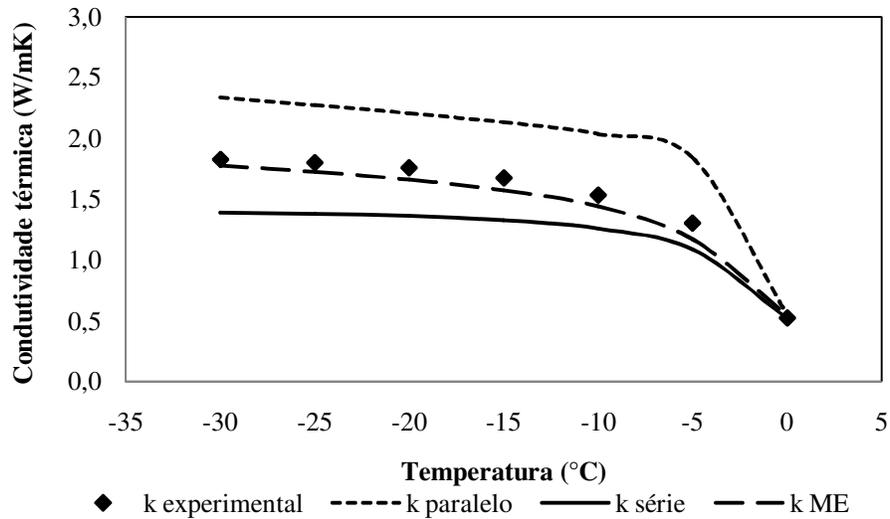


Gráfico 17 Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 7,5 °Brix

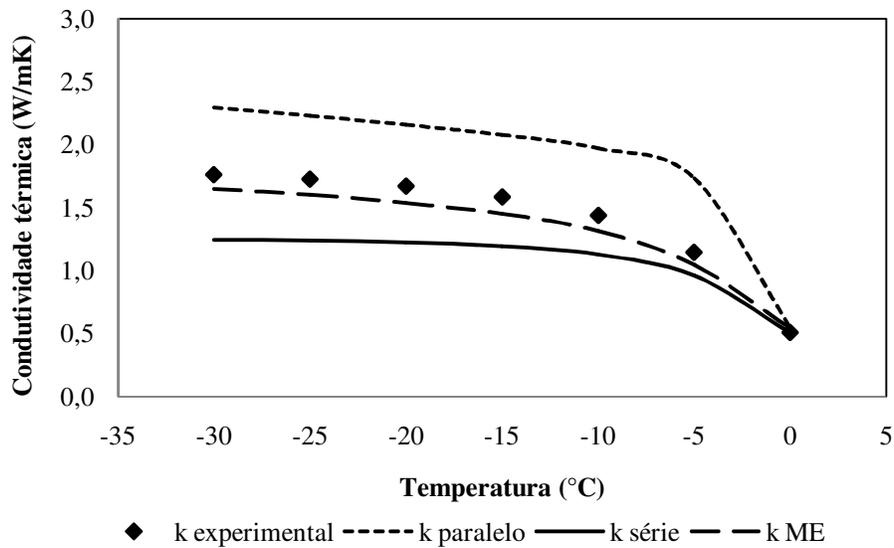
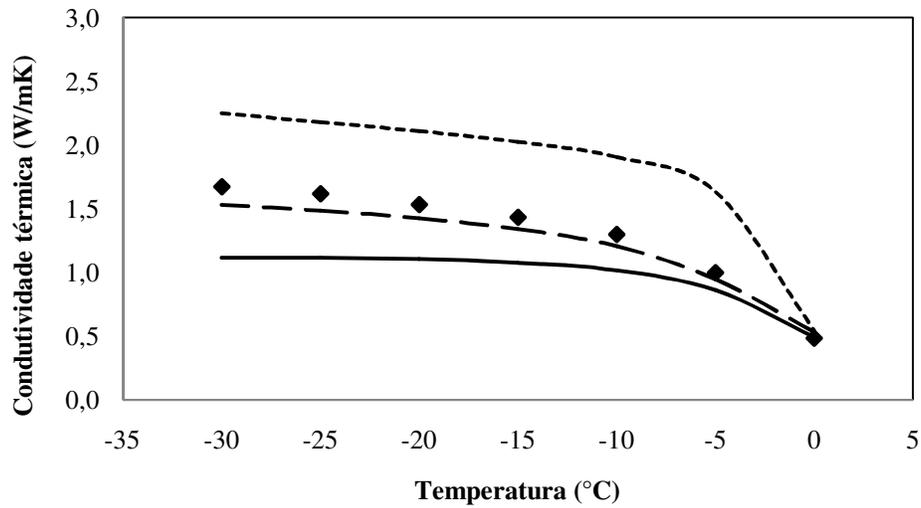
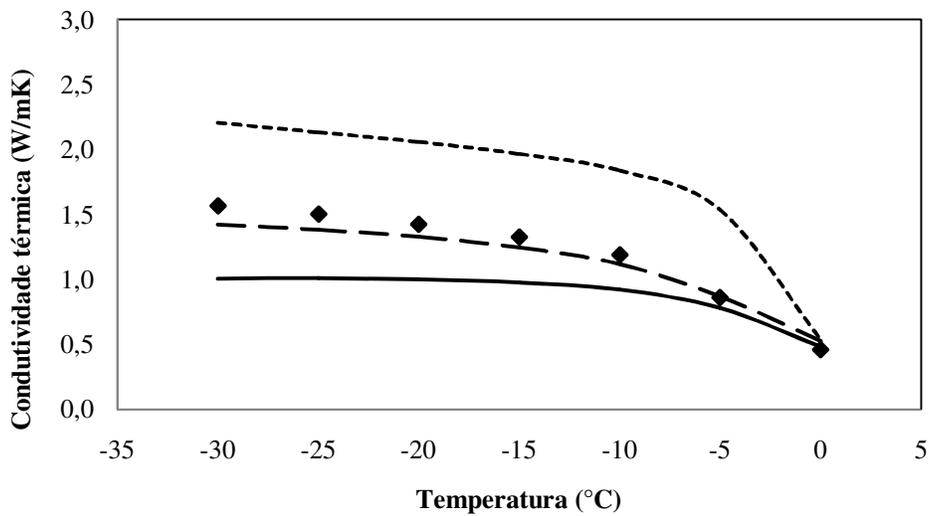


Gráfico 18 Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 9,5 °Brix



◆ k experimental - - - - k paralelo — k série - - - k ME

Gráfico 19 Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 11,5 °Brix.



◆ k experimental - - - - k paralelo — k série - - - k ME

Gráfico 20 Condutividade térmica experimental e as obtidas por meio dos modelos em série, paralelo e de Maxwell-Eucken (ME), para a polpa de acerola com 13,5 °Brix

Para todas as concentrações de polpa de acerola analisadas, os dados obtidos experimentalmente para a condutividade térmica se aproximaram mais dos dados obtidos pelo modelo teórico de Maxwell-Eucken, entretanto, a inclinação da curva apresentou comportamentos diferentes. Para as concentrações de 11,5 e 13,5 °Brix na faixa de temperatura de -5 a -30 °C e, para as concentrações de 5,5 e 7,5 °Brix, nas temperaturas de 0 e -5 °C, as curvas se apresentaram mais inclinadas, ou seja, com maiores aumentos da condutividade com a queda da temperatura, comportando-se melhor em relação ao modelo em paralelo.

O erro envolvido entre as condutividades térmicas experimentais e as obtidas por meio dos modelos teóricos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken estão apresentados nos Gráficos 21, 22, 23, 24 e 25.

