



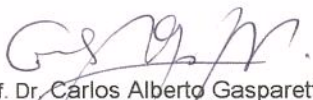
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**REOLOGIA DO SUCO DE ACEROLA: EFEITO  
DA CONCENTRAÇÃO E DA TEMPERATURA**

**PARECER**

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Fernando Cascardo da Silva, aprovada pela Comissão Julgadora em 29 de fevereiro de 2000.

Campinas, 29 de fevereiro de 2000.

  
Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto  
Presidente da Banca

**Fernando Cascardo da Silva**  
Engenheiro Químico

**Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto**  
Orientador

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Campinas - SP  
2000



UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

|              |                                     |
|--------------|-------------------------------------|
| UNIDADE      | B.C.                                |
| N.º CHAMADA: | UNICAMP                             |
| V.           | Ex.                                 |
| TCM30 BC/    | 40786                               |
| PROC.        | 278/00                              |
| C            | <input type="checkbox"/>            |
| D            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| PREÇO        | \$99,00                             |
| DATA         | 30/03/00                            |
| N.º CPD      |                                     |

CM-00138987-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

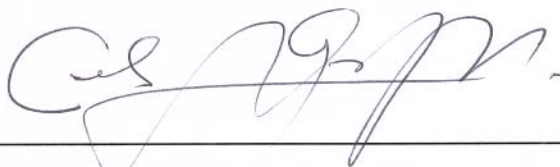
Si38r Silva, Fernando Cascardo da  
Reologia do suco de acerola: efeito da concentração e da temperatura / Fernando Cascardo da Silva. – Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Carlos Alberto Gasparetto  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Reologia. 2.Acerola. 3.Suco de frutas. 4.Temperatura.  
I.Gasparetto, Carlos Alberto. II.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.

**BANCA EXAMINADORA**

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE



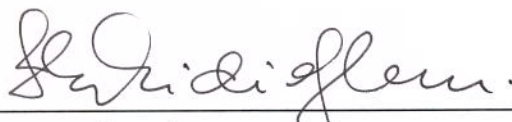
---

Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto  
(Orientador)



---

Prof.ª Dr.ª Roseane Lopes da Cunha  
(Membro)



---

Prof.ª Dr.ª Fernanda E. X. Murr  
(Membro)



---

Prof.ª Dr.ª Araújo A. B. Pécora  
(Membro)

*À Deus acima de tudo;*

*Aos meus pais Irahya e Libia pelo  
apoio, amor e valioso exemplo de  
vida;*

*À minha esposa Simone pelo  
enorme incentivo, compreensão,  
carinho e muito amor;*

*À toda família pelo estímulo.*



*Felicidade é a conquista do sucesso interior.*

*Sentir-se realizado, e próspero é uma ambição natural de todos nós. Todavia, só conseguiremos chegar ao topo, se tivermos o otimismo audacioso de confiar nos poderes do invisível. Sob a proteção do amor do Universo, seguiremos para frente sem medo de viver.*

*Zibia Gasparetto*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Carlos Alberto Gasparetto, pela orientação da tese, dedicação, incentivo, amizade, experiência compartilhada e aos momentos de descontração.

Às Professoras Dra. Roseane Lopes da Cunha e Dra. Fernanda E. X. Murr (DEA – UNICAMP) e Dra. Araújo Pecora (FEM – UNICAMP), pela correção da tese e pelas importantes sugestões, contribuindo para o aperfeiçoamento deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos pela oportunidade de realização deste trabalho.

À EMBRAPA – CTAA pela oportunidade e pelo suporte financeiro durante todo o curso de Mestrado.

À Companhia de Cítricos do Brasil (CCB), fazenda CAJUBA, pelo fornecimento de suco de acerola.

Aos amigos do CTAA que de alguma forma contribuíram com o trabalho.

À turma do laboratório, Angela, Enny, Daniella, Raniere, Antônio e Luiza, por constituírem um ambiente de trabalho amigo e agradável.

Aos meus amigos do Mestrado Daniel, Guiga, Éder, Suzi, Luciana e Isabel, pelo companheirismo, apoio e pelos grandes momentos de descontração.

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho.

## ÍNDICE GERAL

|                                                          |              |
|----------------------------------------------------------|--------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                  | iv           |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                                  | vii          |
| ÍNDICE DE QUADROS .....                                  | ix           |
| NOMENCLATURA .....                                       | x            |
| RESUMO .....                                             | xiii         |
| SUMMARY .....                                            | xiv          |
| <br><b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>                 | <br><b>1</b> |
| 1.1. Objetivo .....                                      | 3            |
| <br><b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>      | <br><b>4</b> |
| 2.1. Generalidades .....                                 | 4            |
| 2.1.1. A Acerola .....                                   | 4            |
| 2.1.2. Aspectos Econômicos .....                         | 6            |
| 2.1.3. Melhoramento Genético .....                       | 6            |
| 2.1.4. Mercado Interno e Externo .....                   | 7            |
| 2.1.5. Distinção entre Polpas, Frutas e Néctares .....   | 8            |
| 2.1.6. Processamento Industrial da Acerola .....         | 9            |
| 2.2. Reologia .....                                      | 13           |
| 2.3. Estudos Reológicos .....                            | 14           |
| 2.3.1. Lei da Viscosidade de Newton .....                | 14           |
| 2.3.2. Viscosidade Aparente .....                        | 16           |
| 2.3.3. Fluido Não-Newtoniano Independente do Tempo ..... | 17           |
| 2.3.4. Fluido Não-Newtoniano Dependente do Tempo .....   | 22           |
| 2.3.5. Fluido Viscoelástico .....                        | 21           |

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.6. Modelos Reológicos .....                                                         | 26        |
| 2.3.7. Efeito da Temperatura e Concentração na Viscosidade....                          | 30        |
| 2.3.8. Reologia do Suco de Acerola.....                                                 | 41        |
| <b>CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                            | <b>44</b> |
| 3.1. Matéria-Prima.....                                                                 | 44        |
| 3.2. Reometria.....                                                                     | 44        |
| 3.2.1. Descrição do Reômetro e Acessórios.....                                          | 44        |
| 3.2.2. Metodologia de Preparo das Amostras e para Obtenção<br>dos Dados Reológicos..... | 45        |
| 3.2.3. Experimentos Preliminares.....                                                   | 50        |
| 3.2.4. Delineamento Experimental para Construção dos<br>Reogramas.....                  | 51        |
| 3.3. Processamento dos Resultados.....                                                  | 53        |
| 3.4. Análises Físicas e Químicas.....                                                   | 53        |
| <b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                        | <b>56</b> |
| 4.1. Caracterização Físico-Química.....                                                 | 56        |
| 4.2. Caracterização Reológica.....                                                      | 57        |
| 4.2.1. Determinação de Comportamento Dependente do<br>Tempo.....                        | 57        |
| 4.2.2. Modelagem e Obtenção dos Parâmetros Reológicos.....                              | 58        |
| 4.2.3. Reogramas e Curva de Viscosidade.....                                            | 63        |
| 4.3. Efeito da Temperatura sobre os Parâmetros Reológicos.....                          | 69        |
| 4.3.1. Efeito da Temperatura sobre o Índice de Comportamento.                           | 69        |
| 4.3.2. Efeito da Temperatura sobre a Viscosidade Aparente.....                          | 72        |
| 4.3.3. Efeito da Temperatura sobre o Índice de Consistência.....                        | 78        |
| 4.4. Efeito da Concentração sobre os Parâmetros Reológicos.....                         | 82        |
| 4.4.1. Efeito da Concentração sobre a Viscosidade Aparente.....                         | 82        |
| 4.4.2. Efeito da Concentração sobre o Índice de Consistência ...                        | 85        |

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES .....</b>                 | <b>88</b> |
| <b>CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES.....</b>                   | <b>90</b> |
| <b>CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b> | <b>91</b> |
| <b>APÊNDICE .....</b>                                | <b>99</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                    |                                                                                                                                                    |    |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.1.</b> | Conteúdo de vitamina C em vários frutos.....                                                                                                       | 5  |
| <b>Figura 2.2.</b> | Fluxograma das operações realizadas durante o processamento para a obtenção do suco de acerola pasteurizado concentrado e congelado.....           | 9  |
| <b>Figura 2.3.</b> | Esquema do perfil de velocidade para um fluido Newtoniano contido entre duas placas planas e paralelas.....                                        | 15 |
| <b>Figura 2.4.</b> | Classificação de comportamento reológico.....                                                                                                      | 18 |
| <b>Figura 2.5.</b> | Reogramas para vários tipos de fluidos independentes do tempo..                                                                                    | 21 |
| <b>Figura 2.6.</b> | Reograma para fluido com comportamento tixotrópico.....                                                                                            | 23 |
| <b>Figura 2.7.</b> | Reograma para fluido com comportamento reopético.....                                                                                              | 25 |
| <b>Figura 3.1.</b> | Determinação de comportamento tixotrópico e do tempo de equilíbrio.....                                                                            | 50 |
| <b>Figura 4.1.</b> | Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 4,0 °Brix.....  | 64 |
| <b>Figura 4.2.</b> | Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 7,0 °Brix.....  | 64 |
| <b>Figura 4.3.</b> | Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 10,0 °Brix..... | 65 |
| <b>Figura 4.4.</b> | Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 13,0 °Brix..... | 65 |
| <b>Figura 4.5.</b> | Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 16,0 °Brix..... | 66 |



|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 4.6.</b> Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 4,0 °Brix, em diversas temperaturas.....                                                                                              | 67 |
| <b>Figura 4.7.</b> Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 7,0 °Brix, em diversas temperaturas.....                                                                                              | 67 |
| <b>Figura 4.8.</b> Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 10,0 °Brix, em diversas temperaturas.....                                                                                             | 68 |
| <b>Figura 4.9.</b> Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix, em diversas temperaturas.....                                                                                             | 68 |
| <b>Figura 4.10.</b> Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 16,0 °Brix, em diversas temperaturas.....                                                                                            | 69 |
| <b>Figura 4.11.</b> Efeito da temperatura sobre o parâmetro nhb do modelo de Herschel-Bulkley, para suco de acerola em diversas concentrações de sólidos totais.....                                                | 70 |
| <b>Figura 4.12.</b> Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente calculada na taxa de deformação de 100 s <sup>-1</sup> , segundo a equação de Arrhenius, para suco de acerola em diversas concentrações..... | 73 |
| <b>Figura 4.13.</b> Efeito da taxa de deformação sobre a energia de ativação calculada pela variação da viscosidade aparente, segundo equação de Arrhenius, nas faixas de temperatura e concentração estudadas..... | 76 |
| <b>Figura 4.14.</b> Efeito da temperatura sobre o índice de consistência calculado segundo a equação de Arrhenius, para suco de acerola em diversas concentrações.....                                              | 79 |
| <b>Figura 4.15.</b> Efeito da temperatura sobre o somatório do índice de consistência e da tensão inicial, segundo equação de Arrhenius, para suco de acerola em diversas concentrações.....                        | 80 |
| <b>Figura 4.16.</b> Efeito da concentração sobre a viscosidade aparente calculada na taxa de deformação de 100 s <sup>-1</sup> , segundo relação potencial, para o suco de acerola em diversas temperaturas.....    | 84 |

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 4.17.</b> Efeito da concentração sobre o índice de consistência, segundo relação potencial, para o suco de acerola em diversas temperaturas..... | 87 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 4.1.</b> Caracterização físico-química do suco de acerola a 13,0 °Brix....                                                                                                                                                           | 56 |
| <b>Tabela 4.2.</b> Determinação de comportamento dependente do tempo expresso em percentagem de redução entre a viscosidade aparente inicial e final, durante 30 minutos de cisalhamento.....                                                  | 57 |
| <b>Tabela 4.3.</b> Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.....                                                                                                                       | 59 |
| <b>Tabela 4.4.</b> Parâmetros do modelo da Lei da Potência (LP) para o suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.....                                                                                                                      | 59 |
| <b>Tabela 4.5.</b> Parâmetros do modelo de Mizrahi & Berk (MB) para suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.....                                                                                                                         | 60 |
| <b>Tabela 4.6.</b> Parâmetros do modelo de Casson (C) para suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.....                                                                                                                                  | 60 |
| <b>Tabela 4.7.</b> Parâmetros obtidos pela modelagem do índice de comportamento ( $n_{hb}$ ) em função da temperatura do suco de acerola.....                                                                                                  | 70 |
| <b>Tabela 4.8.</b> Parâmetros da equação de Arrhenius obtidos da relação com a viscosidade aparente calculada em diversas taxas de deformação e concentrações de sólidos solúveis.....                                                         | 74 |
| <b>Tabela 4.9.</b> Valores da viscosidade aparente e energia de ativação na taxa de deformação de $100\text{ s}^{-1}$ e dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para o suco de acerola em diversas concentrações e temperaturas..... | 75 |
| <b>Tabela 4.10.</b> Variação da energia de ativação em função da taxa de deformação, em diversas concentrações de sólidos solúveis.....                                                                                                        | 77 |
| <b>Tabela 4.11.</b> Representação dos valores de energia de ativação e dos parâmetros do modelo de Arrhenius, utilizando-se as variáveis dependentes do índice de consistência e da viscosidade aparente, em diversas concentrações.....       | 81 |

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 4.12.</b> Parâmetros do ajuste ao modelo potencial aplicado às curvas de viscosidade aparente, na taxa de deformação de $100 \text{ s}^{-1}$ , em função da concentração de sólidos solúveis.....   | 83 |
| <b>Tabela 4.13.</b> Parâmetros do ajuste ao modelo exponencial aplicado às curvas de viscosidade aparente, na taxa de deformação de $100 \text{ s}^{-1}$ , em função da concentração de sólidos solúveis..... | 83 |
| <b>Tabela 4.14.</b> Parâmetros de ajuste ao modelo potencial aplicado às curvas do índice de consistência em função da concentração de sólidos solúveis.....                                                  | 85 |
| <b>Tabela 4.15.</b> Parâmetros de ajuste ao modelo exponencial aplicado às curvas do índice de consistência em função da concentração de sólidos solúveis.....                                                | 86 |



## ÍNDICE DE QUADROS

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Quadro 2.1.</b> Modelos Newtoniano, Lei da Potência e Plástico de Bingham como casos particulares do modelo de Herschel-Bulkley.....                                                                                                                                  | 28 |
| <b>Quadro 2.2.</b> Índice de comportamento (n) e energia de ativação do modelo de Arrhenius para alimentos líquidos Newtonianos e não-Newtonianos.....                                                                                                                   | 32 |
| <b>Quadro 2.3.</b> Representação das constantes da equação combinada da temperatura e concentração (eq. 2.16) para o cálculo da viscosidade aparente para purês, sucos de frutas e água pura. A energia de ativação foi calculada a partir da constante $\delta_n$ ..... | 40 |
| <b>Quadro 2.4.</b> Resultados dos parâmetros reológicos ajustados para o modelo da Lei da Potência com os respectivos coeficientes de determinação em diferentes temperaturas e concentrações, e energia de ativação do modelo de Arrhenius para o suco de acerola.....  | 42 |
| <b>Quadro 3.1.</b> Especificações relativas ao equipamento Contraves.....                                                                                                                                                                                                | 45 |
| <b>Quadro 3.2.</b> Conversão da velocidade rotacional em taxa de deformação..                                                                                                                                                                                            | 49 |
| <b>Quadro 3.3.</b> Avaliação e determinação de comportamento dependente do tempo para alcançar o equilíbrio.....                                                                                                                                                         | 51 |
| <b>Quadro 3.4.</b> Delineamento experimental para construção dos reogramas...                                                                                                                                                                                            | 52 |