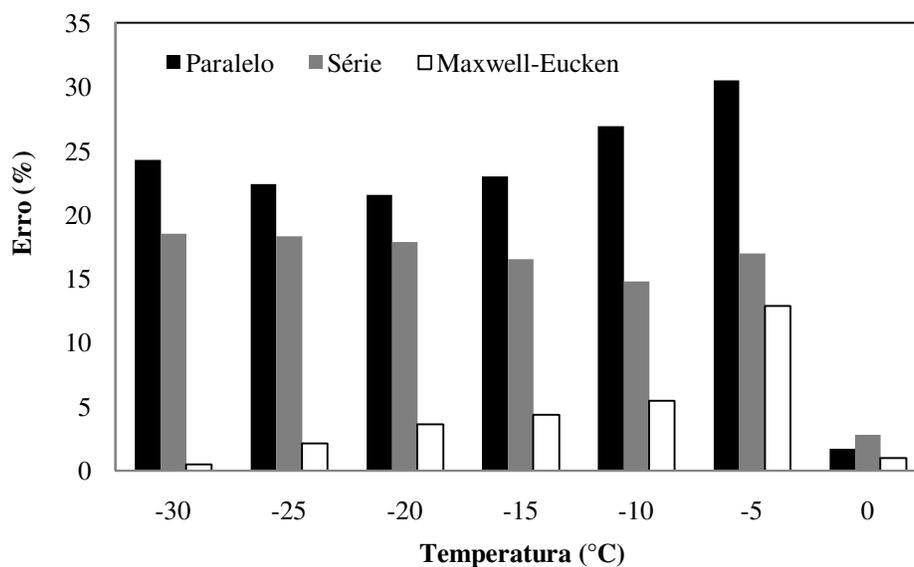


Gráfico 21 Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 5,5 °Brix

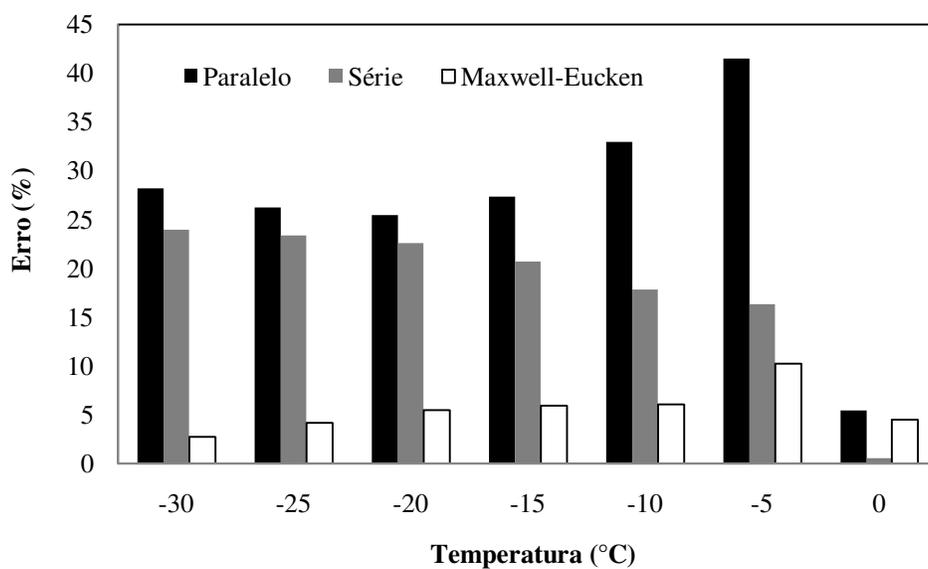


Gráfico 22 Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 7,5 °Brix

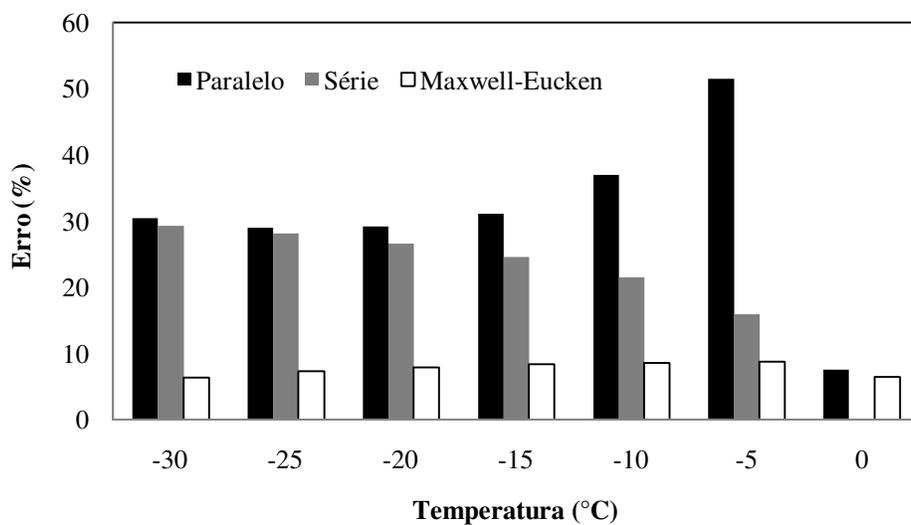


Gráfico 23 Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 9,5 °Brix

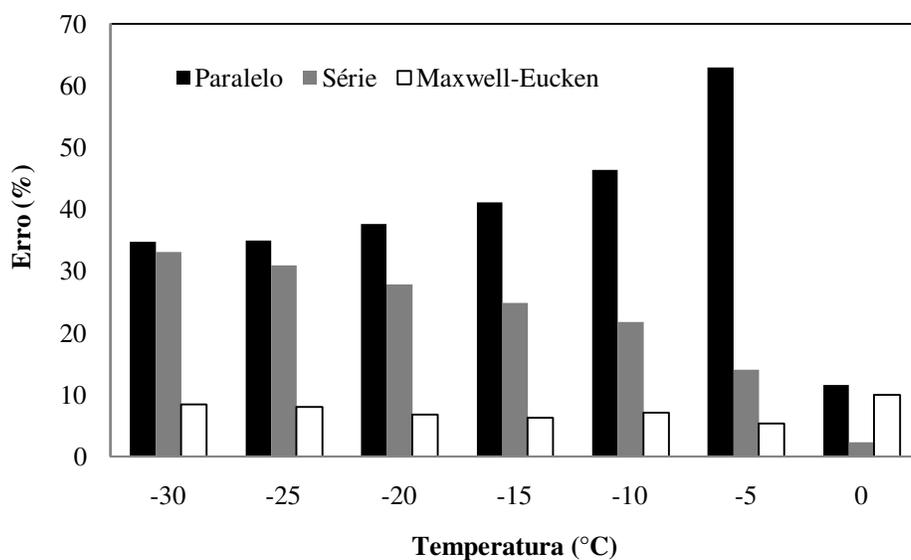


Gráfico 24 Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 11,5 °Brix

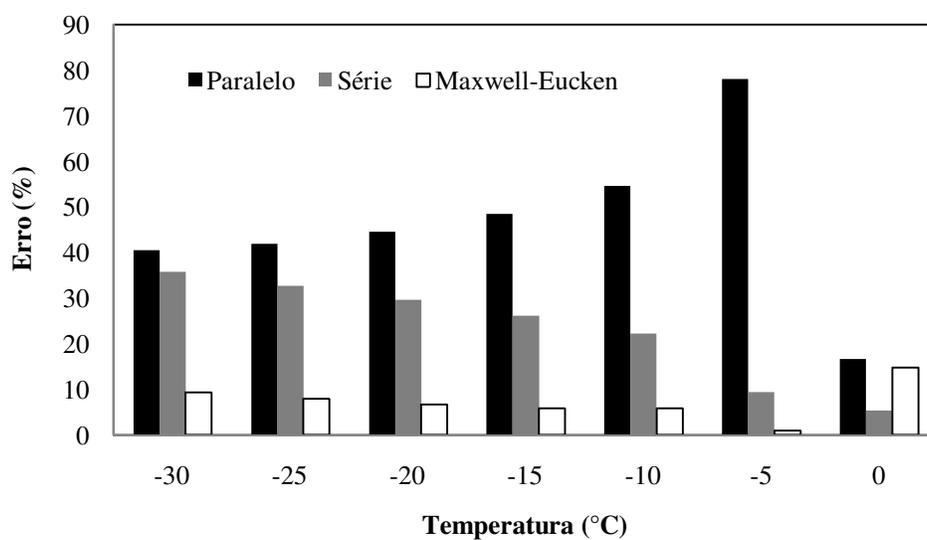


Gráfico 25 Avaliação do erro entre a condutividade térmica experimental e a obtida pelos modelos em paralelo, série e de Maxwell-Eucken, para a polpa com 13,5 °Brix

Para todas as concentrações da polpa de acerola e na faixa de temperatura de -30 a -5 °C, os erros máximos encontrados entre os dados experimentais e os obtidos pelos modelos foram de 8,71%, para o de Maxwell-Eucken, 35,79% para o em série e 78,17% para o em paralelo. Na temperatura de 0 °C, obtiveram-se erros máximos de 5,38% para com o modelo em série, 14,78% para o de Maxwell-Eucken e 16,71% para o em paralelo. Segundo Rao, Rizvi e Datta (2005), o que torna, algumas vezes, falhas as equações presentes na literatura e que foram utilizadas neste trabalho para a determinação da condutividade térmica da polpa de acerola, é o fato de que elas foram modeladas para os alimentos em geral. Segundo o mesmo autor, a estrutura de um alimento tem uma influência marcante sobre a sua condutividade térmica. Alimentos que contêm fibras exibem comportamentos distintos para a condutividade térmica medida paralelamente ou transversalmente às fibras. Da mesma forma a porosidade tem grande influência sobre a condutividade térmica do alimento e o processo de congelamento pode alterar significativamente sua porosidade. Sendo assim, a determinação experimental de variações na condutividade térmica durante o processo de congelamento se torna mais complexa e necessária do que a utilização de modelos existentes para alimentos em geral. O uso das equações desenvolvidas e apresentadas nas Tabelas 11 e 12 fornece resultados com maior precisão do que os obtidos com os modelos utilizados neste trabalho.

5.4.4 Densidade

Os resultados obtidos para a densidade da polpa de acerola nas diferentes concentrações e temperatura de análise estão apresentados no Gráfico 26. Observa-se uma dependência da densidade em relação à concentração da polpa, bem como seu decréscimo com a diminuição da temperatura. Segundo Heldman (1982), uma das propriedades básicas de um produto alimentar, e que

tem grande influência devido ao processo de congelamento, é a densidade. Uma vez que a densidade da água diminui significativamente durante a mudança de fase de líquido para sólido, a influência sobre a densidade do produto é perceptível.

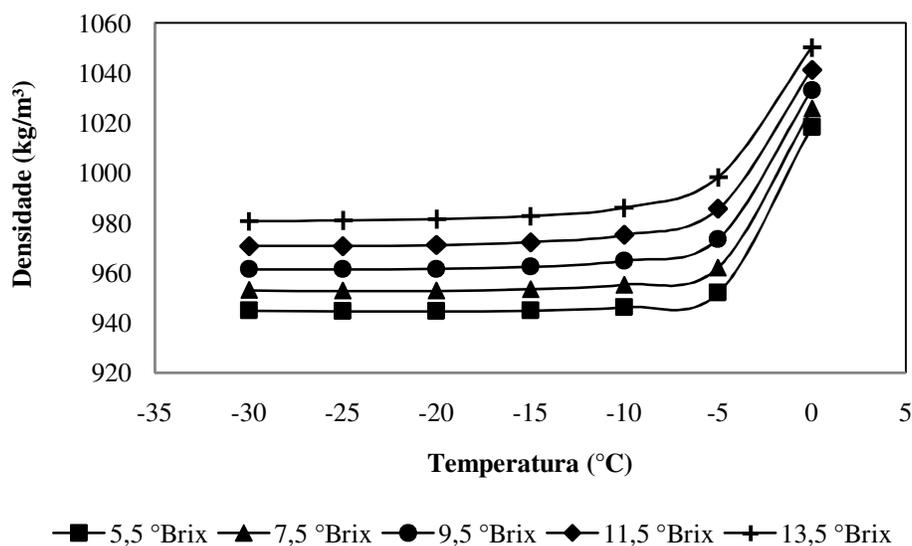


Gráfico 26 Variações da densidade da polpa de acerola, em função das concentrações e da temperatura

Para todas as concentrações da polpa foi observado o mesmo comportamento da densidade em função da temperatura. Para 0 °C, maiores valores dessa propriedade foram observados e, à medida em que houve o congelamento do produto e a consequente formação de gelo, a densidade diminuiu. Entretanto, a redução da densidade não foi constante, tendo ocorrido uma maior diminuição entre 0 e -5 °C. Já que o gelo tem uma menor densidade que a água líquida, pode-se relacionar essa faixa de queda acentuada da densidade com a faixa de maior aumento da fração mássica de gelo apresentado no Gráfico 12, em que, entre 0 e -5 °C houve a formação de gelo em torno de

79% para a polpa com 5,5 °Brix e 57% para a de 13,5 °Brix. Nas temperaturas de -5 a -30 °C, as reduções das densidades foram mais sutis, em virtude das menores porcentagens de formação de gelo subsequentes.

Em relação à concentração das polpas, observou-se que há uma diminuição da densidade com o aumento do teor de umidade. Segundo Heldman (1982), o teor de água do produto é o fator mais influente na densidade. Pode-se dizer, então, que a densidade da acerola em baixas temperaturas é inversamente proporcional ao teor de umidade e diretamente proporcional à temperatura.

Diversos autores avaliaram a densidade dos alimentos, mas para altas temperaturas. Dados experimentais para a densidade dos alimentos congelados são ainda escassos. Tocci e Mascheroni (2008) mediram a densidade de kiwis frescos e desidratados osmoticamente pelo método do picnômetro para a faixa de temperatura de -70 a 30 °C. Cubos de kiwis frescos e parcialmente desidratados foram inseridos no picnômetro e, como líquido picnométrico, utilizou-se o tolueno. O comportamento das curvas obtidas foi similar ao observado no Gráfico 26, em que, com a queda da temperatura, houve diminuição da densidade das frutas. O kiwi fresco apresentou sempre menores valores de densidade do que os kiwis submetidos a 6 e a 24 horas de desidratação.

5.4.5 Calor específico

Na Tabela 13 apresentam-se os valores de calor específico calculados pela equação 4 para a temperatura de 0 °C e aqueles obtidos pela equação 6 para a polpa congelada. No Gráfico 27 mostra-se a dinâmica apresentada pelo calor específico para a faixa de temperatura de 0 a -30 °C.

Tabela 13 Calor específico da polpa de acerola em diferentes concentrações e temperatura

Temperatura (°C)	Calor específico (kJ/kg.°C)				
	Concentrações (°Brix)				
	5,5	7,5	9,5	11,5	13,5
-30	1,615	1,639	1,663	1,691	1,722
-25	1,613	1,638	1,664	1,695	1,728
-20	1,612	1,639	1,672	1,709	1,751
-15	1,620	1,657	1,710	1,771	1,840
-10	1,694	1,782	1,932	2,110	2,307
-5	2,868	3,560	4,853	6,359	8,015
T _{ic} + (-0,01°C)	300,742	237,038	179,264	141,086	113,897
0	5,550	5,468	5,382	5,292	5,195

*T_{ic} - Temperatura de início de congelamento

No limiar da temperatura de início de congelamento, para cada polpa foi observado um pico no calor específico, em que foi, então, determinado o calor latente do produto. Segundo Rahman (2009), o efeito da temperatura no calor específico para o alimento não congelado é desprezível, sendo, portanto, utilizada uma média para representar esta propriedade no alimento descongelado. Já para o alimento congelado, um efeito visível é observado na gama de temperaturas abaixo da de congelamento.