## NOMENCLATURA

|                     |                                                                                              |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $a_0, a_1, a_2$     | Constantes da equação 2.10; adimensionais                                                    |
| $a_{0,e}$           | Constante da equação 2.11; [Pa.s]                                                            |
| $a_{0,p}$           | Constante da equação 2.12; [Pa.s/ $^{\circ}$ Brix <sup>a<sub>1,p</sub></sup> ]               |
| $a_{1,e}$           | Constante da equação 2.11; [ $^{\circ}$ Brix <sup>-1</sup> ]                                 |
| $a_{1,p}$           | Constante da equação 2.12; adimensional                                                      |
| $b_{0,e}$           | Constante da equação 2.13; [Pa.s <sup>n</sup> ]                                              |
| $b_{0,p}$           | Constante da equação 2.14; [Pa.s <sup>n</sup> / $^{\circ}$ Brix <sup>b<sub>1,p</sub></sup> ] |
| $b_{1,e}$           | Constante da equação 2.13; [ $^{\circ}$ Brix <sup>-1</sup> ]                                 |
| $b_{1,p}$           | Constante da equação 2.14; adimensional                                                      |
| A                   | Área de cisalhamento; [m <sup>2</sup> ]                                                      |
| C                   | Concentração de sólidos solúveis; [ $^{\circ}$ Brix]                                         |
| $C_{0,k}$           | Constante da equação 2.9; [Pa.s <sup>n</sup> ]                                               |
| Din14, Din25, Din45 | Sistemas de medida do reômetro                                                               |
| $E_{at}$            | Energia de ativação geral; [kcal/gmol]                                                       |
| $E_{at,\eta}$       | Energia de ativação determinada em função da viscosidade aparente; [kcal/gmol]               |
| $E_{at,k}$          | Energia de ativação determinada em função do índice de consistência; [kcal/gmol]             |
| F                   | Força; [N]                                                                                   |
| g                   | Aceleração da gravidade; [m/s <sup>2</sup> ]                                                 |
| HB                  | Modelo de Herschel-Bulkley                                                                   |
| K                   | Índice de consistência geral; [Pa.s <sup>n</sup> ]                                           |
| $K_{ip}$            | Índice de consistência do modelo da Lei da Potência;<br>[Pa.s <sup>n<sub>ip</sub></sup> ]    |
| $K_{hb}$            | Índice de consistência do modelo de Herschel-Bulkley;<br>[Pa.s <sup>n<sub>hb</sub></sup> ]   |

|                |                                                                                                |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $K_{mb}$       | Índice de consistência do modelo de Mizrahi & Berk ;<br>[Pa.s <sup><math>n_{mb}</math></sup> ] |
| $K_c$          | Índice de consistência do modelo de Casson;<br>[Pa.s <sup><math>n_c</math></sup> ]             |
| $K_{0,hb}$     | Constante do modelo de Herschel-Bulkley; [Pa]                                                  |
| $(K_{0,mb})^2$ | Tensão inicial de Mizrahi & Berk; [Pa]                                                         |
| $(K_{0,c})^2$  | Tensão inicial de Casson; [Pa]                                                                 |
| LP             | Modelo da Lei de Potência                                                                      |
| MB             | Modelo de Mizrahi & Berk                                                                       |
| N              | Rotação do cilindro interno; [rpm]                                                             |
| n              | Índice de comportamento geral; adimensional                                                    |
| $n_{lp}$       | Índice de comportamento do modelo da LP;<br>adimensional                                       |
| $n_{hb}$       | Índice de comportamento do modelo de HB;<br>adimensional                                       |
| $n_{mb}$       | Índice de comportamento do modelo de MB;<br>adimensional                                       |
| $n_c$          | Índice de comportamento do modelo de C;<br>adimensional                                        |
| Q              | Razão de variação da viscosidade aparente;<br>adimensional                                     |
| $R_a$          | Raio externo do cilindro rotativo; [mm]                                                        |
| $R_b$          | Raio interno do cilindro fixo; [mm]                                                            |
| R              | Constante dos gases ideais; [kcal/gmol.K]                                                      |
| $R^2$          | Coefficiente de determinação                                                                   |
| SSR            | Soma dos quadrados dos resíduos                                                                |
| T              | Temperatura; [K]                                                                               |
| U              | Constante de conversão de velocidade rotacional em<br>taxa de deformação; adimensional         |
| Y              | Leitura da escala do mostrador; adimensional                                                   |

## Letras Gregas

|                |                                                                                         |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_n$     | Constante das equações 2.15 e 2.16; [Pa.s/ $^{\circ}$ Brix $^{\beta_n}$ ]               |
| $\alpha_k$     | Constante da equação 2.17; [Pa.s $^n$ / $^{\circ}$ Brix $^{\beta_k}$ ]                  |
| $\alpha_e$     | Constante da equação 2.18; [Pa.s]                                                       |
| $\alpha_p$     | Constante da equação 2.19; [Pa.s $^n$ ]                                                 |
| $\beta_n$      | Constante da equação 2.15 e 2.16; adimensional                                          |
| $\beta_k$      | Constante da equação 2.17; adimensional                                                 |
| $\beta_e$      | Constante da equação 2.18; [ $^{\circ}$ Brix $^{-1}$ ]                                  |
| $\beta_p$      | Constante da equação 2.19; [ $^{\circ}$ Brix $^{-1}$ ]                                  |
| $\delta_n$     | Constante das equações 2.15 e 2.16; [K]                                                 |
| $\delta_k$     | Constante da equação 2.17; [K]                                                          |
| $\lambda_e$    | Constante da equação 2.18; [kcal/gmol]                                                  |
| $\lambda_p$    | Constante da equação 2.19; [kcal/gmol]                                                  |
| $\tau$         | Tensão de cisalhamento; [Pa]                                                            |
| $\tau_{rep}$   | Representa a tensão de cisalhamento referente a 1 divisão da escala do mostrador; [mPa] |
| $\dot{\gamma}$ | Taxa de deformação; [s $^{-1}$ ]                                                        |
| $\eta$         | Viscosidade absoluta; [Pa.s]                                                            |
| $\eta_a$       | Viscosidade aparente; [Pa.s]                                                            |
| $\eta_0$       | Constante da equação de Arrhenius; [Pa.s]                                               |
| $\chi^2$       | Teste do Qui-Quadrado                                                                   |



Dissertação de Mestrado: **“REOLOGIA DO SUCO DE ACEROLA: EFEITO DA  
CONCENTRAÇÃO E DA TEMPERATURA”**

Autor: **Fernando Cascardo da Silva**

Orientador: **Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto**

Depto. de Engenharia de Alimentos – FEA – UNICAMP – Fevereiro / 2000

**RESUMO**

Neste trabalho foi determinado o comportamento reológico do suco industrializado de acerola, mediante um reômetro de cilindros concêntricos marca Contraves, em concentrações de sólidos solúveis de ( 4,0; 7,0; 10,0; 13,0 e 16,0) °Brix, e no intervalo de temperatura de 5,0 °C a 85,0 °C. Os pontos experimentais dos reogramas foram ajustados aos modelos reológicos de Ostwald-de-Waele, Herschel-Bulkley, Mizrahi & Berk e Casson. O modelo de Herschel-Bulkley descreveu adequadamente o comportamento reológico do suco industrializado de acerola ( $R^2 \geq 0,994$ ). Os baixos valores obtidos para o índice de comportamento ( $0,338 \leq n_{hb} \leq 0,759$ ) confirmam o comportamento pseudoplástico do suco de acerola. O efeito da temperatura no comportamento reológico do suco de acerola foi descrito por um modelo de Arrhenius ( $\eta_a = \eta_0 \exp(E_{at}/RT)$ ). Foi observado que a energia de ativação diminui com o aumento da concentração das amostras expressa em sólidos solúveis, variando desde 3,45 kcal/gmol, para as amostras a 4,0 °Brix, até 1,78 kcal/gmol, para as amostras a 16,0 °Brix. Foram testados os modelos potencial e exponencial. Os dados da viscosidade aparente e do índice de consistência foram ajustados aos modelos potencial e exponencial, em função da concentração de sólidos solúveis. O modelo potencial mostrou ser o mais adequado para descrever o efeito da concentração na viscosidade aparente e no índice de consistência do suco de acerola ( $R^2 = 1,000$ ).

---

***Palavras-chave: Reologia, Acerola, Suco de frutas, Temperatura.***



M. Sc. Thesis: **“RHEOLOGY OF ACEROLA JUICE: EFFECT OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE ”**

Author: **Fernando Cascardo da Silva**

Supervisor: **Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto**

**Department of Food Engineering – FEA – UNICAMP – February / 2000**

## **SUMMARY**

The rheological behavior of the industrialized acerola juice was studied at different soluble-solids concentrations (4.0,7.0,10.0,13.0 and 16.0)°Brix and temperatures (5.0 to 85.0)°C, using a concentric cylinder rheometer (Contraves – model Rheomat 30). Rheograms were fitted according to the following models: Ostwald-de Waele or Power Law, Herschel-Bulkley, Mizrahi & Berk and Casson. The best results were obtained using the Herschel-Bulkley model ( $R^2 \geq 0.994$ ) and the low values presented by the behavior index ( $0.338 \leq n_{hb} \leq 0.759$ ) confirm the shear thinning behavior of the acerola juice. The Arrhenius model ( $\eta_a = \eta_0 \exp(E_a/RT)$ ) describe the effect of the temperature on the rheological behavior of the acerola juice. The results showed also that activation energy decreases with increasing concentration, varying from 3.45 kcal/gmol (4.0 °Brix) to 1.78 kcal/gmol (16.0 °Brix). Potential and Exponential models for apparent viscosity and consistency index were adjusted considering rheological data as a function of the soluble-solids concentrations. For this purpose, the potential model showed the best performance ( $R^2=1.000$  ).

---

***Keywords: Acerola, Rheology, Acerola, Fruit juice, Temperature***

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é, segundo estatísticas da FAO, o maior produtor de frutas do mundo, participando com mais de 30 milhões de toneladas o que representa cerca de 10% da produção mundial, sendo também, o maior produtor de acerola. Essa produção está concentrada nas regiões Norte e Nordeste, embora seja possível encontrar acerola nas regiões Sul e Sudeste, principalmente nos Estados do Paraná e São Paulo. A industrialização do suco de acerola vem se destacando de forma significativa nos últimos 10 anos. Isto se deve principalmente ao alto teor de vitamina C, sendo considerada na atualidade como uma das maiores fontes naturais desta vitamina, podendo atingir, em algumas variedades, até 4676 mg em 100 g de polpa (Musser, 1995).

Produtos como polpa congelada, suco concentrado pasteurizado e suco clarificado são os mais comercializados no mercado interno e externo. Calcula-se que 80% da produção do Nordeste é vendida para o exterior. O mercado japonês tem sido o maior importador, seguido dos Estados Unidos e Europa (Bliska & Leite, 1995).

Em tempos de recessão quando ocorrem baixos níveis de investimento em novas plantas industriais, tecnologias que levam à obtenção de produtos de qualidade superior, baixo custo de produção e ao rápido retorno comercial são as razões que têm levado algumas empresas a empreendimentos em processos mais eficientes, estimulando pesquisas para que rapidamente se alcancem os avanços tecnológicos necessários.

O processo de concentração resulta na remoção de água e consequente redução nos custos de embalagem, transporte e armazenamento. Durante o processamento, a concentração e a temperatura variam nas faixas de (4,0 a 16,0)°Brix e (5,0 a 85,0)°C, respectivamente. A viscosidade aparente varia



bastante durante tal processamento, a ponto de inviabilizar a produção de produtos com maiores concentrações.

O conhecimento do comportamento reológico do suco, concentrado ou não, é fundamental em engenharia. A definição de modelos adequados à descrição de seu escoamento é necessária ao projeto de tubulações, sistemas de bombeamento, sistemas de agitação e mistura, entre outras aplicações. O efeito da temperatura e da concentração nas propriedades de transporte precisa ser conhecido para o entendimento e dimensionamento de operações unitárias tais como tratamento térmico e concentração.

Os dados de viscosidade aparente em função da temperatura e concentração são imprescindíveis não só ao dimensionamento de novas instalações industriais mas também à avaliação da adequação tecnológica e do potencial de desempenho de unidades já instaladas que, dimensionadas para processar outras matérias primas, venham a ser utilizadas na produção de suco de acerola.

Sucos e polpas de frutas são comumente fluidos não-Newtonianos devido à alta concentração de macromoléculas como pectina, que afetam diretamente o comportamento reológico.

A descrição do comportamento reológico é feita através de modelos empíricos que são utilizados para relacionar os dados da tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Os modelos mais citados nas referências bibliográficas para a caracterização reológica de sucos e polpas de frutas são: Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Herschel-Bulkley, Mizrahi & Berk e Casson.

## 1.1. OBJETIVO

Os objetivos do presente trabalho são:

- 1) Descrever o comportamento reológico do suco de acerola usando 4 (quatro) modelos reológicos, citados anteriormente, em diversas concentrações de sólidos solúveis e temperaturas;
- 2) Determinar a variação da viscosidade aparente e dos valores dos parâmetros destes modelos com as variáveis experimentais temperatura e concentração;
- 3) Verificar a existência de comportamento tixotrópico e tensão inicial nas faixas de temperatura e concentração a serem estudadas, quantificando-as.

A justificativa da opção pela Empresa Companhia de Cítricos do Brasil (CCB) deve-se aos seguintes fatos:

- A empresa utiliza a pesquisa para o desenvolvimento de produtos e processos como no caso da acerola em pó com alto teor de vitamina C, desenvolvida em conjunto com a Embrapa.
- A empresa procura dominar a arte das condições de cultivo com total controle, época de colheita e condições de processamento, garantindo desta forma, uma padronização na composição de sucos de frutas em geral e nas propriedades reológicas.
- A empresa está entre as maiores indústrias de sucos do Brasil, tanto no mercado interno, como externo.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. GENERALIDADES

#### 2.1.1. A acerola

Estudos realizados por Vivaldi citado por Asenjo (1980), mostraram que os nomes, *Malpighia puniceifolia* L. e *Malpighia glabra* L., são realmente sinônimos, sendo o nome correto *Malpighia emarginata* D.C.. A adoção do nome *M. emarginata* D.C. ainda é pequena. No entanto, o uso desta denominação foi adotado no Conselho Internacional de Recursos Genéticos Vegetais (IBPGR, 1986), reunido em Roma na Itália.

A acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), também conhecida como Cereja das Antilhas, é uma fruteira tipicamente tropical, sendo seu cultivo viável em grande parte do território brasileiro, com exceção, no que tange a pomares comerciais, de regiões de clima subtropical e de altitude, sujeitas a baixas temperaturas. Dentre os fatores responsáveis pelo estímulo ao seu cultivo destacam-se a riqueza em vitamina C da fruta, o elevado número de safras anuais e o grande potencial de exportação do suco e da polpa pasteurizados concentrados e congelados. O conteúdo de vitamina C, comparável ao encontrado apenas no camu-camu, fruto nativo da Amazônia (Andrade, 1991), é dezena de vezes maior que os relatados para os frutos cítricos, tradicionalmente considerados como ricos em vitamina C, como pode ser visto na Figura 2.1.

É importante ressaltar que o suco de acerola pode ser utilizado para enriquecer e conservar sucos de outras frutas, como o abacaxi, a laranja, o pêssogo, justamente pelas propriedades anti-oxidantes (agente redutor) da

vitamina C. A acerola é ainda considerada fonte de caroteno, e outras vitaminas como B1, B2 e B6 e minerais como ferro e cálcio.

A composição dos frutos e de seus produtos depende de muitos fatores tais como: condições climáticas, cultivar (variabilidade genética), estágio de maturação, sendo também modificado pelo processamento e armazenamento, que atingem principalmente o conteúdo de ácido ascórbico (Araújo & Minami, 1994).

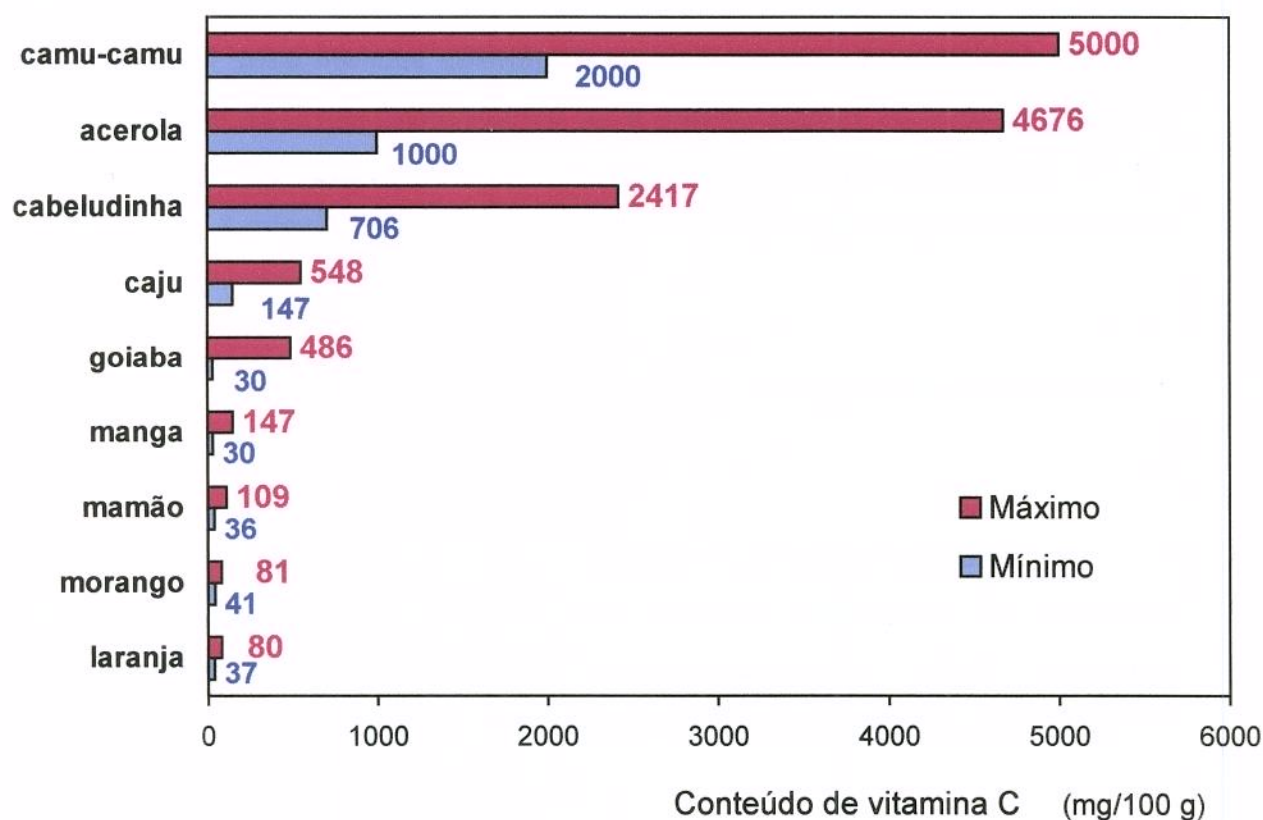


Figura 2.1. Conteúdo de vitamina C em vários frutos.

Fonte: Alves & Menezes (1995)

### **2.1.2. Aspectos Econômicos**

Os conteúdos de ácido ascórbico encontrados em plantas comerciais, não acompanhavam o aumento dos níveis exigidos para a exportação. As negociações no mercado externo usam como referencial o conteúdo médio de ácido ascórbico do produto; o conteúdo mínimo de vitamina C exigido era de 800 mg/100 g de polpa, enquanto os preços internacionais giravam em torno de US\$ 3000/ton, em 1990. No ano de 1994, o conteúdo mínimo exigido aumentou para 1200 mg/100 g de polpa, enquanto os preços estiveram por volta de US\$ 1200/ton, os quais eram considerados muito elevados para que se consiga uma ampliação da demanda externa. Hoje as exigências subiram para 1500 mg/100g de polpa enquanto os preços caíram e se estabilizaram em US\$ 800/ton, sob o risco dos compradores externos procurarem novos fornecedores, ou até mesmo deixarem de consumir acerola por se sentirem explorados (Oliveira & Filho, 1995).

### **2.1.3. Melhoramento Genético**

Esse potencial segmento econômico de nossa fruticultura, todavia, tem na inexistência de variedades definidas um dos seus mais graves problemas, produzindo frutos quantitativamente e qualitativamente heterogêneos, desorganizando principalmente o sistema de comercialização.

A constituição de um Banco Ativo de Germoplasma de Acerola é instrumento da máxima relevância para a preservação da variabilidade genética deste importante grupo de plantas. As etapas de melhoramento genético da acerola são avaliadas e caracterizadas pelos seguintes descritores: produtividade, número e peso médio dos frutos colhidos, coloração da película, brix, vitamina C e duração do fruto na prateleira (Oliveira & Filho, 1995).



No Norte e Nordeste a produção de acerola é caracterizada pela formação de grandes áreas plantadas vinculadas às agroindústrias. As agroindústrias da região, como a Companhia de Cítricos do Brasil (CCB), formaram pomares próprios, caracterizadas por possuírem variabilidade genética conhecida e preservada com o objetivo de manter a qualidade e o padrão das frutas destinadas ao processamento, objetivando principalmente o mercado de exportação (Musser, 1995).

#### **2.1.4. Mercado interno e externo**

Calcula-se que 80% da produção do Nordeste é vendida para o exterior na forma de polpa e suco concentrado pasteurizado e congelado, em tambores resfriados com amônia. Os países que cultivam comercialmente a acerola são Brasil, Porto Rico, Cuba e Estados Unidos. A acerola é exportada principalmente para a Alemanha, França, Bélgica, Japão, Estados Unidos.

Na Europa, a acerola é usada basicamente para enriquecer de forma “natural” sucos de pêra e maçã entre outros. Nos Estados Unidos a utilização da acerola tem sido maior na indústria farmacêutica. No Japão a acerola é utilizada em diversas linhas de produtos alimentícios industrializados, tais como: iogurtes, bebidas enriquecidas, balas, chicletes, gelatinas, geléias e como antioxidante natural (Musser, 1995).

Embora as receitas obtidas com a exportação de acerola não sejam ainda muito representativas em valor absoluto, comparando-se a relação valor total das exportações/área plantada, verifica-se que a participação da acerola é de US\$ 2205/ha plantado, superando a manga e a laranja, cujas participações são de US\$ 383/ha e US\$ 1366/ha, respectivamente (Bliska & Leite, 1995).



### 2.1.5. Distinção entre polpas, sucos e néctares

O termo polpa significa o produto obtido pelo esmagamento das partes comestíveis das frutas carnosas, após a remoção de suas partes normalmente não consumidas, como as cascas e sementes. É um produto que atende às necessidades de vários segmentos da indústria alimentícia, como as indústrias de sucos naturais, sorvetes, laticínios, balas, doces, geléias, etc. Segundo a Associação das Indústrias de Sucos Tropicais, a procura pelas polpas de frutas tropicais é grande e tem-se observado um aumento de empresas elaborando este produto (Feitosa *et al.*, 1996).

Por suco, entende-se o produto resultante após a fruta ser espremida e filtrada para a separação grosseira de fibras. Para propósito de processamento comercial, Nagy *et al.* (1993) afirmam que sucos de frutas podem ser considerados como uma solução aquosa de açúcar, ácidos, essências, pigmentos, minerais, vitaminas, proteínas e substâncias pécticas.

Lopes (1975) relata que o termo “néctar de fruta” é usado na indústria para designar a mistura de suco e polpa de fruta adicionada de açúcar e água, podendo conter corante artificial, flavorizante e ácido cítrico, para produzir um produto pronto para o consumo. Indica também que essas bebidas, embora contendo um ou mais sucos, não podem ser designadas como sucos de frutas, porque possuem água e açúcar adicionados.

Quanto à importância nutricional que esses produtos derivados de frutas apresentam, as que merecem destaque são, no caso dos sucos e polpas, o fornecimento de vitaminas e sais minerais, e, em relação ao néctar, esses se destacam pelo alto valor calórico.

### 2.1.6. Processamento Industrial da acerola

As diversas etapas do processamento para obtenção do suco de acerola, pasteurizado, concentrado e congelado, são descritas a seguir:

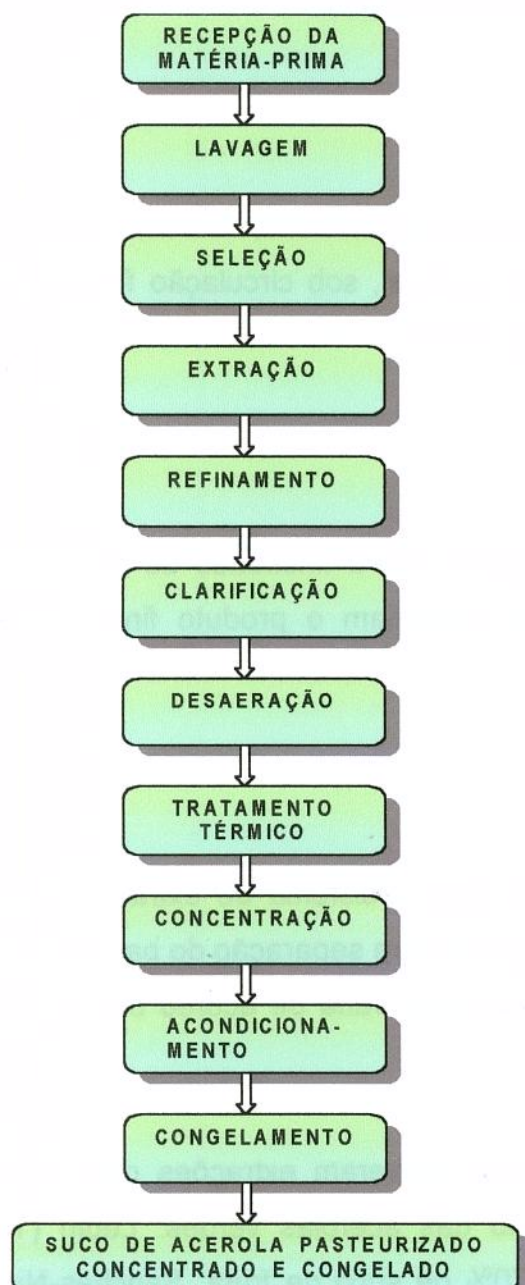


Figura 2.2. Fluxograma das operações realizadas durante o processamento para a obtenção do suco de acerola pasteurizado concentrado e congelado.

Fonte: Companhia de Cítricos do Brasil (1999).

### a) 1ª Lavagem

Nesta etapa o fruto é imerso em solução de 20 ppm de hipoclorito de sódio, sob borbulhamento de ar. A operação de lavagem é realizada em um tanque de imersão construído em aço inox AISI 304.

### b) 2ª Lavagem

Após a primeira lavagem por imersão, os frutos são enviados a uma esteira para jateamento com água potável, sob circulação forçada, com a finalidade de eliminar detritos aderidos à casca.

### c) Seleção

Essa etapa é realizada com a finalidade de descartar frutos danificados, verdes ou passados, que alterariam o produto final. A seleção dos frutos é realizada manualmente.

### d) Extração

A fruta é conduzida para o sistema de extração do suco, constituído de despulpador, com tela de 2 mm para separação do bagaço da casca e semente. O rendimento de polpa nesta etapa, varia de acordo com o grau de maturação da fruta.

Fitting & Miller (1958) obtiveram extrações com rendimento de 48% de polpa em relação ao peso das acerolas verdes. Ledin (1958) afirmou que a acerola contém de 60 a 70% de suco de fruta. Sanches-Nieva (1955) utilizou o artifício de desintegrar, antes da extração, os frutos com um agitador de alta velocidade e obteve rendimentos de suco de 59 a 73%.



Na região inicial do batedor, o fruto recebe sucessivos impactos de réguas e é forçado a passar pela tela; no mesmo equipamento um jogo de escovas faz o complemento de retirada da polpa, separando-se apenas o desejado.

#### e) Refinamento

O processo de refinamento, consiste em separar a polpa das partes fibrosas da fruta. O grupo de refinamento contém dois estágios, sendo constituído basicamente de peneiras cilíndricas, as quais possuem em seu interior um eixo de aço inoxidável AISI 316, equipado com escovas de nylon. A primeira refinadora separa o material mais grosseiro que pode ser retido em tela de diâmetro igual a 0,8 mm. A segunda refinadora, dá o acabamento final ao suco. Este equipamento utiliza peneira em aço inoxidável, tendo perfurações com diâmetro igual a 0,5 mm.

#### f) Clarificação

No processo de acabamento, o suco já despulpado e com suas partículas reduzidas, sofre um apuramento através de uma centrifugação. Pode-se padronizar o produto final quanto ao seu percentual de sólidos em suspensão ao mesmo tempo em que se promove um melhor aspecto do produto. O equipamento utilizado para esta finalidade é uma separadora centrífuga dotada de pratos de raio de 14 cm, sob rotação de 8000 rpm, correspondendo a 10022g, e descarga automática de resíduos.

Para processamento da acerola verde, com o objetivo de obter um produto rico em vitamina C, é feita uma centrifugação drástica através de uma centrífuga Decanter.



## g) Desaeração

Sucos de frutas são desaerados com a finalidade de remover o oxigênio dissolvido, evitando oxidação do suco, causando inclusive o escurecimento, diminuindo a qualidade da bebida. Os desaeradores consistem de uma câmara a vácuo, na qual o produto a uma temperatura adequada é introduzido sob forma de “spray” para aumentar a eficácia da remoção dos gases.

## h) Tratamento térmico

Nesta etapa é utilizado um pasteurizador a placas com capacidade para 1000kg/h de suco de acerola. É uma operação que tem por finalidade inativar as enzimas presentes e eliminar os microrganismos patogênicos e os causadores de deterioração. O pasteurizador opera nas seguintes condições:

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| Concentração do produto na entrada .....     | 7,0 °Brix  |
| Temperatura de entrada do produto.....       | 45 °C      |
| Temperatura de pasteurização .....           | 85 °C      |
| Temperatura de saída do produto .....        | (5 a 15)°C |
| Retenção tubular (tempo de residência) ..... | 45 s       |

A fruta é extremamente susceptível ao ataque de fungos, bactérias e leveduras, porém em relação ao suco, a incidência desses microrganismos se reduz sensivelmente. No caso do suco, a maior parte da contaminação ocorre durante a operação do corte da fruta, se esta não tiver sido submetida a uma lavagem bem eficiente.

## i) Concentração

Essa operação foi realizada em evaporador centrífugo CENTRITHERM de marca ALFA-LAVAL, tipo CT-1B. O suco integral é alimentado no equipamento à

temperatura de 15 °C, aquecido à temperatura de (50 a 60)°C no seu interior e apresenta uma temperatura na saída de 25 °C. O tempo de residência aproximado é de 8 segundos e a vazão de saída de concentrado é de 350 L/h. A pressão do vapor injetada no aparelho é de 1,0 kgf/cm<sup>2</sup>, proporcionando uma temperatura de 104 °C na camisa de vapor.

Fonte: Companhia de Cítricos do Brasil (1999).

## 2.2. REOLOGIA

É a ciência que estuda as propriedades de escoamento dos gases, líquidos e sólidos. O campo da reologia estende-se desde a mecânica de fluidos Newtonianos até a elasticidade de Hooke, e a região que compreende este campo é a deformação e o escoamento de todos os materiais pastosos e em suspensão (Bird *et al.*, 1960).

Reologia, de modo amplo, é a ciência que descreve a deformação de um corpo, sob a influência de forças externas. Os corpos, nesse contexto, podem ser sólidos, líquidos ou gases. Quando tais forças são aplicadas sobre os fluidos (gases e líquidos) eles escoam (Schramm, 1994).

Sólidos ideais apresentam pequenas deformações, e a energia dissipada na deformação é totalmente recuperada quando cessadas as tensões, e a forma inicial é recuperada.

É oportuno ressaltar que o conhecimento do comportamento reológico de produtos alimentícios é importante em diversas aplicações, entre as quais: no controle de qualidade; na correlação com a avaliação sensorial do produto, visando a aceitabilidade pelo consumidor; no dimensionamento de tubulações e

de equipamentos; na compreensão de estrutura de polímeros e na correlação da viscosidade com outras propriedades físicas, cujas determinações sejam mais simples (Saravacos, 1970; Holdsworth, 1971; Boger & Tiu, 1974; Rao, 1986; Alvarado & Romero, 1989).