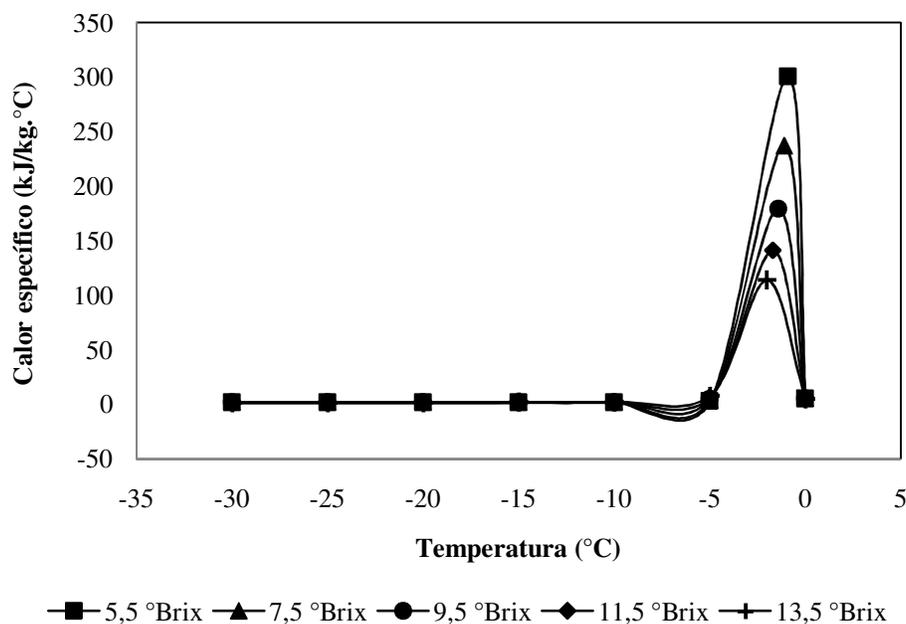


Gráfico 27 Comparação do calor específico da polpa de acerola nas diferentes concentrações e baixas temperaturas

Tocci e Mascheroni (2008) mediram o calor específico pelo método de DSC na faixa de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, para kiwis frescos e desidratados osmoticamente. O comportamento das curvas obtidas foi semelhante ao do Gráfico 27, em que, próximo a T_{ic} dos kiwis, observou-se um pico no gráfico do calor específico e, com a diminuição da temperatura, essa propriedade termofísica apresentou queda em relação ao seu maior valor, referente ao calor latente. Na medida em que o alimento foi sendo congelado, observou-se uma queda, com posterior estabilização no valor do calor específico, sendo a maior queda observada para a faixa de temperatura compreendida entre a T_{ic} e $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou seja, faixa na qual houve a maior formação de gelo (Gráfico 12). Já para as temperaturas subsequentes, em que já havia mais de 55% e 75% de formação de gelo para as polpas com 13,5 e 7,5 °Brix, respectivamente, a diminuição do calor específico foi ficando cada vez menor.

5.4.6 Difusividade térmica

Após determinação de condutividade térmica, densidade e calor específico, os dados obtidos foram utilizados para cálculo da difusividade térmica da polpa de acerola. No Gráfico 28 apresenta-se o comportamento dessa propriedade termofísica, para a polpa de acerola nas diferentes concentrações e temperaturas de análise.

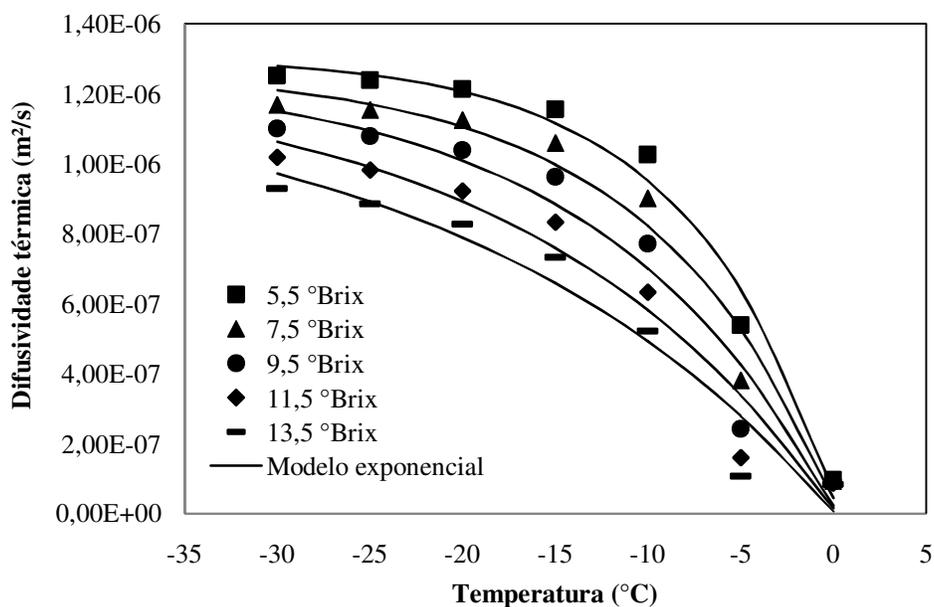


Gráfico 28 Difusividade térmica da polpa de acerola, para as concentrações de 5,5 a 13,5 °Brix e na faixa de temperatura de 0 a -30 °C

A difusividade térmica aumenta com a queda da temperatura de forma exponencial (Gráfico 28). Para todas as concentrações observa-se um aumento brusco na difusividade na faixa de temperatura de 0 a -10 °C, podendo-se, novamente, comparar com a mesma faixa de temperatura em que há os maiores aumentos percentuais da formação de gelo (Gráfico 12). Segundo American

Society of Heating (2002), por causa das diferenças significativas entre a propriedade termofísica (difusividade térmica) da água e do gelo, conseqüentemente esta propriedade terá o mesmo comportamento para o alimento congelado, sendo mais acentuadas as modificações próximas à temperatura de início de congelamento do produto.

Em relação à concentração, assim como para a condutividade, para a difusividade térmica observou-se que, para as polpas com maior porcentagem de água, a difusividade manteve-se sempre superior à das polpas menos concentradas, analisando-se em uma mesma temperatura. Isso comprova a maior contribuição da difusividade térmica pelo componente água (gelo e água líquida) do que pelos sólidos presentes na polpa.

Com os resultados apresentados no Gráfico 28, equações exponenciais puderam ser ajustadas para a determinação direta da difusividade térmica da polpa de acerola, para as concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5; e 13,5 °Brix e na faixa de temperatura de 0 a -30 °C, como apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 Equações para avaliação da difusividade térmica da polpa de acerola na faixa de temperatura de 0 a -30 °C

Concentração (°Brix)	Equações ($-30^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C}$)	R ²
5,5	$\alpha = -1,243 \times 10^{-6} e^{\left(\frac{T}{8,076}\right)} + 1,311 \times 10^{-6}$	0,975
7,5	$\alpha = -1,226 \times 10^{-6} e^{\left(\frac{T}{9,979}\right)} + 1,271 \times 10^{-6}$	0,950
9,5	$\alpha = -1,246 \times 10^{-6} e^{\left(\frac{T}{12,754}\right)} + 1,269 \times 10^{-6}$	0,923
11,5	$\alpha = -1,258 \times 10^{-6} e^{\left(\frac{T}{16,737}\right)} + 1,273 \times 10^{-6}$	0,919
13,5	$\alpha = -1,257 \times 10^{-6} e^{\left(\frac{T}{20,531}\right)} + 1,264 \times 10^{-6}$	0,912

Onde: α - difusividade térmica (m²/s); T - temperatura (°C)

Diferentemente do ajuste obtido para as equações da condutividade térmica, para as equações de difusividade térmica ajustadas a modelos exponenciais obtiveram-se R^2 menores. Essa diminuição do ajuste pode ser devida a não determinação experimental desta propriedade para a polpa de acerola, sendo utilizada, para sua avaliação, a relação entre condutividade térmica, calor específico e densidade. E, para a mensuração do calor específico e densidade, foram utilizadas equações presentes na literatura que foram confeccionadas para alimentos em geral, não especificamente para polpa de acerola.

Para um melhor entendimento e avaliação da influência da concentração da polpa de acerola na sua difusividade, no Gráfico 29 observa-se o comportamento desta propriedade termofísica da polpa de acerola, quando as temperaturas são fixadas. As equações obtidas com a avaliação da difusividade *versus* concentração da polpa podem ser observadas na Tabela 15.

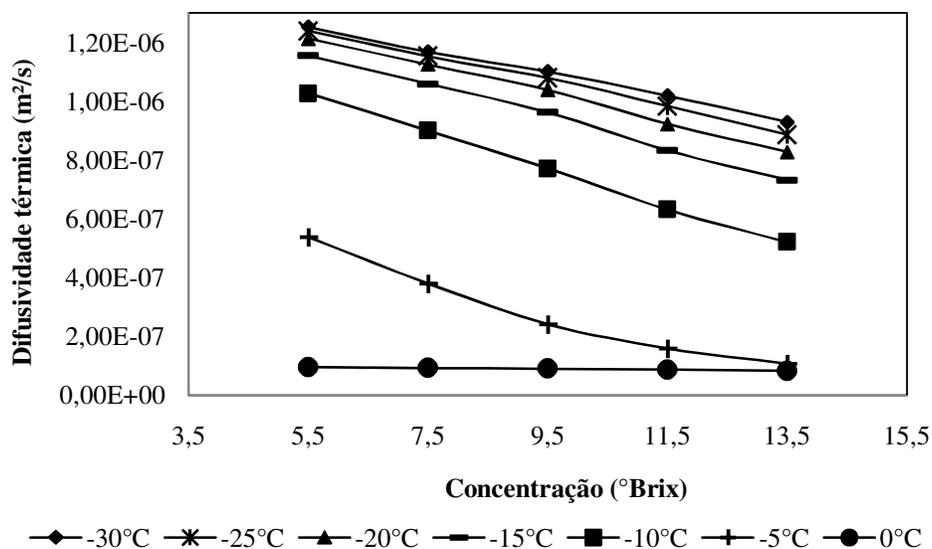


Gráfico 29 Comportamento da difusividade térmica *versus* concentração da polpa de acerola, quando as temperaturas são fixadas

Tabela 15 Modelos ajustados para a difusividade térmica da polpa de acerola na faixa de concentração de 5,5 a 13,5 °Brix

T (°C)	Equações (5,5°Brix ≤ c ≤ 13,5°Brix)	R ²
-30	$\alpha = -3,981 \times 10^{-8}c + 1,472 \times 10^{-6}$	0,998
-25	$\alpha = -4,374 \times 10^{-8}c + 1,484 \times 10^{-6}$	0,997
-20	$\alpha = -4,856 \times 10^{-8}c + 1,487 \times 10^{-6}$	0,997
-15	$\alpha = -5,362 \times 10^{-8}c + 1,458 \times 10^{-6}$	0,996
-10	$\alpha = -6,383 \times 10^{-8}c + 1,377 \times 10^{-6}$	0,999
-5	$\alpha = 4,780 \times 10^{-9}c^2 - 1,449 \times 10^{-7}c + 1,193 \times 10^{-6}$	0,999
0	$\alpha = -1,549 \times 10^{-9}c + 1,054 \times 10^{-7}$	0,988

Onde: T – Temperatura; α - difusividade térmica (m²/s); c – concentração da polpa de acerola (°Brix)

O ajuste de equações para avaliação da difusividade térmica da polpa de acerola em função da temperatura (Tabela 14) e da concentração de sólidos (Tabela 15) possibilitou a obtenção de modelos matemáticos simples para a predição desta propriedade, sem haver a necessidade de anterior determinação da densidade, calor específico e condutividade térmica. Para a utilização dos modelos ajustados, necessitam-se somente de dados de concentração da polpa e temperatura de análise durante um processo térmico.

5.5 Reologia

Os parâmetros reológicos foram avaliados em função de diferentes concentrações de polpa de acerola (5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix) e para as temperaturas de 20, 30, 40, 50 e 60 °C.

O comportamento reológico da polpa e a influência das diferentes temperaturas de análise podem ser visualizados nos Gráficos 30, 31, 32, 33 e 34, os quais demonstram a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação das polpas. Fica evidente uma relação de não linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, o que caracteriza um típico comportamento não newtoniano pseudoplástico com uma tensão inicial (τ_o), implicando que, para haver escoamento do fluido, é necessário aplicar uma tensão de cisalhamento maior que a tensão inicial.

Dentre os modelos utilizados para descrever o comportamento reológico da polpa, o de Herschel-Bulkley (Equação 32) foi o que proporcionou os melhores parâmetros estatísticos para o ajuste dos dados experimentais, obtendo R^2 mínimo de 0,974. O modelo foi utilizado para a determinação dos parâmetros de tensão inicial (τ_o), índice de consistência (K_H) e índice de comportamento do fluido (n_H), para todas as concentrações e temperaturas de análise.

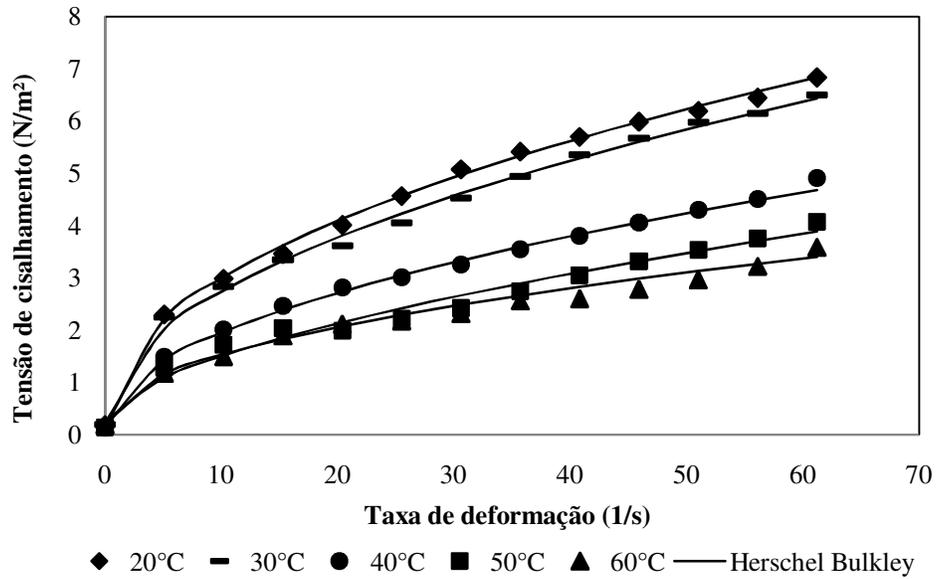


Gráfico 30 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 5,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise.

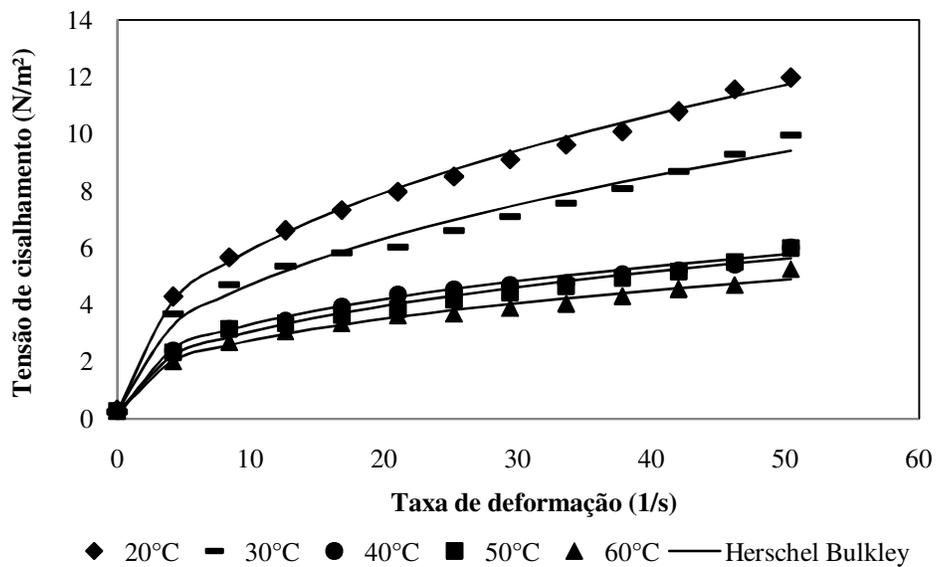


Gráfico 31 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 7,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

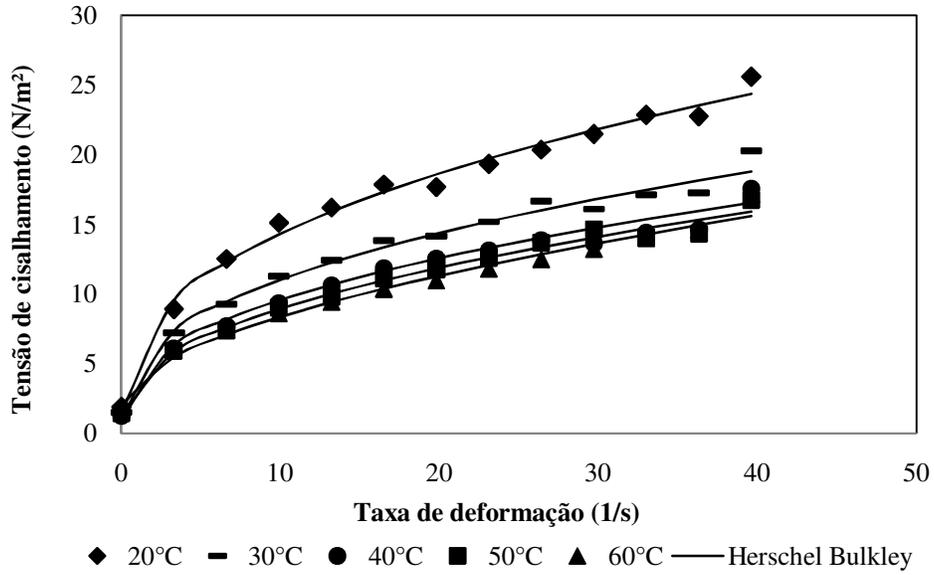


Gráfico 32 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 9,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

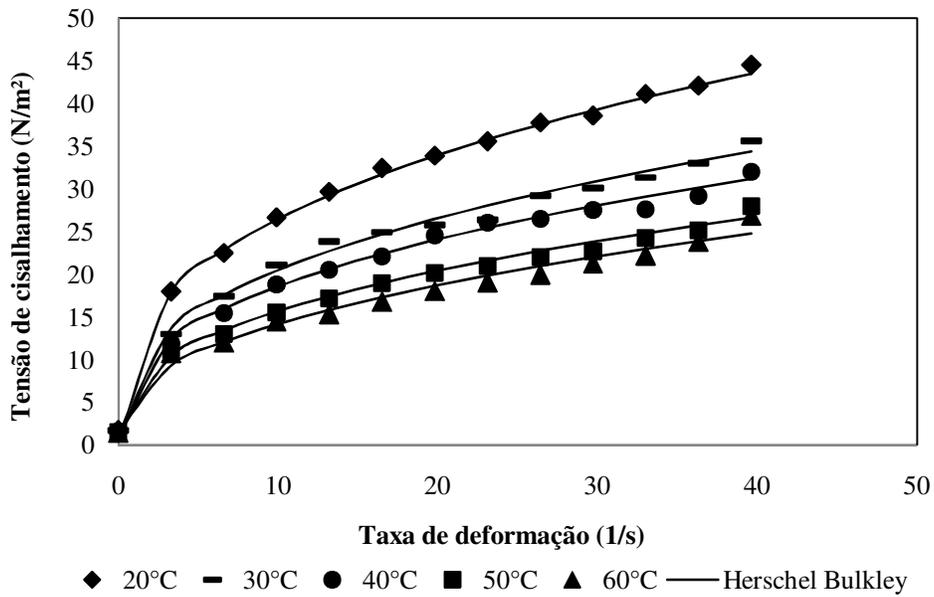


Gráfico 33 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 11,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

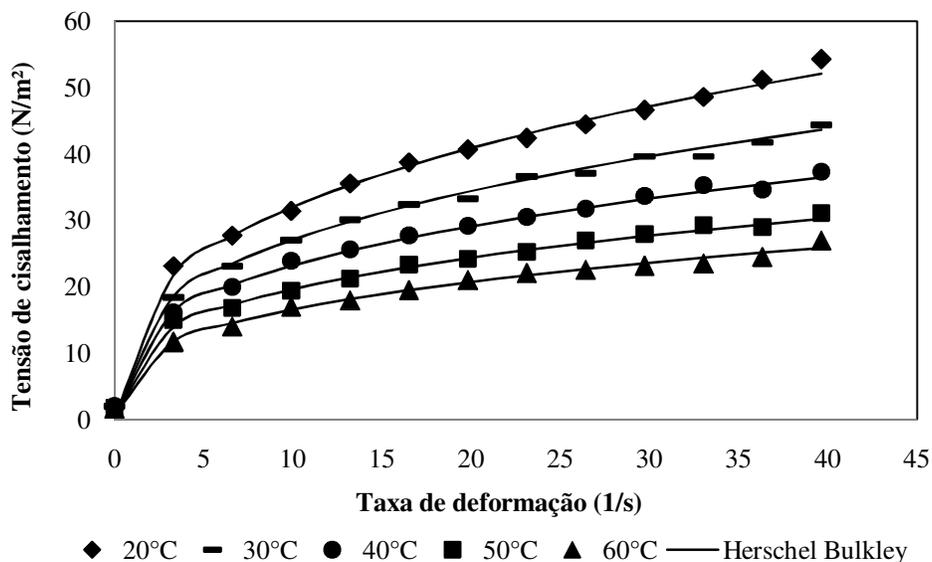


Gráfico 34 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação da polpa com 13,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

Para uma taxa de deformação fixa, foi observado, para todas as concentrações de polpa, que a tensão de cisalhamento diminuiu com o aumento da temperatura. Silva, Guimarães e Gasparetto (2005) também observaram o mesmo comportamento para suco industrializado de acerola, nas temperaturas de 5 °C a 85 °C.

Pelos Gráficos 30 a 34 observa-se também que a inclinação das curvas diminuiu tanto com o aumento da taxa de deformação quanto com o aumento da temperatura, o que evidencia uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento destes dois fatores, como melhor visualizado nos Gráficos 35 a 39.