No caso de cálculo da perda de carga em tubulações e da estimativa da potência exigida para o bombeamento de fluidos, o modelo reológico aplicável ao fluido em questão precisa ser conhecido. Boger & Tiu (1974) apresentaram cálculos ilustrativos para um fluido particular onde foi aplicado o modelo reológico de Herschel-Bulkley. A consideração de comportamento Newtoniano resultou numa potência mínima necessária 6,5 vezes maior que o valor real nas condições de escoamento consideradas.

## **2.3. ESTUDOS REOLÓGICOS**

### **2.3.1. Lei da Viscosidade de Newton**

Isaac Newton introduziu o conceito de viscosidade em 1687, dando atenção para líquidos (água e óleos) e apresentou hipóteses associadas com o escoamento simples de fluidos entre duas placas paralelas. A viscosidade é sinônimo de atrito interno e é a medida da resistência ao escoamento entre camadas de moléculas do fluido.

Considera-se uma fina camada de fluido entre duas placas paralelas de área  $A$ , distantes entre si de  $dy$ , estando uma fixa e outra móvel, submetida à ação de uma força  $F$  movendo-se com velocidade constante  $v$ , na direção positiva de  $x$ , conforme mostrado na Figura 2.3.



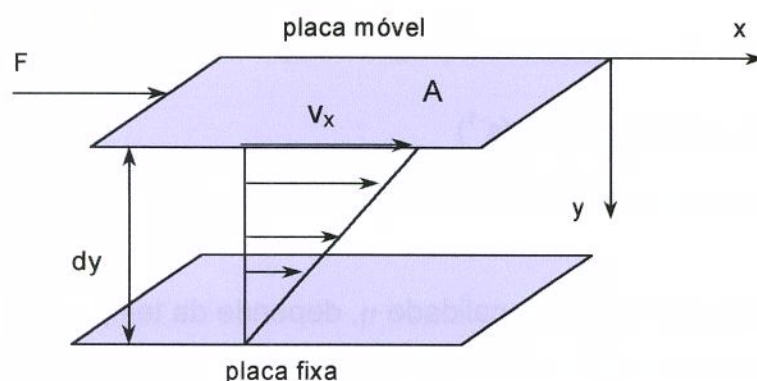


Figura 2.3. Esquema do perfil de velocidade para um fluido Newtoniano contido entre duas placas planas e paralelas.

Para um fluido Newtoniano em escoamento laminar e regime permanente, a tensão de cisalhamento é proporcional à taxa de deformação. A força por unidade de área, necessária para produzir o movimento ( $F/A$ ) é denominada tensão de cisalhamento (Bird *et al.*, 1960; Wilkinson, 1960). Esta relação é mostrada pela eq. (2.1).

$$\frac{F}{A} = \tau_{yx} \propto \frac{dv_x}{dy} \quad (2.1)$$

Esta equação pode ser escrita como:

$$\tau_{yx} = \eta \frac{dv_x}{dy} = \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

onde:

$\tau \rightarrow$  tensão de cisalhamento ( $\text{N.m}^{-2} = \text{Pa}$ )

$\dot{\gamma} \rightarrow$  taxa de deformação ( $\text{s}^{-1}$ )

$\eta \rightarrow$  viscosidade absoluta ou dinâmica ( $\text{Pa.s}$ )

A constante de proporcionalidade  $\eta$ , depende da temperatura, concentração e pressão e independe da taxa de deformação.

Os fluidos que obedecem o postulado de Newton são chamados de Newtonianos. As propriedades reológicas de fluidos Newtonianos são independentes da taxa de deformação e do histórico anterior de cisalhamento, dependendo somente da composição e temperatura. Exemplos de alimentos fluidos que apresentam comportamento Newtoniano são sucos de frutas clarificados e não concentrados, leite, óleo refinado e soluções de sacarose (Holdsworth, 1971; Rao, 1977 a,b; Rao, 1986).

### 2.3.2. Viscosidade aparente

O termo “viscosidade” é geralmente reservado para líquidos Newtonianos; para líquidos não-Newtonianos, a viscosidade a uma determinada taxa de deformação é denominada “viscosidade aparente”. Neste trabalho, o símbolo  $\eta$  é utilizado para a viscosidade Newtoniana e  $\eta_a$  para viscosidade aparente.

A viscosidade aparente é definida como o quociente entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, conforme eq. (2.3).

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.3)$$

onde:

$\eta_a \rightarrow$  viscosidade aparente (Pa.s)

### 2.3.3. Fluido não-Newtoniano independente do tempo

Todos os fluidos que não exibem o comportamento descrito pela eq. (2.2) podem ser chamados de não-Newtonianos e serem convenientemente classificados como independentes ou dependentes do tempo (Holdsworth, 1971; Rao, 1977 a,b; Rao, 1986).

A maioria dos fluidos encontrados em engenharia de alimentos não é dependente do tempo, isto é, suas propriedades reológicas não variam com o tempo. Seu comportamento é visualizado em um reograma (gráfico de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação) sem formação de histerese, e a curva resultante é modelada matematicamente utilizando-se diversas relações empíricas. A Figura 2.5 apresenta os reogramas para fluidos com comportamento independente do tempo.

Para os fluidos não-Newtonianos independentes do tempo, a temperatura e concentração constantes, a viscosidade aparente depende somente da magnitude da taxa de deformação. Uma classificação do comportamento reológico a ser estudada, é apresentada na Figura 2.4.



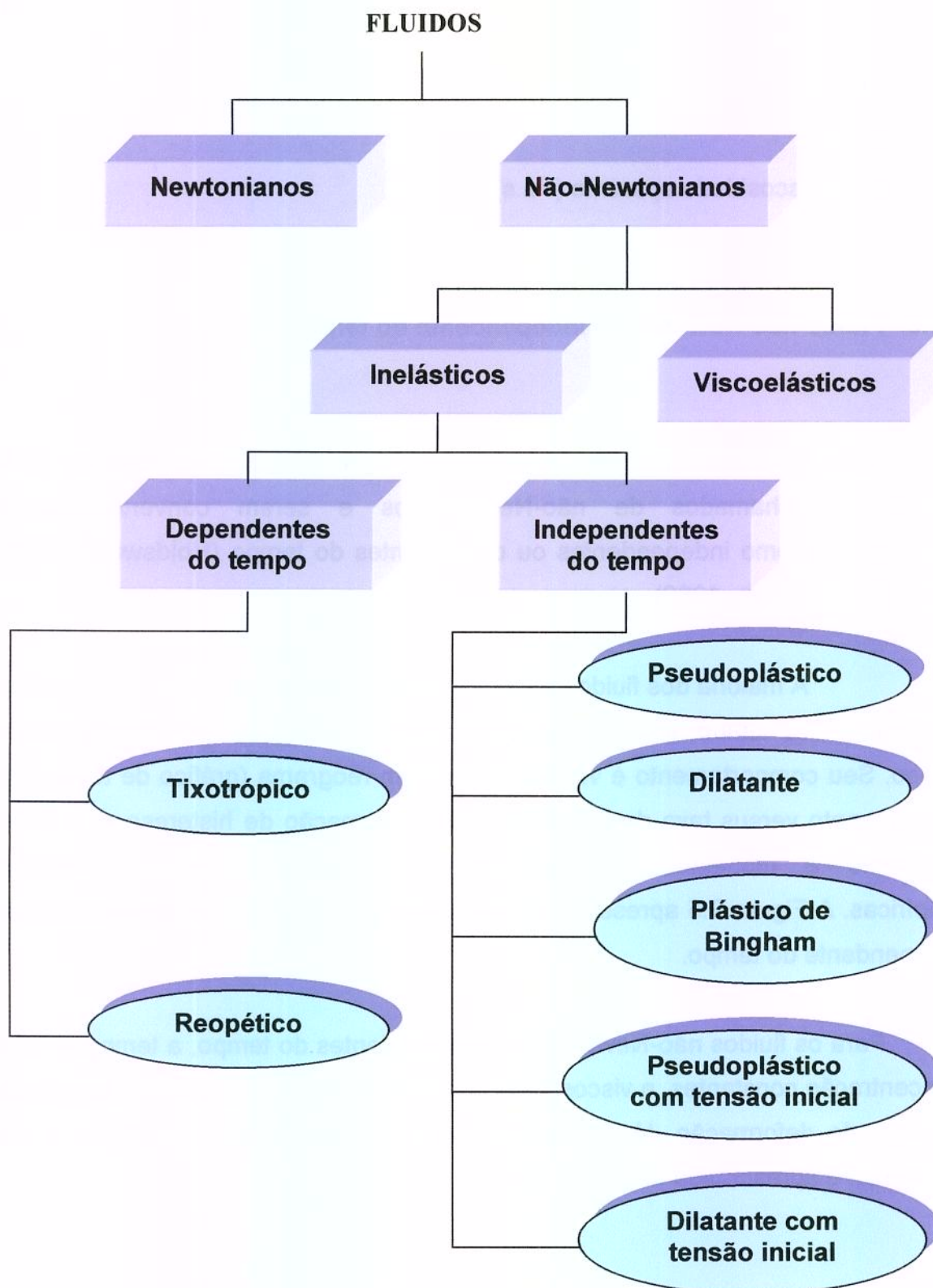


Figura 2.4. Classificação de comportamento reológico.

## Fluido Plástico de Bingham

São os fluidos não-Newtonianos mais simples, pois diferem dos fluidos Newtonianos somente pelo fato da relação linear entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento não passar pela origem. Este tipo de fluido apresenta uma tensão inicial que precisa ser vencida para que haja escoamento.

A explicação para este fenômeno é que o fluido em repouso possui uma estrutura rígida tridimensional para suportar essas tensões, que uma vez atingida, há a quebra da estrutura e o fluido se comporta como Newtoniano.

Bird *et al.* (1960) apresentaram dados para suspensões de combustível nuclear em água pesada, e Schaller & Knorr (1973), citados em Rao (1977a) utilizaram esse modelo para explicar o comportamento reológico de purê de damasco.

Odigboh & Mohsenin (1975), citado em Rao (1977a), observaram comportamento reológico semelhante para pasta cozida de amido de mandioca.

## Fluido Pseudoplástico

Nesse tipo de comportamento estão classificados a grande maioria dos fluidos estudados. Para os fluidos pseudoplásticos a viscosidade aparente depende da taxa de deformação, mas não da duração do cisalhamento. É caracterizado pela diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação, ou seja, a tangente em cada ponto da curva de escoamento (viscosidade aparente) diminui com o aumento da taxa de deformação (Holdsworth, 1971; Rao, 1977a,b; Rao, 1986).

Essa classe é representada por produtos como polpas e sucos concentrados de frutas, caldos de fermentação, melaço de cana e soluções de pectina (Charm, 1960; Saravacos, 1970; Holdsworth, 1971; Vitali *et al*, 1974).

Segundo Holdsworth (1971), a explicação para este fenômeno é que o aumento da taxa de deformação modifica a estrutura de moléculas de cadeias longas, alinhando-as paralelamente às linhas de corrente diminuindo a resistência ao escoamento. Isto é coerente pelo fato de que a altas taxas de deformação, o fluido apresenta um comportamento próximo ao Newtoniano.

### **Fluido Dilatante**

Comportamento dilatante é raramente encontrado, tendo sido reportado em suspensões de goma de amido, mel de abelha proveniente de flora de eucalipto, cujas propriedades dilatantes, assim como a viscoelasticidade, são atribuídas a polímeros de dextrana. Este comportamento é caracterizado pelo aumento da viscosidade aparente com a taxa de deformação ou seja, a tangente em cada ponto da curva de escoamento (viscosidade aparente) aumenta com o aumento da taxa de deformação (Holdsworth, 1971; Rao, 1977a,b; Rao, 1986).

Segundo Holdsworth (1971), esse comportamento é explicado supondo-se o fluido constituído de partículas densamente empacotadas, com pequenos espaços intersticiais cheios de líquidos, e com o aumento da taxa de deformação provoca ruptura da estrutura e a quantidade de líquido não é mais suficiente para a lubrificação, logo o atrito aumenta.



## Fluido Pseudoplástico com tensão inicial

BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

Muitos fluidos apresentam uma tensão inicial como os de Bingham mas, a partir desse ponto seu comportamento reológico é semelhante aos dos fluidos pseudoplásticos. Suco de laranja concentrado não clarificado é um exemplo típico deste comportamento (Branco, 1995).

## Fluido Dilatante com tensão inicial

Segundo Onofre (1995), os fluidos pertencentes a esse grupo apresentam um comportamento reológico análogo ao dos dilatantes, após ultrapassada a tensão inicial. Não foram encontrados exemplos na literatura.

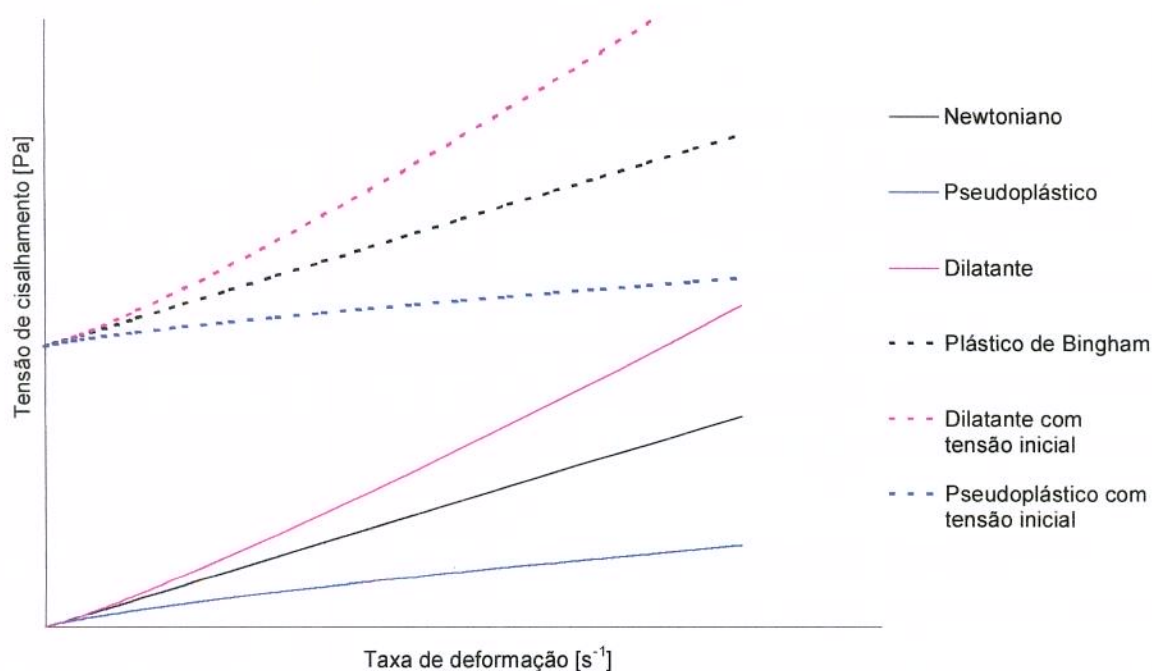


Figura 2.5. Reogramas para vários tipos de fluidos independentes do tempo.

### 2.3.4. Fluido não-Newtoniano dependente do tempo

Em fluidos que apresentam comportamento dependente do tempo, a viscosidade aparente varia tanto com a taxa de deformação, como com a duração de sua aplicação, sendo subdivididos em duas categorias: tixotrópico e reopético.

Os fenômenos de mudança de estrutura com o tempo, podem ser irreversíveis, reversíveis ou parcialmente reversíveis, mas os termos tixotrópico e reopético se reservam para mudanças reversíveis.

A volta não coincidente da curva de escoamento e da curva de viscosidade é conhecida como histerese ou elasticidade demorada.

#### Fluido Tixotrópico

Fluidos desse grupo apresentam um comportamento reológico semelhante ao fluido pseudoplástico, no qual a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação. Diferencia-se entretanto porque essa diminuição não está relacionado somente à taxa de deformação, mas também ao tempo. A viscosidade aparente e a tensão de cisalhamento diminuem reversivelmente com o tempo de aplicação da taxa de deformação, quando a temperatura, a composição e a taxa de deformação são mantidas constantes.

Este fenômeno é explicado pela ruptura reversível da estrutura ou seja a estrutura se recupera com a retirada da tensão aplicada. A volta não coincidente da curva de escoamento e da curva de viscosidade é conhecida como histerese ou elasticidade demorada, conforme mostrado na Figura 2.6. Uma consequência desse fenômeno é que os testes de rotina devem ter seus tempos rigorosamente

tomados, e além disso, a história anterior de manuseio da amostra deve ser controlada, pois diz-se que o material tem memória reológica.

Nos casos em que o comportamento tixotrópico foi encontrado em fluidos alimentares, o período de tempo em que ele apareceu, se mostrou relativamente curto. Também, em virtude das várias operações mecânicas típicas de uma linha contínua de processamento, o comportamento tixotrópico não deverá persistir por muito tempo. Entretanto, se pretender um cálculo conservador, pode-se projetar equipamentos com base nos maiores valores dos parâmetros reológicos disponíveis (Rao & Anantheswaram, 1982).

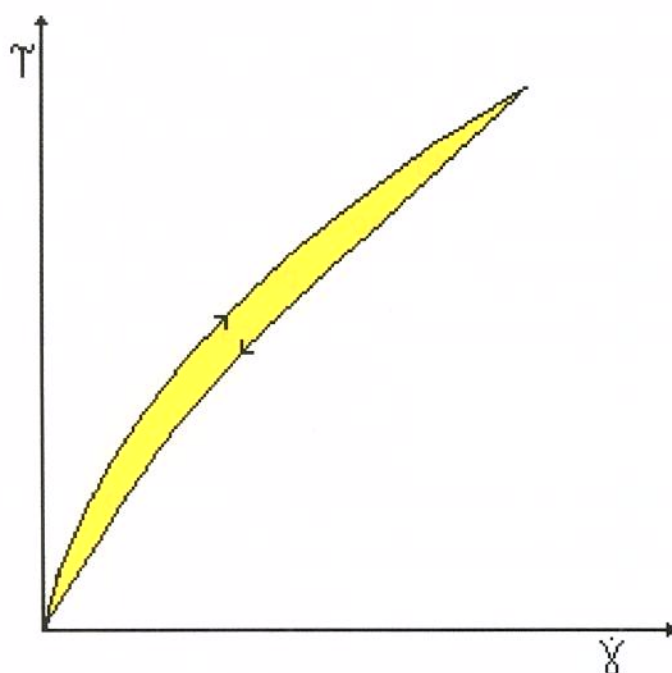


Figura 2.6. Reograma para fluido com comportamento tixotrópico.

Comportamento tixotrópico foi observado em géis de alginato, clara de ovo, leite condensado açucarado, maionese e suco de maçã com polpa, sucos concentrados de maracujá e laranja (Saravacos, 1970; Vitali *et al.*, 1974; Rao, 1977a,b; Rao, 1986; Holdsworth, 1993).



## Fluido Reopético

Fluidos desse grupo apresentam um comportamento reológico semelhante ao fluido dilatante, no qual a viscosidade aparente aumenta com a taxa de deformação. Diferencia-se entretanto porque esse aumento não está relacionado somente à taxa de deformação, mas também ao tempo, ou seja, a viscosidade aparente e a tensão de cisalhamento crescem reversivelmente com o tempo de aplicação da taxa de deformação, quando a temperatura, a concentração e a taxa de deformação são mantidas constantes, conforme mostrado na Figura 2.7.

Esse tipo de comportamento não foi observado em alimentos. São mais comuns os casos de formação de estruturas como na preparação de “creme chantilly” e de clara em neve. Note-se que nestes casos há evolução e não um comportamento que pode ser repetido continuamente. A cristalização também é exemplo de evolução, podendo no caso de açúcar ser monitorada por um reômetro que acompanha continuamente o processo. Esta é uma aplicação moderna para o controle da cristalização do açúcar (Rao, 1977a,b; Rao, 1986; Bezerra, 1997).

Métodos qualitativos e quantitativos para aferição de comportamento dependente do tempo podem envolver (Rao, 1986):

- 1) A avaliação do “loop” da histerese em diagramas de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação.
- 2) A medida da tensão de cisalhamento com o tempo, a uma taxa de deformação constante.

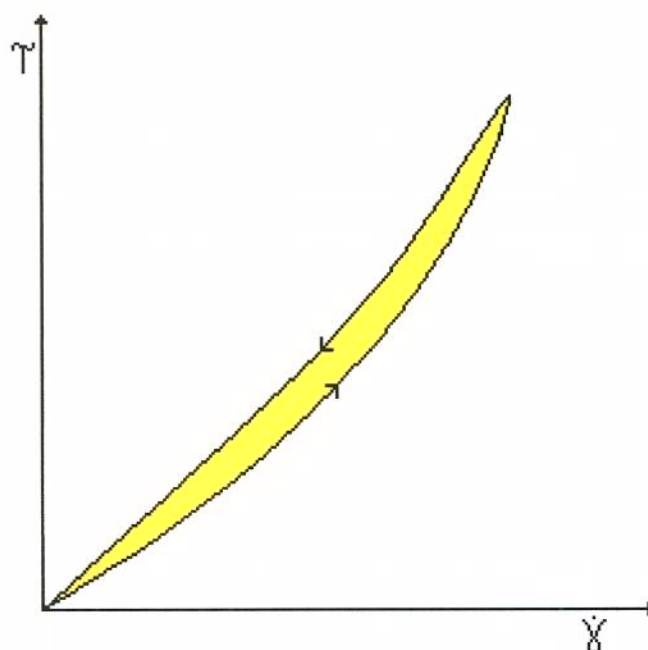


Figura 2.7. Reograma para fluido com comportamento reopético.

### 2.3.5. Fluido Viscoelástico

Alguns fluidos exibem tanto propriedades viscosas (escoamento) como elásticas (armazenamento de energia) e são denominados viscoelásticos; exemplos são misturas para sorvete e creme de leite (Rao, 1977a,b). Na realidade, todos os fluidos podem ser considerados viscoelásticos, entretanto, nos fluidos considerados neste trabalho, as características viscosas dominam o comportamento de escoamento.

### 2.3.6. Modelos Reológicos

Os modelos reológicos mais comumente utilizados para descrever o comportamento de escoamento de alimentos (pseudoplástico e dilatante), são do tipo “Lei da Potência” (modelo LP), também conhecido como modelo de Ostwald-de-Waele.

$$\tau = K_{lp} (\dot{\gamma})^{n_{lp}} \quad (2.4)$$

e o da lei da potência com um termo de tensão inicial, também conhecido como modelo de Herschel-Bulkley (modelo HB)

$$\tau = K_{0,hb} + K_{hb} (\dot{\gamma})^{n_{hb}} \quad (2.5)$$

onde :

|                     |                                                |
|---------------------|------------------------------------------------|
| $\tau$              | ==> tensão de cisalhamento (Pa)                |
| $\dot{\gamma}$      | ==> taxa de deformação ( $s^{-1}$ )            |
| $K_{0,hb}$          | ==> tensão inicial (Pa)                        |
| $K_{lp}$            | ==> índice de consistência ( $Pa.s^{n_{lp}}$ ) |
| $K_{hb}$            | ==> índice de consistência ( $Pa.s^{n_{hb}}$ ) |
| $n_{lp}$ , $n_{hb}$ | ==> índice de comportamento ( - )              |

Para fluidos pseudoplásticos, o índice de comportamento “n” é menor que a unidade, e quanto menor seu valor, mais intenso é o comportamento pseudoplástico. O valor de n diminui com o aumento do teor de sólidos e usualmente é pouco afetado pela variação da temperatura. O valor do índice de consistência “K” aumenta com o aumento do teor de sólidos e também varia com a temperatura (Holdsworth, 1971).



O modelo LP, embora amplamente utilizado, nem sempre se ajusta aos dados experimentais de fluidos pseudoplásticos com grande precisão, particularmente em faixas amplas de taxa de deformação (Holdsworth, 1971; Rao, 1975). Estes fluidos geralmente exibem reogramas com três regiões distintas com o aumento da taxa de deformação (Boger & Tiu, 1974; Rao, 1986; Steffe, 1992):

- 1) uma região inicial (baixas taxas de deformação) Newtoniana, onde a viscosidade aparente (denominada viscosidade limite a taxa de deformação zero) é constante com a variação das taxa de deformação;
- 2) uma região intermediária, onde a viscosidade aparente varia com a mudança da taxa de deformação e a equação do tipo lei da potência representa um modelo adequado;
- 3) uma região Newtoniana, com altos valores de taxa de deformação, onde a viscosidade aparente (denominada viscosidade limite à taxa de deformação infinita) é constante com a variação da taxa de deformação.

O modelo LP, quando aplicado a fluidos pseudoplásticos, produz viscosidades aparentes tendendo a infinito e zero, quando as taxas de deformação tendem a zero e infinito, respectivamente (Holdsworth, 1971). Na aplicação do modelo LP numa faixa ampla de valores da taxa de deformação, recomenda-se utilizar duas ou três sub-regiões para melhor ajuste (Rao, 1975).

Evidentemente, a escolha do modelo reológico é ditada pelas características do fluido em estudo. Entretanto, apesar das deficiências anteriormente apontadas, o modelo LP tem se mostrado em muitos casos adequado para cálculos de engenharia e, por causa de sua simplicidade, tem sido amplamente utilizado nesta área (Rao & Anantheswaran, 1982).

O modelo HB é muito útil porque os comportamentos do tipo Newtoniano, pseudoplástico, dilatante, plástico de Bingham (modelo PB) e pseudoplástico com

tensão inicial, podem ser considerados como casos particulares da eq. (2.5), como demonstrado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1. Modelos Newtoniano, lei da potência e plástico de Bingham como casos particulares do modelo Herschel-Bulkley.

| <i>Fluido<br/>(modelo)</i>             | <i>Índice de<br/>consistência<br/><math>K_{hb}</math></i> | <i>Índice de comportamento<br/><math>n_{hb}</math></i> | <i>Tensão inicial<br/><math>\tau_{0,hb}</math></i> |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Pseudoplástico com tensão inicial (HB) | $> 0$                                                     | $0 < n < 1$                                            | $> 0$                                              |
| Dilatante com tensão inicial (HB)      | $> 0$                                                     | $n > 1$                                                | $> 0$                                              |
| Newtoniano                             | $> 0$                                                     | 1                                                      | 0                                                  |
| Pseudoplástico (LP)                    | $> 0$                                                     | $0 < n < 1$                                            | 0                                                  |
| Dilatante (LP)                         | $> 0$                                                     | $n > 1$                                                | 0                                                  |
| Plástico de Bingham (PB)               | $> 0$                                                     | 1                                                      | $> 0$                                              |

Fonte: Adaptada de (Steffe, 1992)

Uma característica importante dos fluidos que seguem os modelos HB e PB é a presença de uma tensão inicial, o que significa que uma tensão finita é necessária ao início do escoamento. Abaixo da tensão inicial o material exibe características de um sólido, ou seja, armazena energia a baixas taxas de deformações e não se espalha para formar uma superfície plana sob influência da gravidade (Steffe, 1992).

O modelo reológico de Casson (modelo C) foi desenvolvido para suspensões de partículas em meio Newtoniano. Ele tem sido amplamente utilizado em alimentos, particularmente na estimativa da tensão inicial (Charm, 1963; Vitali



O modelo reológico de Casson (modelo C) foi desenvolvido para suspensões de partículas em meio Newtoniano. Ele tem sido amplamente utilizado em alimentos, particularmente na estimativa da tensão inicial (Charm, 1963; Vitali & Rao, 1984b), sendo adotado pelo “International Office of Cocoa and Chocolate” como método oficial para interpretar o comportamento reológico do chocolate (Rao & Rizvi, 1986):

$$(\tau)^{0,5} = K_{0,c} + K_c (\dot{\gamma})^{0,5} \quad (2.6)$$

onde  $K_{0,c}$  e  $K_c$  são constantes do modelo. O valor  $(K_{0,c})^2$  tem sido utilizado como estimativa do valor da tensão inicial (Rao, 1977a,b; Rao, 1986).

Mizrahi & Berk (1972) desenvolveram um modelo reológico, que é uma modificação do modelo de Casson, baseada no modelo de uma suspensão de partículas interagindo em um solvente pseudoplástico. A equação resultante, modelo de Mizrahi-Berk (modelo MB), é :

$$(\tau)^{0,5} = K_{0,mb} + K_{mb} (\dot{\gamma})^{n_{mb}} \quad (2.7)$$

onde  $K_{0,mb}$ ,  $K_{mb}$  e  $n_{mb}$  são parâmetros a serem determinados com o ajuste. Analogamente ao modelo de Casson, o valor de  $(K_{0,mb})^2$  tem sido utilizado como estimativa do valor da tensão inicial. Esse modelo representa melhor o comportamento reológico do suco de laranja concentrado. Foi determinado que  $K_{0,mb}$  era afetado pela concentração de partículas suspensas e pela concentração de pectina solúvel e  $K_{mb}$  e  $n_{mb}$  dependiam principalmente das propriedades do solvente (Mizrahi & Berk, 1972).



### 2.3.7. Efeito da temperatura e concentração na viscosidade

A viscosidade de fluidos reais pode ser significativamente afetada através de variáveis como taxa de deformação, concentração, temperatura, pressão e duração da taxa de deformação, e é claramente importante destacar a dependência da viscosidade com tais variáveis (Barnes *et al.*, 1989).

Durante o processamento, armazenamento, transporte e comercialização, alimentos fluidos estão sujeitos a diferentes temperaturas. Um determinado alimento pode ser encontrado no mercado com diferentes composições ou passar, durante seu processamento, por uma variação na concentração. As propriedades reológicas são afetadas por mudanças de temperatura e concentração e, por esta razão, são estudadas como função destes parâmetros (Rao, 1977a ;Rao, 1986; Barnes *et al.*, 1989).

Para os fluidos Newtonianos, o conhecimento da viscosidade como função da temperatura e concentração é suficiente para o dimensionamento de equipamentos. Para os fluidos não-Newtonianos, como a viscosidade aparente varia também com a taxa de deformação, é necessário conhecer a variação desse parâmetro com a taxa de deformação, temperatura e concentração (Holdsworth, 1971; Rao & Anantheswaran, 1982).

#### Efeito da temperatura

Em geral, o efeito da temperatura na viscosidade Newtoniana  $\eta$  ou na viscosidade aparente  $\eta_a$ , a uma taxa de deformação específica, tem sido expresso por uma equação análoga à de Arrhenius (eq. 2.8). Para fluidos não-Newtonianos, além da viscosidade aparente a uma taxa de deformação

específica, o índice de consistência pode ser empregado para determinar o efeito da temperatura (eq. 2.9) (Holdsworth, 1971; Vitali *et al.*, 1974; Rao *et al.*, 1981; Vitali & Rao, 1984a,b; Rao *et al.*, 1984; Rao, 1986; Castaldo *et al.*, 1990; Schramm, 1994):

$$\eta_a = \eta_o \exp\left(\frac{E_{at,\eta}}{RT}\right) \quad (2.8)$$

onde  $\eta_a$  é a viscosidade aparente (Pa.s),  $\eta_o$  é uma constante (Pa.s),  $E_{at,\eta}$  é a energia de ativação para escoamento viscoso ( $\text{kcal.gmol}^{-1}$ ),  $R$  é a constante dos gases ( $1,987 \cdot 10^{-3} \text{ kcal.gmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) e  $T$  é a temperatura absoluta (K). A equação (2.8) indica a tendência geral observada de uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da temperatura. De um modo geral, quanto maior for a energia de ativação, maior será o efeito da temperatura sobre a viscosidade (Holdsworth, 1971; Rao, 1986).

$$K = C_{o,k} \exp\left(\frac{E_{at,k}}{RT}\right) \quad (2.9)$$

onde  $K$  é o índice de consistência ( $\text{Pa.s}^n$ ) e  $C_{o,k}$  é uma constante ( $\text{Pa.s}^n$ ).