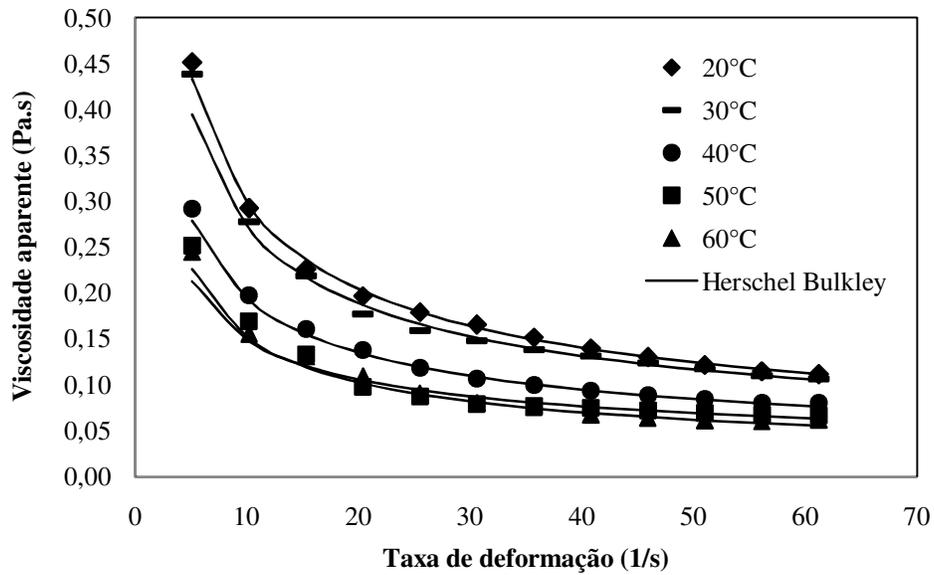


Gráfico 35 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 5,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

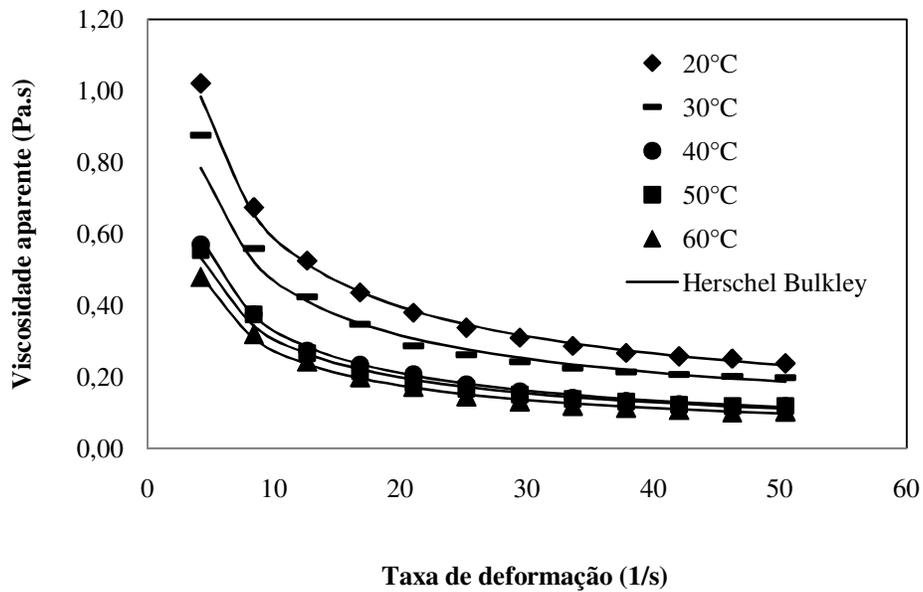


Gráfico 36 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 7,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

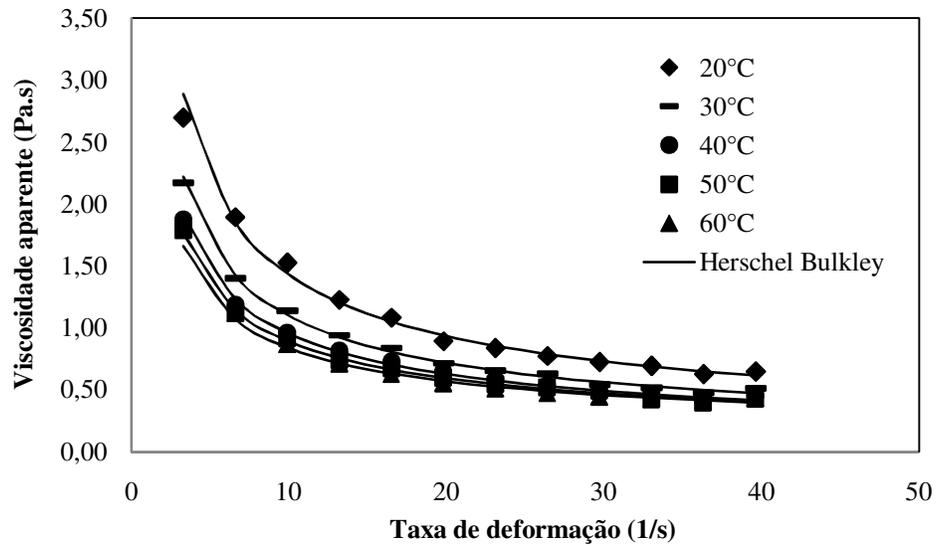


Gráfico 37 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 9,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

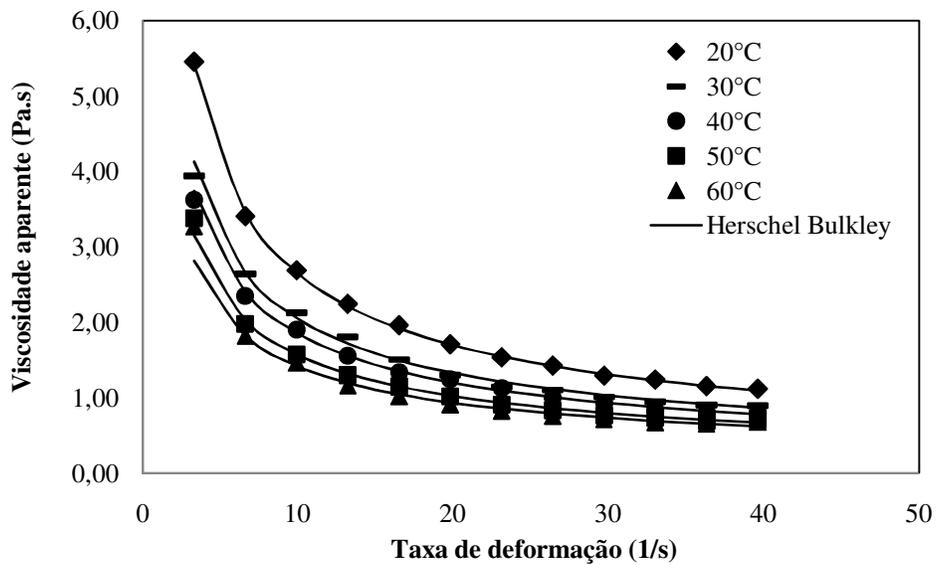


Gráfico 38 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 11,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

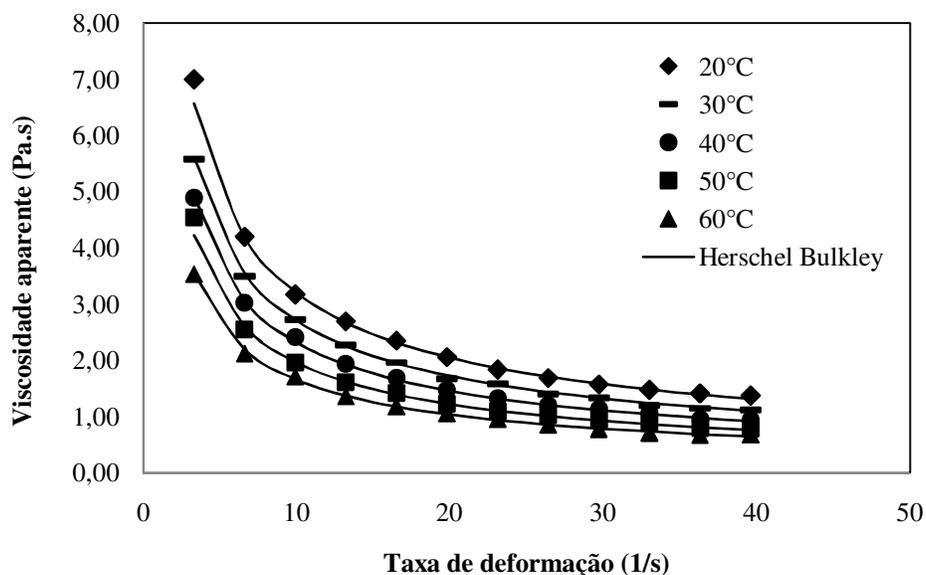


Gráfico 39 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação da polpa com 13,5 °Brix, nas diferentes temperaturas de análise

Nos Gráficos 35, 36, 37, 38 e 39 evidencia-se um decréscimo da viscosidade aparente em função do aumento da taxa de deformação, para todas as concentrações e temperaturas de análise. Segundo Rao (1999), esse comportamento pode ser explicado pela modificação e ruptura na estrutura das moléculas da polpa, devido aos aumentos na taxa de deformação e o consequente alinhamento das moléculas. Para Pelegrine (1999), como a maioria das polpas de frutas apresenta-se na forma de sólidos dispersos em meios líquidos, a temperatura torna-se um dos fatores que mais afetam sua viscosidade. Um aumento da temperatura faz com que a viscosidade da fase líquida diminua, aumentando o movimento das partículas em suspensão, causando um decréscimo na viscosidade da polpa.

Pelos Gráficos 35 a 39 fica evidente também que a relação entre as tensões de cisalhamento e taxas de deformação não foram constantes, havendo, então, uma diminuição da viscosidade aparente, o que evidencia o

comportamento pseudoplástico da polpa de acerola em todas as concentrações e temperaturas de análise. Vidal et al. (2006), ao analisarem comportamento reológico de polpa de manga centrifugada na faixa de temperatura de 10 °C a 60 °C, também observaram um comportamento de queda da viscosidade com o aumento da taxa de deformação e da temperatura até 60 °C, verificando-se que o índice de comportamento é menor que 1, indicando a pseudoplasticidade da polpa.

Nas Tabelas 16, 17, 18, 19 e 20 apresentam-se os dados dos parâmetros obtidos por meio do modelo de Herschel-Bulkley, para a polpa de acerola nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix, respectivamente, e em todas as temperaturas de análise.

Tabela 16 Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 5,5 °Brix

Parâmetros	Temperaturas (°C)				
	20	30	40	50	60
K_H (Pa.s)	0,97	0,80	0,56	0,32	0,43
n_H	0,47	0,50	0,51	0,59	0,49
τ_o (Pa)	0,12	0,22	0,15	0,26	0,20
R^2	0,9975	0,9950	0,9957	0,9743	0,9740

Onde: K_H – índice de consistência (Pa.s); n_H - índice de comportamento de fluido; τ_o - tensão de cisalhamento inicial (Pa)

Tabela 17 Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 7,5 °Brix

Parâmetros	Temperaturas (°C)				
	20	30	40	50	60
K_H (Pa.s)	2,08	1,59	1,41	1,13	1,08
n_H	0,44	0,45	0,36	0,40	0,38
τ_o (Pa)	0,25	0,28	0,12	0,24	0,18
R^2	0,9917	0,9813	0,9825	0,9807	0,9860

Onde: K_H – índice de consistência (Pa.s); n_H - índice de comportamento de fluido; τ_o - tensão de cisalhamento inicial (Pa)

Tabela 18 Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 9,5 °Brix

Parâmetros	Temperaturas (°C)				
	20	30	40	50	60
K_H (Pa.s)	4,89	3,71	3,15	2,56	1,74
n_H	0,42	0,42	0,43	0,47	0,56
τ_o (Pa)	1,46	1,18	1,02	1,32	2,08
R^2	0,9830	0,9803	0,9747	0,9777	0,9797

Onde: K_H – índice de consistência (Pa.s); n_H - índice de comportamento de fluido; τ_o - tensão de cisalhamento inicial (Pa)

Tabela 19 Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 11,5 °Brix

Parâmetros	Temperaturas (°C)				
	20	30	40	50	60
K_H (Pa.s)	11,14	7,98	7,22	5,63	4,53
n_H	0,37	0,39	0,39	0,41	0,44
τ_o (Pa)	0,60	0,93	0,87	1,24	1,60
R^2	0,9953	0,9877	0,9863	0,9870	0,9760

Onde: K_H – índice de consistência (Pa.s); n_H - índice de comportamento de fluido; τ_o - tensão de cisalhamento inicial (Pa).