Rao & Cooley (1983) utilizaram a eq. (2.9) para concentrados de tomate, onde os índices de consistência dos modelos HB e MB foram considerados. O aumento na temperatura resultou numa diminuição nos valores do índice de consistência e tensão inicial destes modelos, enquanto que os valores dos índices de comportamento de fluxo permaneceram aproximadamente constantes.

Valores de energia de ativação foram obtidos para vários alimentos fluidos, tais como sucos diluídos, soluções de sacarose, sucos de frutas concentrados e purês de frutas.



No Quadro 2.2 são apresentados valores da energia de ativação para alguns fluidos alimentares Newtonianos e não-Newtonianos.

Quadro 2.2. Índice de comportamento ( $n$ ) e energia de ativação do modelo de Arrhenius para alimentos líquidos Newtonianos e não-Newtonianos.

| <i>Produto</i>                         | <i>°Brix</i> | <i>n *</i><br>[ - ] | <i>Energia de ativação **</i><br>[ kcal.gmol <sup>-1</sup> ] |
|----------------------------------------|--------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| Suco de maçã despectinizado e filtrado | 75,0         | 1,00                | 14,2                                                         |
|                                        | 50,0         | 1,00                | 8,4                                                          |
|                                        | 30,0         | 1,00                | 6,3                                                          |
|                                        | 15,0         | 1,00                | 5,3                                                          |
| Suco de maçã turvo                     | 65,5         | 0,65                | 9,1                                                          |
|                                        | 50,0         | 0,85                | 6,1                                                          |
|                                        | 40,0         | 1,00                | 5,8                                                          |
|                                        | 30,0         | 1,00                | 5,1                                                          |
|                                        | 10,5         | 1,00                | 3,5                                                          |
| Suco de uva Concord                    | 64,0         | 0,90                | 11,2                                                         |
|                                        | 50,0         | 1,00                | 6,9                                                          |
|                                        | 30,0         | 1,00                | 6,2                                                          |
|                                        | 15,0         | 1,00                | 5,3                                                          |
| Suco concentrado de laranja            | 44,0         | 0,65                | 5,4                                                          |
|                                        | 30,0         | 0,85                | 4,2                                                          |
| Suco de laranja filtrado               | 18,0         | 1,00                | 5,8                                                          |
|                                        | 10,0         | 1,00                | 5,3                                                          |
| Suco concentrado de maracujá           | 33,4         | 0,46                | 3,2                                                          |
|                                        | 30,6         | 0,48                | 3,8                                                          |
|                                        | 25,3         | 0,54                | 4,0                                                          |
|                                        | 20,7         | 0,65                | 4,1                                                          |
|                                        | 15,6         | 0,77                | 4,5                                                          |
| Purê de maçã                           | 11,0         | 0,30                | 1,2                                                          |
| Purê de pêssego                        | 11,7         | 0,30                | 1,7                                                          |
| Purê de Pêra                           | 16,0         | 0,30                | 1,9                                                          |
| Solução aquosa de sacarose             | 60,0         | 1,00                | 8,4                                                          |
|                                        | 40,0         | 1,00                | 5,5                                                          |
|                                        | 20,0         | 1,00                | 4,4                                                          |
| Água                                   | -            | 1,00                | 3,6                                                          |

\* determinado a 30°C, para todos os fluidos.

\*\* As energias de ativação foram determinadas a taxa de deformação de 100 s<sup>-1</sup>, na faixa de temperatura de 20-70°C, com exceção do suco concentrado de maracujá cuja faixa de trabalho foi de 20-50°C. Em todos os experimentos, foi utilizado Reômetro de cilindros coaxiais, Contraves Rheomat 15.



Saravacos (1970) estudou o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente dos purês de frutas, verificando que, ao contrário dos sucos, a temperatura possuía pouco efeito nas propriedades de escoamento de alimentos líquidos contendo altos teores de sólidos em suspensão. Para purês de frutas, como maçã, pêssego e pêra, o índice de consistência “K”, diminuía para altas temperaturas, porém o índice de comportamento “n” não era afetado.

Em termos gerais, os trabalhos de revisão de Holdsworth (1971) e Rao (1977b), mostram que os valores de “n” para purês de frutas se situam em sua maioria na faixa de 0,30 a 0,50. É importante salientar que a variação de valores de “n” entre os autores é função de muitas variáveis, tais como variedade, processo de obtenção, grau de maturação, método de determinação dos parâmetros reológicos.

Holdsworth (1971) examinou os dados publicados de energia de ativação para sucos e purês de frutas e concluiu que a energia de ativação para escoamento viscoso diminuía com o aumento da concentração de partículas em suspensão. Os maiores valores foram observados para sucos clarificados de alta concentração de sólidos solúveis e os menores valores para purês de frutas. Para purês de frutas pseudoplásticos, o índice de comportamento “n” era diretamente proporcional à energia de ativação.

Vitali (1981) comenta que a energia de ativação para sucos é diretamente proporcional à concentração e que se comporta semelhantemente à soluções de sacarose.

Saravacos (1970) estudou o comportamento da viscosidade em vários sucos e purês de frutas como uma função da concentração e da temperatura. Observou que a viscosidade de sucos de maçã despectinizados e de uva diminuíram consideravelmente com o aumento da temperatura. Notou também que o efeito da temperatura foi mais pronunciado em concentrações mais

elevadas, entretanto, a viscosidade aparente de suco de laranja concentrado (a  $100\text{ s}^{-1}$ ) diminuiu apenas moderadamente com o aumento da temperatura, presumidamente devido à presença de quantidades consideráveis de polpa em suspensão. A mais alta energia de ativação foi obtida em suco de maçã clarificado (75 °Brix) com o valor de 14,2 kcal/gmol e a mais baixa foi obtida em purê de maçã (11 °Brix) com 1,2 kcal/gmol.

Suco de maracujá é um produto intermediário entre sucos e purês, com um teor relativo de polpa muito fina. Como pode ser observado, a sua energia de ativação também é intermediária entre sucos e purês.

Ibarz *et al.* (1992) estudaram o efeito da temperatura na viscosidade em suco clarificado de groselha na extensa faixa de temperatura (5 a 60)°C e concentração (35 a 64,5)°Brix. O efeito da temperatura foi descrito pela equação tipo Arrhenius. A energia de ativação para escoamento viscoso aumentou com a concentração de sólidos solúveis na faixa de (4,55 a 10,57) kcal/gmol.

De forma geral, pode-se dizer que um aumento da concentração de sólidos solúveis aumenta a dependência da viscosidade com a temperatura (aumenta  $E_{at}$ ), enquanto um aumento dos sólidos suspensos (teor de polpa) tem a tendência de diminuir a dependência da viscosidade aparente com a temperatura (diminui  $E_{at}$ ). A presença de pectina também parece diminuir a energia de ativação em relação a sucos despectinizados.

É importante ressaltar que o valor da  $E_{at}$  depende, para a maioria dos alimentos da faixa de temperatura considerada. Os valores da  $E_{at}$  para sucos concentrados de frutas aumentaram em faixas mais baixas de temperaturas (Rao *et al.*, 1984)



Fernandez-Martin (1972) estudou leites desnatados, parcialmente desnatados e integrais, assim como seus concentrados. Considerando que os fluidos eram Newtonianos para efeitos práticos, o efeito da temperatura na viscosidade foi representado pela eq. (2.10):

$$\log \eta = a_0 + a_1.T + a_2.T^2 \quad (2.10)$$

onde:  $\eta$  é a viscosidade (cP),  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  são constantes e  $T$  é a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### Efeito da concentração

Vários autores têm trabalhado na determinação da influência da concentração sobre a viscosidade e parâmetros reológicos de alimentos líquidos.

A viscosidade aumenta com o aumento da concentração de sólidos (Rao, 1986). Em faixas limitadas de concentração e à taxa de deformação e temperatura fixas, o efeito da concentração de sólidos na viscosidade aparente pode ser descrito alternativamente por relações do tipo exponencial (Cervone & Harper, 1978; Vitali & Rao, 1984b) ou tipo potência (Harper & El Sahrigi, 1965; Vitali *et al.*, 1974; Rao *et al.*, 1981; Vitali & Rao, 1982; Castaldo *et al.*, 1990), conforme descrito pelas eqs. (2.11) e (2.12), respectivamente.

$$\eta_a = a_{0,e} \exp(a_{1,e} \cdot C) \quad (2.11)$$

$$\eta_a = a_{0,p} \cdot C^{a_{1,p}} \quad (2.12)$$



onde  $C$  é a concentração de sólidos solúveis ou totais e  $a_{0,e}$ ;  $a_{1,e}$ ;  $a_{0,p}$  e  $a_{1,p}$  são constantes a serem determinadas.

Saravacos (1968), trabalhando com soluções modelo, constituídas de pectina, açúcar e celulose, mostrou que o comportamento reológico de um fluido é o resultado da interação entre os componentes básicos da mistura, de tal forma que a adição de açúcar na solução de pectina a torna mais viscosa, devido à tendência do sistema a formar gel, e que a adição de sólidos em suspensão, como celulose em soluções de açúcar, resulta em um líquido altamente viscoso e fortemente pseudoplástico.

Vitali *et al.* (1974) utilizaram a eq. (2.12), para sucos concentrados de maracujá e demonstraram que o valor do expoente  $a_{1,p}$  é dependente da temperatura e da taxa de deformação.

Rao *et al.* (1984) encontraram para sucos concentrados de uva e maçã, fluidos reportados como Newtonianos, a relação do tipo exponencial. A equação do tipo potência se mostrou mais adequada para purês viscosos, como os concentrados de tomate (Rao, 1986).

Vitali & Rao (1982), demonstraram que para os purês de goiaba a eq. (2.12) foi adequada, encontrando um aumento potencial do índice de consistência do modelo MB com a concentração e também o valor da tensão inicial aumentou com a concentração.

Vitali & Rao (1984a), utilizaram a eq. (2.11) para o suco de laranja com concentrações entre (50 e 65) °Brix. A equação do tipo exponencial também mostrou-se melhor para descrever o efeito de sólidos solúveis na viscosidade de outros sucos como: suco de pêssego (Ibarz *et al.*, 1992), suco de pêra (Ibarz & Pagán, 1987) e suco de groselha (Ibarz *et al.*, 1996). O modelo de potência,

eq. (2.12), apresentou-se melhor para o suco de banana clarificado (Khalil *et al.*, 1989).

O efeito da concentração no índice de consistência, também foi estudado para os fluidos que seguem os modelos do tipo Lei da Potência, Herschel-Bulkley e Mizrahi-Berk através das eqs. (2.13) e (2.14) (Cervone & Harper, 1978; Rao *et al.*, 1981; Vitali & Rao, 1982):

$$K = b_{0,e} \exp(b_{1,e} \cdot C) \quad (2.13)$$

$$K = b_{0,p} \cdot C^{b_{1,p}} \quad (2.14)$$

onde  $K$  é o índice de consistência ( $\text{Pa.s}^n$ ) e  $b_{0,e}$ ;  $b_{1,e}$ ;  $b_{0,p}$  e  $b_{1,p}$  são constantes a serem determinadas.

Rao *et al.* (1984) estudaram as propriedades de escoamento de concentrados de tomate com auxílio de um viscosímetro de cilindros concêntricos. Concluíram que o efeito da concentração na viscosidade aparente seguiu a relação do tipo potência. O índice de consistência “ $K$ ” aumentou com o aumento de sólidos totais e que o índice de comportamento “ $n$ ” foi menor que 0,31 para todos os concentrados, comportando-se como fluidos pseudoplásticos.

Rao & Coley (1983) utilizaram a eq. (2.14) para concentrados de tomate, modelando o efeito da concentração de sólidos totais nos índices de consistência dos modelos de HB e MB. O aumento na concentração resultou num aumento destes índices, enquanto que os índices de comportamento não variaram significativamente na faixa estudada.

### Efeito combinado da temperatura e concentração

O conhecimento do efeito combinado da temperatura e concentração na viscosidade aparente é útil em aplicações tais como a concentração de fluidos alimentares.

O efeito combinado da temperatura e concentração pode ser correlacionado em uma única equação, cuja forma é um produto das contribuições individuais de cada parâmetro, para ser usada em aplicações como evaporação, onde a temperatura e concentração mudam durante o processo. No caso da dependência da temperatura ser expressa por uma relação do tipo Arrhenius (eq. 2.8) e da concentração por uma relação do tipo potência (eq. 2.12), a equação combinada para o cálculo da viscosidade aparente pode ser expressa pelas eqs (2.15) e (2.16) (Harper & El-Sahrigi, 1965; Rao *et al.*, 1981; Castaldo *et al.*, 1990):

Conhecendo-se que a dependência da  $\eta_a$  com a temperatura seja do tipo Arrhenius e com a concentração, do tipo potência, obteve-se a seguinte relação:

$$\ln \eta_a = \ln \alpha_n + \beta_n \cdot \ln C + \frac{\delta_n}{T} \quad (2.15)$$

onde  $\alpha_n$ ,  $\beta_n$  e  $\delta_n$  são parâmetros constantes, C é a concentração em °Brix e T é a temperatura absoluta em K. Uma outra forma de representação da eq. (2.15) é a eq. (2.16).

$$\eta_a = \alpha_n \cdot C^{\beta_n} \cdot \exp\left(\frac{\delta_n}{T}\right) \quad (2.16)$$



Determina-se o valor da energia de ativação  $E_{at}$  pelo parâmetro  $\delta_n$ , que representa o valor numérico da relação  $E_{at} / R$ .

O parâmetro  $\beta_n$  é mais raro de ser encontrado na literatura, porém o Quadro 2.3 mostra os valores calculados para purês ou polpas e concentrados de frutas. Esses valores se situam na faixa de 2,0 a 3,1, e observa-se que aparentemente para sucos esse valor é maior.

A equação (2.16) é válida para fluidos Newtonianos. Para os fluidos não-Newtonianos, só é aplicada em taxas de deformações fixas.

Vitali & Rao (1982) aplicaram com sucesso uma forma parecida à eq. (2.16) para purê de goiaba (fluido pseudoplástico), na qual a dependência do índice de consistência do modelo LP com a temperatura seja do tipo Arrhenius e com a concentração, do tipo potência. Estes pesquisadores utilizaram com sucesso a eq. (2.17).

$$K = \alpha_k \cdot \exp\left(\frac{\delta_k}{T}\right) \cdot C^{\beta_k} \quad (2.17)$$

onde  $\alpha_k$  e  $\beta_k$  e  $\delta_k$  são constantes.

Cervone & Harper (1978) propuseram um produto de exponenciais para modelagem da viscosidade aparente (eq. 2.18) e do índice de consistência "K" (eq. 2.19) do modelo Lei da Potência. Estas relações são válidas quando a dependência da viscosidade aparente e do índice de consistência, com a temperatura for do tipo Arrhenius, e com a concentração for do tipo exponencial.

$$\eta_a = \alpha_e \cdot \exp(\beta_e \cdot C) \cdot \exp\left(\frac{\lambda_e}{RT}\right) \quad (2.18)$$

$$K = \alpha_p \cdot \exp(\beta_p \cdot C) \cdot \exp\left(\frac{\lambda_p}{RT}\right) \quad (2.19)$$

onde  $\alpha_e$ ,  $\alpha_p$ ,  $\beta_e$ ,  $\beta_p$ ,  $\lambda_e$  e  $\lambda_p$  são constantes.

Quadro 2.3. Representação das constantes da equação combinada da temperatura e concentração (eq. 2.16) para o cálculo da viscosidade aparente para purês, sucos de frutas e água pura. A energia de ativação foi calculada a partir da constante  $\delta_n$ .

| <b>Produto</b>        | <b>C</b><br><b>(°Brix)</b>  | <b>n</b>      | <b><math>\alpha_n</math></b> | <b><math>\beta_n</math></b> | <b><math>\delta_n</math></b><br><b>(K)</b> | <b><math>E_{at}</math></b><br><b>(kcal/gmol)</b> |
|-----------------------|-----------------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Purê de goiaba        | 9,8 – 16,0                  | 0,425         | $5,46 \cdot 10^{-6}$         | 2,71                        | 1872                                       | 3,72                                             |
| Purê de pêra          | 18,3 – 45,75<br>(% sólidos) | 0,466         | $9,77 \cdot 10^{-6}$         | 2,76                        | 1294                                       | 2,57                                             |
| Concentrado de tomate | 5,8 – 30,0<br>(% sólidos)   | 0,431         | $4,94 \cdot 10^{-4}$         | 2,08                        | 884                                        | 1,76                                             |
| Suco de maracujá      | 15,6 – 33,4                 | 0,455 – 0,773 | $5,9 \cdot 10^{-8}$          | 3,09                        | 1921                                       | 3,82                                             |
| Suco de acerola       | 8,0 – 27,0                  | 0,18 – 0,29   | $1,0 \cdot 10^{-4}$          | 2,41                        | 1529                                       | 3,04                                             |
| Água                  | -                           | -             | -                            | -                           | -                                          | 3,6                                              |

Fonte: Harper & Sahrighi (1965); Saravacos (1970); Vitali *et al.* (1974); Vitali (1981); Oliveira (1997).

### 2.3.8. Reologia do suco de acerola

Oliveira (1997) determinou o comportamento reológico do suco de acerola nas concentrações de (8, 15, 21 e 27)°Brix nas temperaturas de (10, 30 e 50)°C, utilizando um reômetro digital Brookfield (modelo DV-III), acoplado ao sistema de medida SC4-31, nas medições a 8°Brix e o reômetro de cilindros concêntricos tipo Searle, marca Haake, modelo Rheotest 2.1, nas medições a (15, 21 e 27)°Brix. Para a análise dos dados experimentais, utilizou os modelos reológicos da Lei da Potência, Herschel-Bulkley e Casson. Para a determinação do melhor ajuste aos dados experimentais foram analisados os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

Oliveira (1997) constatou que o modelo de Herschel-Bulkley adaptou-se muito bem à concentração de 8 °Brix nas três temperaturas estudadas. Para as demais concentrações, o modelo Lei da Potência foi o que melhor ajustou aos dados experimentais, em todas as temperaturas. Apesar do modelo de Herschel-Bulkley ajustar bem os dados experimentais apresentando os melhores valores de correlação linear, o parâmetro  $\tau_0$  apresentou-se negativo, o que não tem significado físico, portanto, conclui-se que o comportamento real do suco de acerola, nas condições estudadas, pode ser predito pelo modelo da Lei da Potência.

Com relação ao índice de comportamento ( $n$ ), a temperatura mostrou uma influência não muito bem definida. Foi constatado que a (21 e 27)°Brix,  $n$  aumentou com a elevação da temperatura, porém a 8 °Brix,  $n$  diminuiu com o aumento da temperatura e finalmente para a concentração de 15 °Brix, não foi observado um comportamento bem definido. O índice de comportamento para a temperatura de 10 °C decresceu com o aumento da concentração, mas para as temperaturas de (30 e 50)°C a tendência não foi bem definida, conforme observado no Quadro 2.4.



Quadro 2.4. Resultados dos parâmetros reológicos ajustados para o modelo Lei da Potência com os respectivos coeficientes de determinação em diferentes temperaturas e concentrações, e energia de ativação do modelo de Arrhenius para o suco de acerola.

| <b>Concentração<br/>(°Brix)</b> | <b>T<br/>(°C)</b> | <b>K<br/>(Pa.s<sup>n</sup>)</b> | <b>n<br/>(-)</b> | <b>R<sup>2</sup><br/>(-)</b> | <b>E<sub>at</sub><br/>(kcal/gmol)</b> |
|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 8                               | 10                | 3,56                            | 0,26             | 0,931                        | 0,63                                  |
|                                 | 30                | 3,04                            | 0,19             | 0,922                        |                                       |
|                                 | 50                | 2,59                            | 0,18             | 0,876                        |                                       |
| 15                              | 10                | 14,59                           | 0,23             | 0,988                        | 1,38                                  |
|                                 | 30                | 9,94                            | 0,29             | 0,996                        |                                       |
|                                 | 50                | 7,24                            | 0,27             | 0,981                        |                                       |
| 21                              | 10                | 35,62                           | 0,22             | 0,993                        | 1,46                                  |
|                                 | 30                | 26,66                           | 0,24             | 0,982                        |                                       |
|                                 | 50                | 16,92                           | 0,27             | 0,980                        |                                       |
| 27                              | 10                | 64,31                           | 0,20             | 0,985                        | 1,34                                  |
|                                 | 30                | 45,38                           | 0,23             | 0,990                        |                                       |
|                                 | 50                | 32,59                           | 0,26             | 0,992                        |                                       |

Fonte: Oliveira (1997)

Oliveira (1997) sugeriu uma ampliação da caracterização reológica para outras condições de processos.

Pode-se observar que os dados referentes a 8 °Brix, em especial ao que se refere ao valor de “n”, não mostraram uma boa concordância em relação aos dados das outras concentrações. É importante ressaltar que estes dados foram obtidos em reômetros diferentes.

O suco de acerola nas faixas de temperatura e concentração estudadas, apresentou um forte comportamento não-Newtoniano com características pseudoplásticas. Observando-se os resultados obtidos para o índice de consistência, verifica-se que a uma dada concentração, o aumento da temperatura causa uma diminuição deste parâmetro; mas este se eleva com o aumento do conteúdo de sólidos solúveis a temperatura constante. Os parâmetros índice de consistência e viscosidade aparente foram correlacionadas em função da temperatura através da relação análoga à de Arrhenius.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. MATÉRIA-PRIMA**

As amostras de suco de acerola foram cedidas pela Companhia de Cítricos do Brasil (CCB), na forma congelada, pasteurizada e concentrada a 13,0 °Brix. A estocagem da amostra foi realizada em câmara de congelamento a -18 °C até utilização nos ensaios. As amostras foram preparadas por diluição com água destilada nas diversas concentrações de (4,0; 7,0 e 10,0) °Brix. Parte da amostra recebida foi concentrada a 16,0 °Brix utilizando-se um liofilizador, marca Labconco, como parte do processo de liofilização onde o produto foi retirado antes de estar liofilizado.

#### **3.2. REOMETRIA**

Uma das principais vantagens na utilização dos reômetros rotacionais, é que esse tipo de equipamento, permite uma medida contínua da relação taxa de deformação e tensão de cisalhamento, permitindo também a análise de comportamento dependente do tempo.

##### **3.2.1. Descrição do reômetro e acessórios**

As medidas reológicas foram realizadas com um reômetro rotacional, tipo Searle, marca Contraves, modelo Rheomat 30, de cilindros concêntricos, acoplado ao programador Rheoscan 100 e registrador gráfico Rikadenki. Este sistema, cujo cilindro interno é rotacional e o cilindro externo fixo, baseia-se na determinação do torque no próprio cilindro interno.



A temperatura de medição, foi controlada pelo banho termostático Rheotherm 115, com capacidade para operar na faixa de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). A velocidade do cilindro interno varia de (0 a 350) rpm. Os sistemas de medidas disponíveis são: DIN 8, DIN 14, DIN 25, DIN 45 e MS0, cobrindo uma ampla faixa de viscosidade, variando de (0,9 a 13723) mPa.s. As constantes relativas aos sistemas de medidas são representadas por  $U$  e  $\tau_{rep}$ .

Quadro 3.1. Especificações relativas ao equipamento Contraves – Rheomat 30.

| <i>Sistema de medida</i> | <i>Volume do sistema (mL)</i> | <i>Viscosidade absoluta (mPa.s)</i> | <i>U (-)</i> | <i><math>\tau_{rep}</math> (mPa)</i> |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------------|
| DIN 8                    | 0,7                           | $2422 < \eta < 13723$               | 1,291        | 39600                                |
| DIN 14                   | 4,0                           | $431 < \eta < 2443$                 | 1,291        | 7050                                 |
| DIN 25                   | 18,0                          | $75 < \eta < 426$                   | 1,291        | 1230                                 |
| DIN 45                   | 114,0                         | $13 < \eta < 73$                    | 1,291        | 211                                  |
| MS0                      | 18,0                          | $0,9 < \eta < 5,3$                  | 4,942        | 58,25                                |

### 3.2.2. Metodologia de preparo das amostras e para obtenção dos dados reológicos

As amostras serão uniformizadas cuidadosamente para que não se formassem bolhas, e cerca de 50% do volume foi transferido para o copo vagorosamente, e em seguida, o cilindro interno foi imergido lentamente. O

volume necessário para a medida foi completado ao nível de fluido referente ao sistema de medida utilizado.

Em casos em que ocorra formação de bolhas de ar, estas poderão ser eliminadas através da desaeração das amostras pela aplicação de vácuo. O conjunto sistema de medida-amostra foi acoplado ao reômetro e ao banho termostático e ficou em repouso por aproximadamente 10 minutos, tempo necessário para que a temperatura desejada seja atingida. As amostras foram pré-aquecidas ou pré-resfriadas até a temperatura de medida, com o objetivo de diminuir o tempo de repouso.

Os sistemas de medidas utilizados foram: DIN 14, DIN 25 e DIN 45. As velocidades rotacionais do cilindro interno estiveram dentro da faixa de (8,79 a 350) rpm. Para cada velocidade rotacional selecionada, o equipamento mediu o torque correspondente. A partir destes pares de valores foi possível calcular a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento, multiplicando-os por fatores, estabelecidos pelo fabricante, que variam com a geometria dos sistemas, de acordo com a eq. (3.1):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{(\tau_{\text{rep}} \cdot Y)}{U \cdot N} \quad (3.1)$$

onde  $\tau_{\text{rep}}$  e  $U$  são constantes relativas aos sistemas de medidas, de acordo com o Quadro 3.1,  $N$  é a velocidade rotacional do cilindro interno, variando de (8,79 a 350) rpm e  $Y$  é o valor lido no reograma a ser convertido em tensão de cisalhamento.

A construção das curvas de escoamento à partir dos dados obtidos no reômetro, segue o seguinte procedimento:



- 1) Obtém-se a medida de torque no equipamento a uma dada velocidade rotacional.
- 2) Converte-se o torque e a velocidade rotacional em tensão de cisalhamento e taxa de deformação, respectivamente, multiplicando-os por fatores que variam com a geometria dos cilindros, sendo estabelecidos pelo fabricante, conforme Quadros 3.1 e 3.2.
- 3) Calculam-se as taxas de deformação corrigidas para o comportamento não-Newtoniano, através das eqs. (3.3) e (3.4).

As equações para o cálculo da taxa de deformação dadas pelos fabricantes de reômetros baseiam-se em um suposto comportamento newtoniano do fluido estudado. Quando o fluido apresenta um comportamento pseudoplástico, o erro decorrente do uso das equações mencionadas dependerá da magnitude do desvio do comportamento newtoniano e do volume que a amostra ocupa dentro dos cilindros concêntricos, ou seja, quanto menor for o valor do índice de comportamento, maior será a correção necessária.

A relação entre os raios dos cilindros externos e interno neste experimento foi de 1,015, sendo  $R_a$  o raio externo do cilindro rotativo e  $R_b$  o raio interno do cilindro fixo. Dentre os vários métodos de correção que existem, um dos mais utilizados é o que relaciona a taxa de deformação real à taxa de deformação newtoniana. É importante ressaltar que todos os métodos de correção estão relacionados somente ao uso do modelo reológico da Lei da Potência, o que na verdade vem da correção do gradiente de velocidade na superfície da peça que mede o torque (Smith, 1984).

$$\dot{\gamma}_{\text{corrigido}} = K \cdot \dot{\gamma} \quad (3.3)$$



$$K = \frac{1 - \left(\frac{R_a}{R_b}\right)^2}{n \cdot \left[1 - \left(\frac{R_a}{R_b}\right)^{\frac{2}{n}}\right]} \quad (3.4)$$

Para cada concentração de sólidos solúveis e à temperatura constante foi traçado uma curva, em papel gráfico fornecido pelo fabricante, correspondente ao torque e a velocidade de rotação crescente de (8,79 a 350) rpm em 13 pontos no reograma com distâncias crescentes, onde a maior concentração de pontos situa-se em baixas velocidades. Quando a velocidade de rotação máxima for atingida, a velocidade diminuirá gradualmente, obtendo-se os pontos das curva descendente nos mesmos valores de velocidades utilizados na curva ascendente.

Para fluidos que exibem comportamento tixotrópico, a curva descendente se localiza abaixo da curva ascendente correspondente (Saravacos, 1970).

Quadro 3.2. Conversão da velocidade rotacional em taxa de deformação.

| <i>Pontos<br/>do<br/>reograma</i> | <i>Rotação do<br/>cilindro<br/>interno</i> | <i>Taxa de deformação<br/>(<math>s^{-1}</math>)</i> |               |               |               |            |
|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|------------|
|                                   | <i>N (rpm)</i>                             | <i>DIN 8</i>                                        | <i>DIN 14</i> | <i>DIN 25</i> | <i>DIN 45</i> | <i>MS0</i> |
| 18                                | 8,79                                       | 11,35                                               | 11,35         | 11,35         | 11,35         | 43,44      |
| 19                                | 11,95                                      | 15,43                                               | 15,43         | 15,43         | 15,43         | 59,06      |
| 20                                | 16,30                                      | 21,04                                               | 21,04         | 21,04         | 21,04         | 80,55      |
| 21                                | 22,10                                      | 28,53                                               | 28,53         | 28,53         | 28,53         | 109,22     |
| 22                                | 30,00                                      | 38,73                                               | 38,73         | 38,73         | 38,73         | 148,26     |
| 23                                | 40,80                                      | 52,67                                               | 52,67         | 52,67         | 52,67         | 201,63     |
| 24                                | 55,50                                      | 71,65                                               | 71,65         | 71,65         | 71,65         | 274,28     |
| 25                                | 75,40                                      | 97,34                                               | 97,34         | 97,34         | 97,34         | 372,63     |
| 26                                | 102,50                                     | 132,33                                              | 132,33        | 132,33        | 132,33        | 506,56     |
| 27                                | 139,30                                     | 179,84                                              | 179,84        | 179,84        | 179,84        | 688,42     |
| 28                                | 190,00                                     | 245,29                                              | 245,29        | 245,29        | 245,29        | 938,98     |
| 29                                | 257,00                                     | 331,79                                              | 331,79        | 331,79        | 331,79        | 1270,09    |
| 30                                | 350,00                                     | 451,85                                              | 451,85        | 451,85        | 451,85        | 1729,70    |

### 3.2.3. Experimentos preliminares

Foram realizados experimentos para verificar se as amostras apresentavam comportamento dependente do tempo. Os testes preliminares consistem na determinação da tensão de cisalhamento à taxa de deformação e temperatura constantes, em função do tempo de duração da taxa de deformação escolhida.

O objetivo destas análises foi determinar o tempo necessário para alcançar o equilíbrio, ou seja, o tempo de duração da taxa de deformação após o qual não se observa variação na leitura do valor do torque, conforme Figura 3.1. A partir desse ponto não ocorre tixotropia.

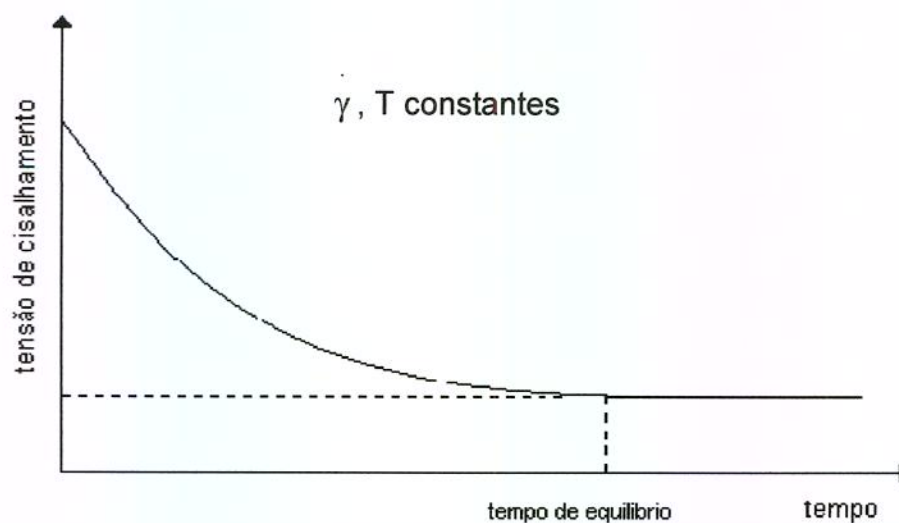


Figura 3.1- Determinação de comportamento tixotrópico e do tempo de equilíbrio.