Tabela 20 Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para a polpa de acerola a 13,5 °Brix

Parâmetros	Temperaturas (°C)				
	20	30	40	50	60
K_H (Pa.s)	13,93	11,74	10,36	9,01	7,39
n_H	0,36	0,35	0,34	0,32	0,33
τ_o (Pa)	0,37	0,61	0,71	0,69	0,67
R^2	0,9937	0,9930	0,9937	0,9880	0,9903

Onde: K_H – índice de consistência (Pa.s); n_H - índice de comportamento de fluido; τ_o - tensão de cisalhamento inicial (Pa)

Nas Tabelas 16 a 20, observa-se que, de maneira geral, o índice de comportamento do fluido (n_H) diminuiu com o aumento da concentração da polpa, caracterizando as polpas mais concentradas como tendo um caráter pseudoplástico mais acentuado. Segundo Silva, Guimarães e Gasparetto (2005), o valor do índice de comportamento indica o grau de pseudoplasticidade, de forma que quanto mais afastado se encontra da unidade, maior a pseudoplasticidade do produto. Já se observando dentro de uma mesma concentração, com o aumento da temperatura nada se pode concluir sobre este parâmetro. Para polpa com 7,5° Brix, nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e para a polpa com 9,5 °Brix, na temperatura de 60 °C, foram observados índices de comportamento do fluido (n_H) incompatíveis com os observados para as polpas nas outras concentrações em que com a diminuição da concentração. Observando-se em uma mesma temperatura, há um aumento no índice de comportamento do fluido.

Essas divergências podem ter sido ocasionadas devido a erros experimentais, em virtude da necessidade de repetições para essas duas polpas nas temperaturas mais altas. As repetições foram realizadas após um período mais longo de armazenamento das polpas congeladas, podendo, então, o congelamento ter afetado os parâmetros reológicos.

Para o índice de consistência (K_H), observou-se uma diminuição dos seus valores com o aumento da temperatura e com a diminuição da concentração para praticamente todas as concentrações analisadas. Silva, Guimarães e Gasparetto (2005), ao trabalharem com suco industrializado de acerola com concentrações de sólidos solúveis de 4, 7, 10, 13 e 16 °Brix e no intervalo de temperatura de 5 °C a 85 °C, também observaram o mesmo comportamento tanto para os índices de comportamento do fluido quanto para os índices de consistência.

Para o parâmetro de tensão inicial (τ_o), nada se pode concluir. Segundo Branco (1995), apesar de o termo tensão inicial ser importante em aplicações tecnológicas para fluidos alimentícios, para a maioria dos aparelhos comerciais há certa dificuldade na obtenção de dados precisos durante sua determinação experimental.

Para melhor avaliar o efeito da concentração e da temperatura sobre os parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley, nas Tabela 21, 22 e 23 apresenta-se o ajuste de equações polinomiais de segunda ordem, em que se relaciona o índice de consistência (K_H) *versus* temperatura e concentração da polpa e equações para índices de comportamento do fluido (n_H) *versus* concentração da polpa.

Tabela 21 Equações ajustadas para índice de consistência (K_H) *versus* temperatura para a polpa de acerola, nas concentrações de 5,5 a 13,5 °Brix

Concentração (°Brix)	Equações ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)	R ²
5,5	$K_H = 0,0004T^2 - 0,0485T + 1,8153$	0,937
7,5	$K_H = 0,0006T^2 - 0,0688T + 3,2109$	0,986
9,5	$K_H = 0,0005T^2 - 0,1139T + 6,8746$	0,987
11,5	$K_H = 0,0024T^2 - 0,3450T + 16,8433$	0,974
13,5	$K_H = 0,0008T^2 - 0,2240T + 17,9655$	0,995

Onde: K_H – índice de consistência (Pa.s); T - temperatura (°C)

Tabela 22 Equações ajustadas para índice de consistência (K_H) *versus* concentração para a polpa de acerola, nas temperaturas de 20 a 60 °C

Temperatura (°C)	Equações ($5,5^{\circ}\text{Brix} \leq c \leq 13,5^{\circ}\text{Brix}$)	R ²
20	$K_H = 0,121c^2 - 0,562c - 0,008$	0,971
30	$K_H = 0,144c^2 - 1,331c + 3,610$	0,994
40	$K_H = 0,123c^2 - 1,072c + 2,608$	0,990
50	$K_H = 0,121c^2 - 1,209c + 3,303$	0,998
60	$K_H = 0,116c^2 - 1,345c + 4,363$	0,992

Onde: K_H – índice de consistência (Pa.s); c - concentração (°Brix)

Tabela 23 Equações ajustadas para índice de comportamento do fluido (n_H) *versus* concentração para a polpa de acerola, nas temperaturas de 20 a 60 °C

Temperatura (°C)	Equações ($5,5^{\circ}\text{Brix} \leq c \leq 13,5^{\circ}\text{Brix}$)	R ²
20	$n_H = 0,0002c^2 - 0,0182c + 0,5656$	0,964
30	$n_H = 0,0004c^2 - 0,0254c + 0,6232$	0,989
40	$n_H = 0,0007c^2 - 0,0086c + 0,5779$	0,999
50	$n_H = 0,0011c^2 - 0,0122c + 0,6938$	0,999
60	$n_H = 0,0082c^2 + 0,1349c - 0,0009$	0,968

Onde: n_H - índice de comportamento de fluido, c - concentração (°Brix)

Obs.: Os dados de n_H para a polpa com 7,5 °Brix, nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C, foram eliminados devido a erros experimentais anteriormente relatados

Branco (1995), ao analisar o comportamento reológico de suco de laranja concentrado em 55,0; 60,0 e 64,2 °Brix, para a faixa de temperatura de -9,4 a 20,5°C, também obteve equações polinomiais de segunda ordem para avaliação do índice de consistência (K_H) *versus* temperatura e equações exponenciais, quando avaliado em relação à concentração do suco. Para o índice de comportamento do fluido (n_H), a concentração de sólidos solúveis não afetou este parâmetro e quase não houve variação nas temperaturas analisadas, não sendo, portanto, ajustadas equações. Zainal et al. (2000) também avaliaram o efeito da temperatura (65, 70, 75, 80 e 85 °C) nos parâmetros de índice de consistência e índice de comportamento do fluido em suco de goiaba, nas concentrações de 9 e 11 °Brix, verificando haver um decaimento exponencial do índice de consistência *versus* temperatura e um aumento exponencial do índice de comportamento do fluido *versus* temperatura.

Os Gráficos 40, 41, 42, 43 e 44 demonstram o comportamento reológico da polpa de acerola quando as temperaturas de análises são fixadas, possibilitando avaliar a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação influenciada pelas diferentes concentrações da polpa. Um distanciamento da linearidade se observa, cada vez maior, à medida que se

aumenta a concentração de sólidos na polpa e, conseqüentemente, sua pseudoplasticidade.

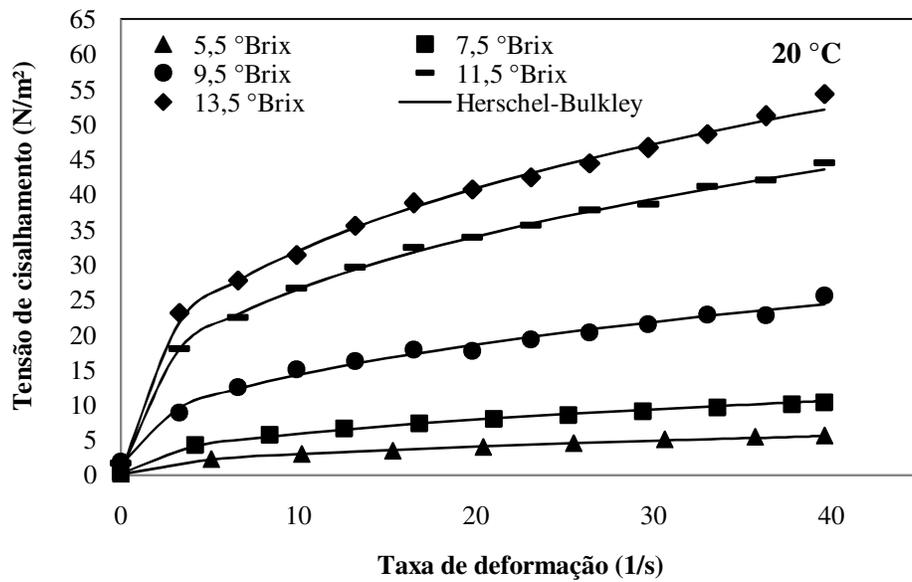


Gráfico 40 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 20 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix

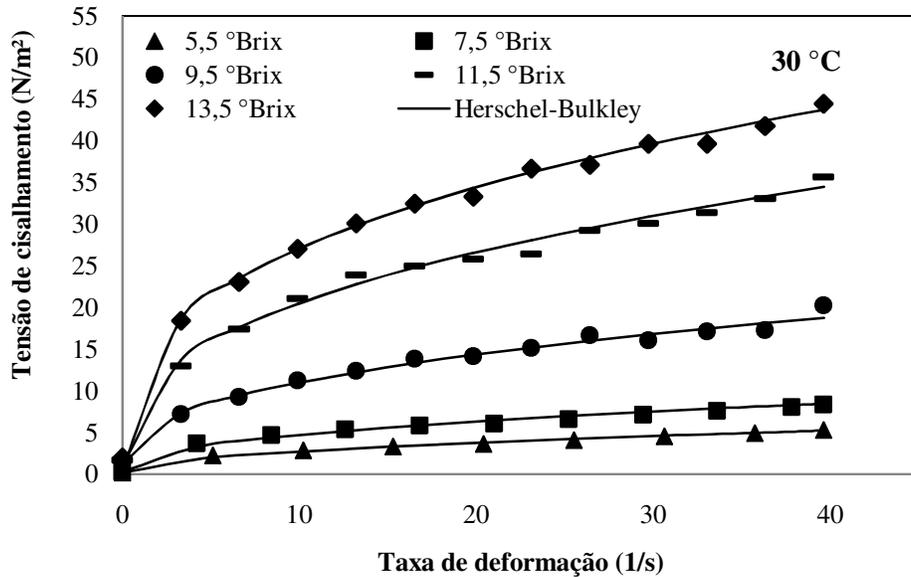


Gráfico 41 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 30 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix

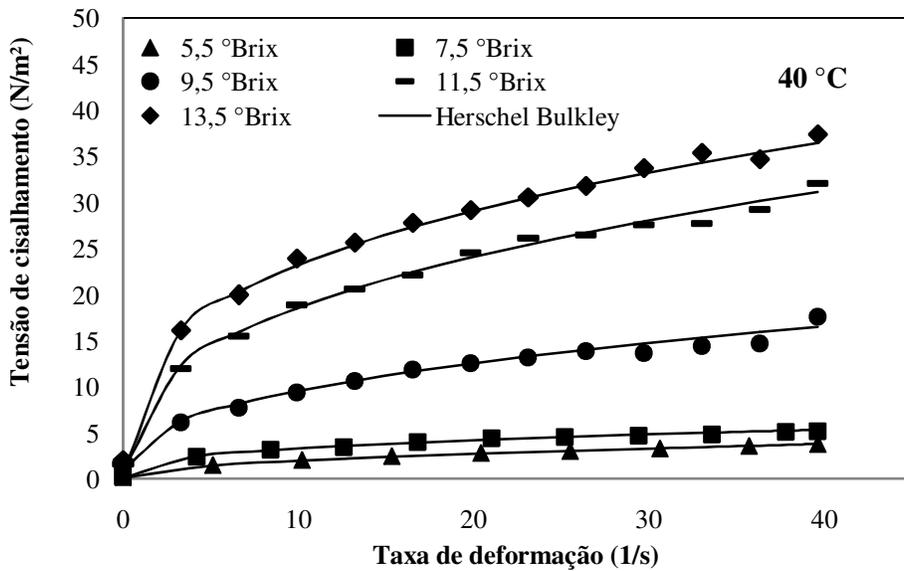


Gráfico 42 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 40 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix

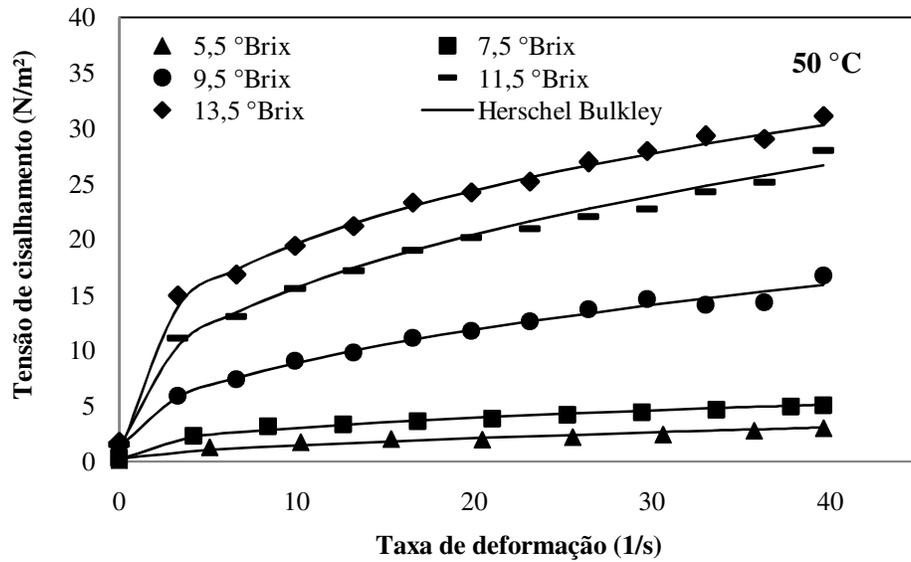


Gráfico 43 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 50 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix

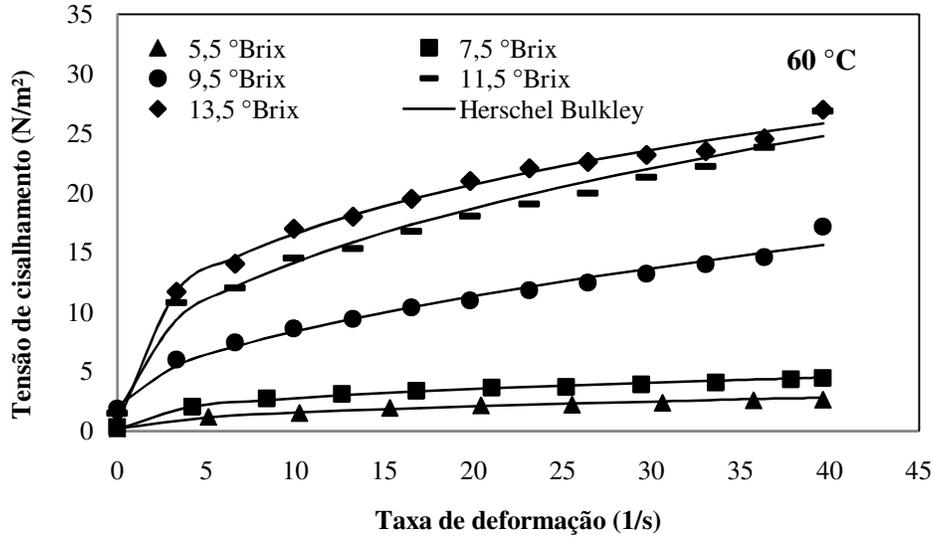


Gráfico 44 Relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação para análise, a 60 °C, das polpas, nas concentrações de 5,5; 7,5; 9,5; 11,5 e 13,5 °Brix

Pelos Gráficos 40 a 44 observa-se o comportamento pseudoplástico mais acentuado para as polpas com maiores concentrações. Verifica-se também a influência da concentração, no sentido de diminuir a inclinação das curvas de tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação, ou seja, da viscosidade aparente, quando há diminuição dos sólidos solúveis na polpa. A diminuição da inclinação das curvas também é observada para aumentos na taxa de deformação, assim como ocorrido quando se avaliou a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação sob a influência da variação da temperatura (Gráficos 30 a 34). Segundo Vitali (1983), citado por Branco (1995), a redução na concentração de sólidos influencia a mudança de comportamento reológico pois, com a diluição, ocorre dispersão física das partículas da polpa, o que reduz a possibilidade de interação entre elas e também decréscimo da concentração de solutos, reduzindo, assim, sua característica não newtoniana.

Nos Gráficos 45 a 49 mostra-se a diminuição da viscosidade aparente das polpas com o aumento da taxa de deformação e diminuição dos sólidos solúveis.

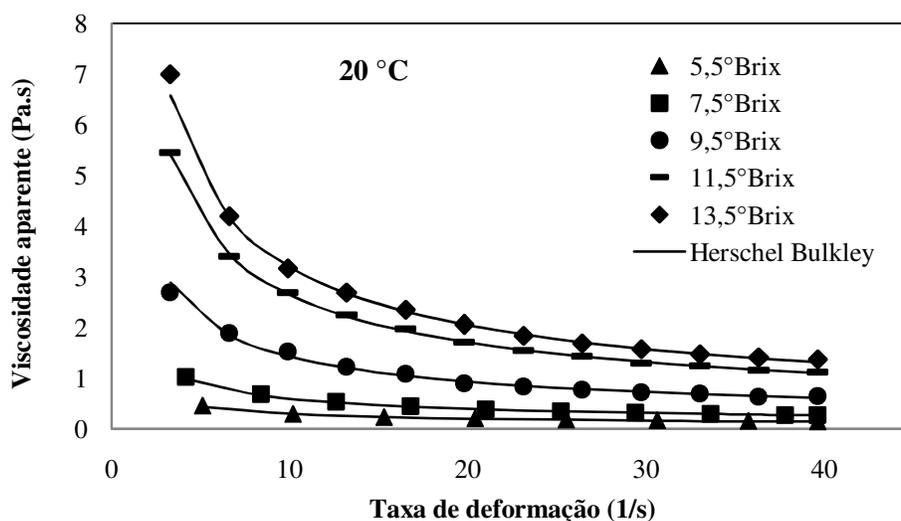


Gráfico 45 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 20 °C

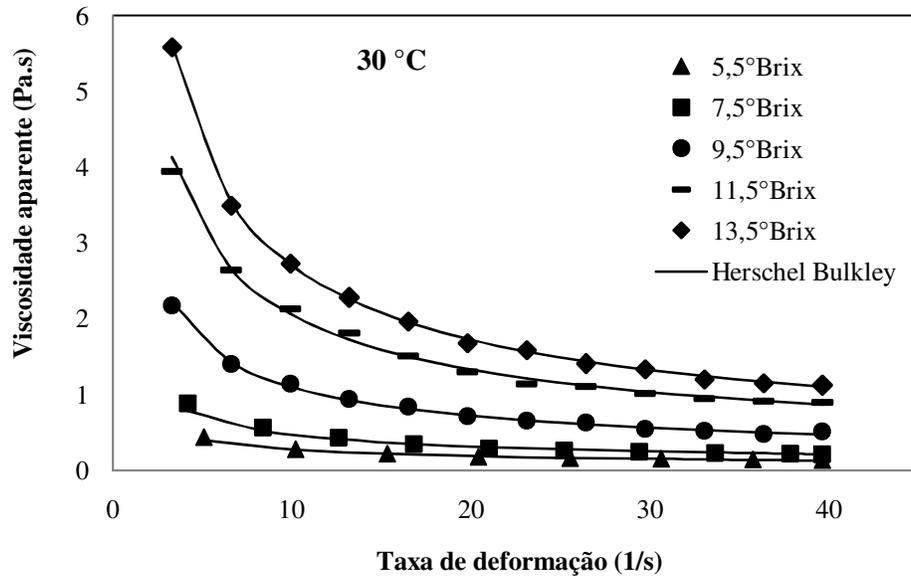


Gráfico 46 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 30 °C

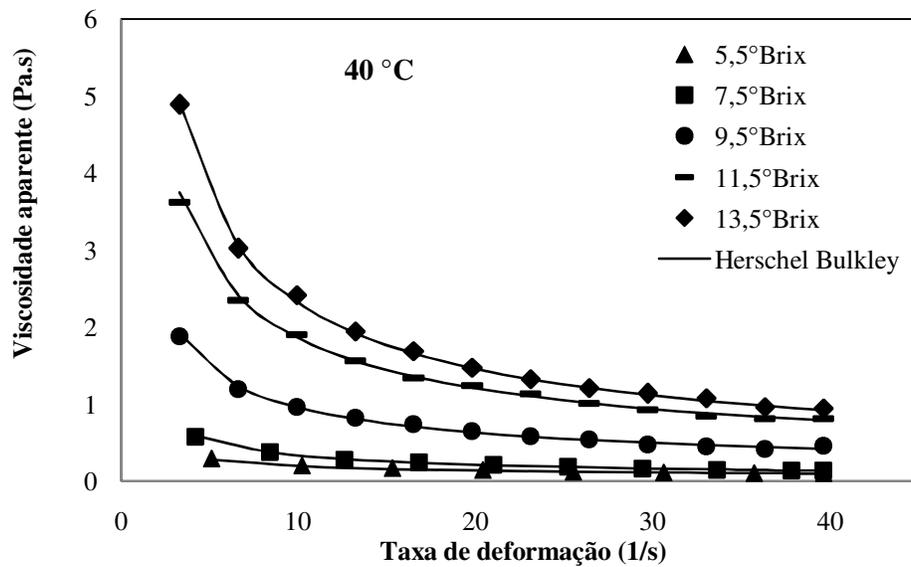


Gráfico 47 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 40 °C

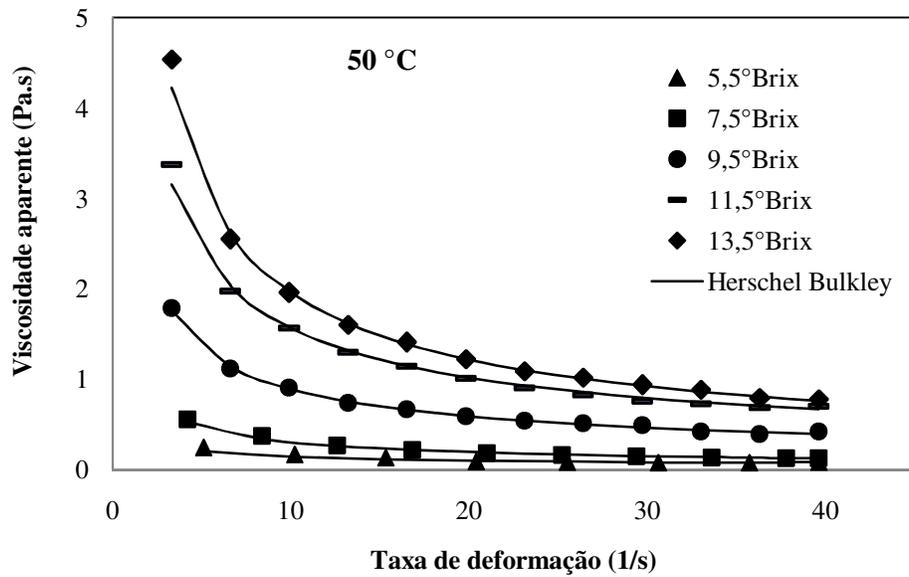


Gráfico 48 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 50 °C

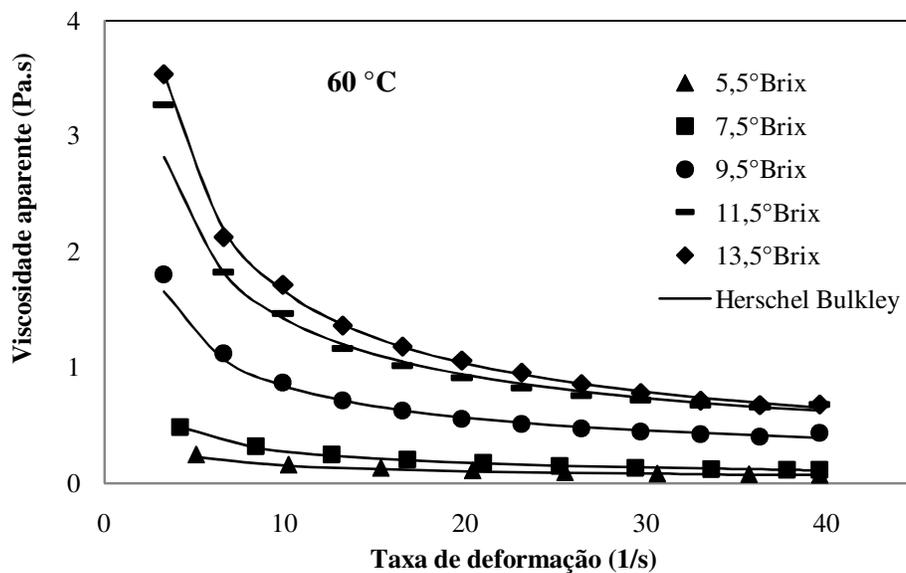


Gráfico 49 Relação entre a viscosidade aparente e a taxa de deformação das polpas, para a temperatura de 60 °C

Em relação à influência da concentração das polpas na viscosidade, observa-se, nos Gráficos 45 a 49, que quanto maior a concentração de sólidos maior a viscosidade aparente e maior é sua queda com o aumento da taxa de deformação. Azoubel et al. (2005) avaliaram o efeito da concentração sobre a viscosidade do suco de caju, na temperatura de 30 °C, para teores de sólidos solúveis na faixa de 5,5 a 25,0 °Brix, observando que houve um aumento da viscosidade em função do conteúdo de sólidos. De acordo com Constenla, Lozano e Crapiste (1989), a viscosidade da solução é uma função das forças intermoleculares e interações entre água e soluto que acabam por restringir o movimento molecular, dando um incremento à viscosidade. Quanto mais solutos estão dissolvidos na solução, maior é a viscosidade, devido a um aumento nas ligações de hidrogênio entre as moléculas de água e soluto.

6 CONCLUSÕES

A avaliação das propriedades termofísicas e do comportamento reológico da polpa de acerola é importante para futuros cálculos de engenharia que envolvam transferência de calor e massa, possibilitando a otimização dos processos na indústria de alimentos.

Para as propriedades termofísicas densidade e calor específico, houve diminuição com a redução da temperatura e a concentração de sólidos solúveis. A condutividade térmica, medida experimentalmente por meio da sonda linear de aquecimento, e a difusividade térmica, avaliada por meio da relação entre as outras três propriedades, apresentaram aumentos com a redução da temperatura e a concentração de sólidos solúveis. Entretanto, os dados experimentais da condutividade térmica não se ajustaram completamente aos modelos matemáticos analisados (paralelo, série e de Maxwell-Eucken), sendo, então, ajustadas equações para o cálculo direto desta propriedade nas faixas de temperatura e concentração de 0 a -30 °C e 5,5 a 13,5 °Brix, respectivamente.

Para todas as propriedades termofísicas, a fração de gelo foi a grande responsável por bruscas mudanças observadas na faixa de temperatura próxima à de início de congelamento.

Para o comportamento reológico em todas as concentrações e temperaturas estudadas, observou-se um caráter não newtoniano da polpa e, dentre os modelos utilizados, o de Herschel-Bulkley proporcionou os melhores parâmetros estatísticos, sendo, então, utilizado para ajuste dos dados experimentais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING. **ASHRAE handbook**: refrigeration. Atlanta: Refrigeration and Air-conditioning Engineers, 2002.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 28, n. 1, p. 126-134, jan./fev. 2004.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC international**. 16. ed. Arlington: AOAC, 1996.

AZOUBEL, P. M. et al. Effect of concentration on the physical properties of cashew juice. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 66, n. 4, p. 413-417, Apr. 2005.

BECKER, B. R.; FRICKE, B. A. Food thermophysical property models. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, New York, v. 26, n. 5, p. 627-636, 1999.

BEZERRA, J. R. M. V.; QUEIROZ, A. J. de M.; GASPARETTO, C. A. Reologia de polpa de manga e ajuste dos parâmetros reológicos em função da temperatura. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 37-42, 2001.

BITTER, T.; MUIR, H. M. A modified uronic acid carbazole reaction. **Analytical Biochemistry**, New York, v. 4, n. 4, p. 330-334, Oct. 1962.

BONOMO, R. C. F. et al. Thermophysical properties of cashew juice at different concentrations and temperatures. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 35-42, 2009.

BOURNE, M. C. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. 2. ed. London: Academic Press, 2002.

BRANCO, I. G. **Suco de laranja concentrado: comportamento reológico a baixas temperaturas**. 1995. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRANCO, I. G.; GASPARETTO, C. A. Comportamento reológico de misturas de polpa de manga e sucos de laranja e cenoura utilizando modelo de Casson. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 8, n. 2, p. 183-189, abr./jun. 2005

BRASIL. Instrução normativa nº01, de 7 de janeiro de 2000. Regulamento técnico geral para fixação dos padrões de identidade e qualidade para polpa de fruta. **Diário Oficial da União**, Brasília, 10 jan. 2000. Seção 1, p. 54-55.

BROCK, J. et al. Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 3, p. 564-570, jul./set. 2008.

CABRAL, R. A. F. et al. Rheological and thermophysical properties of blackberry juice. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 3, p. 589-596, jul./set. 2007.

CARSON J. K. Review of effective thermal conductivity models for food. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 29, n. 6, p. 958-967, July 2006.

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**, Chicago, v. 54, n. 3, p. 663-668, May 1989.

DÁVILA, L. S. M. **Avaliação do congelamento de solução modelo por condutividade térmica**. 2007. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DAWSON, A.; RIDES, M.; NOTTAY, J. The effect of pressure on the thermal conductivity of polymer melts. **Polymer Testing**, Middlesex, v. 25, n. 1, p. 268-275, Feb. 2006.

DELGADO, A. E. et al. Thermal conductivity of unfrozen and frozen Strawberry and Spinach. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 31, n. 2, p. 137-146, 1997.

DINIZ, M. D. M. S. **Caracterização do comportamento reológico e determinação de propriedades termofísicas de polpa de manga Ubá**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

HELDMAN, D. R. Food properties during freezing. **Food Technology**, Chicago, v. 36, n. 2, p. 92-96, 1982.

HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. **Handbook of food engineering**. New York: Marcel Dekker, 1992.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de dados agregados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. Disponível em: <**Erro! A referência de hiperlink não é válida.**>. Acesso em: 28 set. 2011.

MANICA, I. et al. **Acerola: tecnologia de produção, pós-colheita, congelamento, exportação, mercados**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2003.

MATTIO, F.; TADINI, C. C.; MATUDA, T. G. Construção de uma sonda linear de aquecimento para determinação da condutividade térmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2005. p. 1-6.

MATTOS, J. S. **Banco de dados de propriedades termofísicas de produtos hortícolas**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MERCALI, G. D. et al. Physical properties of acerola and blueberry pulps. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 106, n. 4, p. 283–289, 2011.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Tabela Brasileira de composição de alimentos**. 4. ed. rev. e ampl. Campinas: NEPA/UNICAMP, 2011.

MIYAWAKI, O.; PONGSAWATMANIT, R. Mathematical analysis of the effective thermal conductivity of food materials in the frozen state. **Bioscience, Biotechnology Biochemistry**, Tokyo, v. 58, n. 7, p. 1222-1225, 1994.

MOHSENIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. London: Gordon and Breach, 1980.

MOURA, S. et al. Propriedades termofísicas de soluções modelo similares a sucos: parte II. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 3, p. 454-459, jul./set. 2005.

MUNIZ, M. B. et al. Caracterização termofísica de polpas de bacuri. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 2, p. 360-368, abr./jun. 2006.
MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**: volume 1. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

MURPHY, R. Y.; MARKS, B. P.; MARCY, J. A. Apparent specific heat of chicken breast patties and their constituent proteins by differential scanning calorimetry. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 63, n. 1, p. 88-91, Mar. 1998.

OLIVEIRA, R. P. S. **Determinação de propriedades físicas e de transporte de suco de acerola**. 1997. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OLIVEIRA, S. D. et al. Condutividade térmica do suco de laranja. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 101-104, 2001.

PARK, K. J.; ALONSO, L. F.; NUNES, A. S. Determinação experimental da condutividade e difusividade de grãos em regime permanente. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 264-269, maio/ago. 1999.

PARK, K. J.; MURR, F. E. X.; SALVADEGO, M. Medição da condutividade térmica de milho triturado pelo método da sonda. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 242-247, set./dez. 1997.

PELEGRINE, D. H. **Comportamento reológico das polpas de manga e abacaxi**. 1999. 115 f. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PEREIRA, C. G. et al. Thermal conductivity measurements and predictive models for frozen guava and passion fruit pulps. **International Journal of Food Properties**, Philadelphia, v. 16, n. 4, p. 778-789, Feb. 2013.

RAHMAN, M. S. **Food properties handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

RAO, M. A. **Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications**. New York: Aspen Publishers, 1999.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. **Engineering properties of foods**. 3. ed. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.

RENAUD, T. et al. Thermal properties of food materials in the frozen state. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 15, n. 2, p. 83-97, 1992.

RESENDE, J. V.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Medidas da condutividade térmica efetiva de modelos de polpas de frutas no estado congelado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 177-183, maio/ago. 2002.

RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A. K.; OLIVEIRA, J. R. P. **A cultura da aceroleira**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003.

RODRIGUES, I. et al. **A química e a reologia no processamento dos alimentos**. Lisboa: Instituto Piaget, 2003.

SARRIA, S. D.; HONORIO, S. L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica L.*) "Roxo de Valinhos". **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 185-194, jan./abr. 2004.

SILVA, F. C. **Reologia do suco de acerola**: efeito da concentração e da temperatura. 2000. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, F. C.; GUIMARÃES, D. H. P.; GASPARETTO, C. A. Reologia do suco de acerola: efeitos da concentração e temperatura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 121-126, jan./mar. 2005.

SILVA, N. M. C. **Propriedades termofísicas e comportamento reológico da polpa de jenipapo (*Genipa americana L.*)**. 2008. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga.

SINGH, K. K.; GOSWAMI, T. K. Thermal properties of cumin seed. **Journal of Food Engineering**, Essex, v.45, n. 4, p. 181-187, Sept. 2000.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. 2. ed. Michigan: Freeman Press, 1996.

SWEAT, V. E. Thermal properties of foods. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, 1986. p. 49-87.

TOCCI, A. M.; MASCHERONI, R. H. Characteristics of differential scanning calorimetry determination of thermophysical properties of meats. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, Zurich, v. 31, n. 5, p. 418-426, Aug. 1998.

TOCCI, A. M.; MASCHERONI, R. H. Some thermal properties of fresh and osmotically dehydrated kiwifruit above and below the initial freezing temperature. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 88, n. 1, p. 20-27, 2008.

VIANA, A. D. **Propriedades termofísicas e comportamento reológico da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) em diferentes concentrações e temperaturas**. 2010. 99 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2010.

VIDAL, J. R. M. B. et al. Propriedades reológicas da polpa de manga (*Mangifera indica* L. cv. Keitt) centrifugada. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 30, n. 5, p. 955-960, set./out. 2006.

VITALI, A. A. **Comportamento reológico de suco de laranja concentrado congelado a baixas temperaturas**. 1983. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

ZAINAL, B. S. et al. Effects of temperature on the physical properties of pink guava juice at two different concentrations. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 43, n. 1, p. 55-59, 2000.