A variável temperatura foi estudada em 4 (quatro) níveis, a concentração em 3 (três) níveis e a taxa de deformação em 3 (três) níveis. Os ensaios foram realizados em triplicata, totalizando 108 experimentos. Este delineamento experimental está detalhado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3. Avaliação e determinação de comportamento dependente do tempo para alcançar o equilíbrio.

| <i>Temperatura (°C)</i> | <i>Conc. sólidos solúveis (°Brix)</i> | <i>(1) Taxa de deformação (s<sup>-1</sup>)</i> |
|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|
| 5,0                     | 4,0                                   | .                                              |
|                         | 13,0                                  | $\gamma$ baixa, $\gamma$ média, $\gamma$ alta  |
|                         | 16,0                                  | .                                              |
| 35,0                    | 4,0                                   | .                                              |
|                         | 13,0                                  | $\gamma$ baixa, $\gamma$ média, $\gamma$ alta  |
|                         | 16,0                                  | .                                              |
| 65,0                    | 4,0                                   | .                                              |
|                         | 13,0                                  | $\gamma$ baixa, $\gamma$ média, $\gamma$ alta  |
|                         | 16,0                                  | .                                              |
| 85,0                    | 4,0                                   | .                                              |
|                         | 13,0                                  | $\gamma$ baixa, $\gamma$ média, $\gamma$ alta  |
|                         | 16,0                                  | .                                              |

(1) os valores das taxas de deformação que foram utilizados neste experimento são:

$$\gamma_{\text{baixa}} = 50 \text{ s}^{-1}, \gamma_{\text{média}} = 100 \text{ s}^{-1} \text{ e } \gamma_{\text{alta}} = 450 \text{ s}^{-1}.$$

#### 3.2.4. Delineamento experimental para construção dos reogramas

As amostras foram submetidas a uma faixa de taxa de deformação variando de (11,35 a 451,85) s<sup>-1</sup> durante quatro minutos para velocidades crescentes, e mais quatro minutos para velocidades decrescentes. Desta forma, foram obtidas medições em duplicata para cada amostra. A experiência foi repetida três vezes

para cada temperatura e concentração de suco de acerola, obtendo-se seis repetições dos valores de tensão de cisalhamento. Portanto, o valor final da tensão de cisalhamento para cada uma das taxas de deformação foi o valor médio resultante das seis leituras.

As variáveis independentes estudadas foram a temperatura e a concentração de sólidos solúveis, nas faixas de (5,0 a 85,0)°C e de (4,0 a 16,0)°Brix, respectivamente. A variável temperatura foi estudada em 6 (seis) níveis e a concentração em 5 (cinco) níveis. Os testes foram realizados em triplicata, num total de 90 (noventa) ensaios, como ilustrado no Quadro 3.4.

Quadro 3.4. Delineamento experimental para construção dos reogramas.

| <b>Concentração<br/>(°Brix)</b> | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> |    |    |    |    |    |
|---------------------------------|-----------------------------|----|----|----|----|----|
| 4,0                             | 5                           | 20 | 35 | 50 | 65 | 85 |
| 7,0                             | 5                           | 20 | 35 | 50 | 65 | 85 |
| 10,0                            | 5                           | 20 | 35 | 50 | 65 | 85 |
| 13,0                            | 5                           | 20 | 35 | 50 | 65 | 85 |
| 16,0                            | 5                           | 20 | 35 | 50 | 65 | 85 |

### 3.3. PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS

Todos os resultados foram processados utilizando-se os softwares Statistica 5.0, Table Curve 4.0, Origin 3.5 e Excel 97. Os valores experimentais de tensão de cisalhamento e da taxa de deformação foram ajustados, através de regressão não-linear aos modelos da Lei da Potência (LP), Herschel-Bulkley (HB), Mizrahi & Berk (MB) e Casson (C). O efeito da temperatura e da concentração sobre os parâmetros reológicos, foram determinados também, através de regressão não-linear.

Em todas as modelagens realizadas, foram determinados e analisados os seguintes parâmetros de controle de ajuste: o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a soma dos quadrados dos resíduos (SSR) e o qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

O coeficiente de determinação mede a proporção da variação total da média explicada pela regressão, definido como a soma quadrática total. O teste do qui-quadrado expressa a diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores obtidos experimentalmente. A soma dos quadrados dos resíduos, identifica o erro no ajuste da curva.

### 3.4. ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS

Nas amostras de suco concentrado de acerola a 13,0 °Brix, foram realizadas as seguintes determinações:



- **Teor de sólidos solúveis**

Por refratometria, valores expressos em °Brix a 20 °C, método AOAC 22024 (1984).

- **Acidez total titulável**

Será determinada segundo o método AOAC 22038 (1984). Os resultados foram expressos em porcentagem de ácido málico.

- **pH (potencial de hidrogênio)**

Por potenciômetro a 20 °C, método AOAC 10035 (1984).

- **Densidade**

Foi obtida através de um densímetro digital, marca Paar, modelo DMA 48.

- **Ácido ascórbico**

Foi determinado pelo método do 2,6 – diclorofenol-indofenol, método AOAC 43056 (1984).

- **Pectina**

Foi determinada segundo a metodologia de Carreé & Haynes, descrita por Pearson (1970). Resultados expressos em porcentagem (m/m).

- **Sólidos totais**

Por gravimetria. As amostras foram previamente liofilizadas, seguindo-se a secagem em estufa a vácuo a 50 °C até peso constante (Rao & Cooley, 1983; Rao *et al.* 1984).

Os resultados serão expressos em porcentagem (m/m).

- **Açúcares totais**

Método AOAC 22084 (1984).

- **Açúcares redutores**

Método AOAC 22085 (1984).

- **Teor de polpa**

O teor de polpa foi determinado utilizando-se uma centrífuga modelo 215 de marca Fanem, na velocidade de rotação de 3600 rpm e raio de 18 cm, equivalente a 2609 g.

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

A variação na composição físico-química de sucos de frutas é decorrente de muitos fatores tais como: variedade, grau de maturação, local de plantio, época de plantio e colheita entre outros. A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para a caracterização físico-química do suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix. Todas as análises foram realizadas em triplicata. Portanto, os valores apresentados na Tabela 4.1, representam a média aritmética das medidas.

Tabela 4.1. Caracterização físico-química do suco de acerola a 13,0 °Brix

| Determinação                           | Média Aritmética | Desvio Padrão |
|----------------------------------------|------------------|---------------|
| Sólidos solúveis (°Brix)               | 13,0             | 0,2           |
| pH                                     | 3,34             | 0,05          |
| Acidez total (g de ác.málico/100 g)    | 1,89             | 0,05          |
| Açúcares totais (g/100 g)              | 8,42             | 0,26          |
| Açúcares redutores (g/100 g)           | 6,07             | 0,25          |
| Açúcares não-redutores (g/100 g)       | 2,35             | 0,08          |
| Sólidos totais (g/100 g)               | 15,41            | 0,40          |
| Umidade (g/100 g)                      | 84,59            | 0,40          |
| Pectina (g/100 g)                      | 2,05             | 0,17          |
| Amido (g/100 g)                        | 2,33             | 0,11          |
| Vitamina C (mg/100 g)                  | 2.018,67         | 46,06         |
| Densidade a 20 °C (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,0555           | 0,0003        |
| Conteúdo de polpa (g/100 g)            | 85,32            | 1,15          |

Os resultados obtidos estão na faixa dos valores encontrados pelos autores Matsuura (1994) e Oliva (1995), com exceção do conteúdo de sólidos totais (cerca de 14% maior), do conteúdo de polpa (cerca de 20% maior), e do teor de pectina que está demasiadamente superior em cerca de 100%.



## 4.2. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

### 4.2.1. Determinação de comportamento dependente do tempo

Foram realizados experimentos preliminares para verificar se as amostras de suco de acerola apresentavam comportamento dependente do tempo. Os experimentos preliminares consistem na determinação da tensão de cisalhamento a taxa de deformação e temperatura constantes, em função do tempo necessário para se alcançar o equilíbrio, ou seja, o tempo de duração da taxa de deformação após o qual não se observa variação na leitura do valor do torque.

De acordo com o delineamento experimental sugerido no Quadro 3.3, a maior variação do torque foi encontrado na temperatura de 5,0 °C, na concentração de 16,0 °Brix e a taxa de deformação de 450,0 s<sup>-1</sup>, e a menor variação do torque foi encontrado na temperatura de 85,0 °C, na concentração de 4,0 °Brix e na taxa de deformação de 50,0 s<sup>-1</sup>, durante 30 minutos de cisalhamento. Estes resultados podem ser melhor acompanhados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Determinação de comportamento dependente do tempo expresso em percentagem de redução entre a viscosidade aparente inicial e final, durante 30 minutos de cisalhamento.

| <b>Variáveis dependentes e independentes</b> | <b>Unidades</b>    | <b>Maior variação</b> | <b>Menor variação</b> |
|----------------------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura                                  | (°C)               | 5,0                   | 85,0                  |
| Concentração                                 | (°Brix)            | 16,0                  | 4,0                   |
| Taxa de deformação                           | (s <sup>-1</sup> ) | 450,0                 | 50,0                  |
| Visc. aparente inicial                       | (Pa.s)             | 0,347                 | 0,0239                |
| Visc. aparente final                         | (Pa.s)             | 0,339                 | 0,0239                |
| % variação                                   | ( - )              | 2,31                  | 0                     |

As curvas de escoamento descendentes e ascendentes foram praticamente coincidentes, em todas as faixas de temperatura e concentração. Observa-se na Tabela 4.2 que a percentagem de redução entre a viscosidade aparente inicial e final, indica ausência de comportamento dependente do tempo. A pequena variação na viscosidade aparente pode ser explicada por possíveis depósitos de sólidos insolúveis por centrifugação. Os testes demonstraram ausência de tixotropia.

#### **4.2.2. Modelagem e obtenção dos parâmetros reológicos**

Neste estudo foram utilizadas as concentrações de (4,0; 7,0; 10,0; 13,0 e 16,0) °Brix e temperaturas de (5,0; 20,0; 35,0; 50,0; 65,0 e 85,0) °C para obtenção dos reogramas (tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação).

Para a análise dos dados experimentais foram utilizados os modelos de Mizrahi & Berk, Lei da Potência, Herschel-Bulkley e Casson. Os parâmetros reológicos e os parâmetros de controle dos ajustes foram determinados utilizando-se o Software Origin 3.5, através de regressão não linear.

As amostras foram submetidas a uma faixa de taxa de deformação variando de (11,35 a 451,85)  $s^{-1}$  durante quatro minutos para velocidades crescentes, e mais quatro minutos para velocidades decrescentes. Desta forma, foram obtidas medições em duplicata para cada amostra. A experiência foi repetida três vezes para cada uma das temperaturas e concentrações de suco de acerola, obtendo-se seis repetições dos valores de tensão de cisalhamento. Portanto, o valor final da tensão de cisalhamento para cada uma das taxas de deformação é o valor médio resultante das seis leituras. Os valores médios das tensões de cisalhamento nas faixas de temperatura e concentração estudadas estão no Apêndice desta dissertação, representados pelas Tabelas A.1 a A.5.



A nível de comparação entre os ajustes dos modelos de MB, LP, HB e C aos reogramas, as Tabelas 4.3 a 4.6 apresentam os parâmetros dos modelos obtidos e os parâmetros de controle dos ajustes, para o suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix, na faixa de temperatura de (5 a 85) °C.

Tabela 4.3. Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |
|-----------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>K<sub>0,hb</sub> (Pa)</b>                  | 45,673          | 37,798           | 29,091           | 27,295           | 24,559           | 19,836           |
| <b>K<sub>hb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 5,504           | 3,785            | 2,747            | 1,879            | 1,295            | 0,937            |
| <b>n<sub>hb</sub></b>                         | 0,393           | 0,437            | 0,495            | 0,529            | 0,585            | 0,627            |
| <b>erro K<sub>0,hb</sub> (Pa)</b>             | 2,120           | 2,061            | 3,256            | 0,114            | 1,189            | 0,865            |
| <b>erro K<sub>hb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 1,034           | 0,878            | 1,156            | 0,036            | 0,310            | 0,194            |
| <b>erro n<sub>hb</sub></b>                    | 0,026           | 0,033            | 0,061            | 0,003            | 0,036            | 0,032            |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                          | 0,424           | 0,599            | 0,837            | 0,004            | 0,563            | 0,378            |
| <b>SSR</b>                                    | 4,236           | 5,988            | 8,375            | 0,037            | 5,632            | 3,781            |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,999           | 0,998            | 0,995            | 1,000            | 0,997            | 0,998            |

Tabela 4.4. Parâmetros do modelo da Lei de Potência (LP) para suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|-----------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>K<sub>lp</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 38,629        | 29,441         | 19,892         | 17,760         | 14,341         | 10,381         |
| <b>n<sub>lp</sub></b>                         | 0,161         | 0,182          | 0,232          | 0,229          | 0,253          | 0,286          |
| <b>erro K<sub>lp</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 2,100         | 1,076          | 1,162          | 0,910          | 0,960          | 0,801          |
| <b>erro n<sub>lp</sub></b>                    | 0,006         | 0,008          | 0,012          | 0,010          | 0,013          | 0,015          |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                          | 3,508         | 3,930          | 6,677          | 3,986          | 5,330          | 4,792          |
| <b>SSR</b>                                    | 38,584        | 43,227         | 73,451         | 43,848         | 58,633         | 52,714         |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,986         | 0,982          | 0,974          | 0,979          | 0,972          | 0,972          |



Tabela 4.5. Parâmetros do modelo de Mizrahi &amp; Berk (MB) para suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.

|                                    | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{0,mb}$ (Pa)                    | 6,542         | 5,942          | 5,113          | 5,031          | 4,764          | 4,270          |
| $K_{mb}$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 0,561         | 0,448          | 0,430          | 0,294          | 0,231          | 0,196          |
| $n_{mb}$                           | 0,312         | 0,345          | 0,370          | 0,412          | 0,452          | 0,480          |
| erro $K_{0,mb}$ (Pa)               | 0,384         | 0,401          | 0,602          | 0,026          | 0,256          | 0,222          |
| erro $K_{mb}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,120         | 0,180          | 0,303          | 0,012          | 0,065          | 0,048          |
| erro $n_{mb}$                      | 0,035         | 0,039          | 0,073          | 0,005          | 0,037          | 0,035          |
| $\chi^2$                           | 0,500         | 0,689          | 0,957          | 0,014          | 0,629          | 0,399          |
| SSR                                | 5,004         | 6,890          | 9,571          | 0,140          | 6,293          | 3,986          |
| $R^2$                              | 0,998         | 0,997          | 0,993          | 1,000          | 0,997          | 0,998          |

Tabela 4.6. Parâmetros do modelo de Casson (C) para suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.

|                                 | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{0,c}$ (Pa)                  | 7,394         | 6,596          | 5,710          | 5,368          | 4,940          | 4,342          |
| $K_c$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 0,142         | 0,147          | 0,170          | 0,158          | 0,165          | 0,171          |
| erro $K_{0,c}$ (Pa)             | 0,050         | 0,048          | 0,074          | 0,025          | 0,038          | 0,031          |
| erro $K_c$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,004         | 0,004          | 0,006          | 0,002          | 0,003          | 0,002          |
| $\chi^2$                        | 2,242         | 1,673          | 3,335          | 0,327          | 0,666          | 0,377          |
| SSR                             | 24,661        | 18,402         | 36,689         | 3,598          | 7,329          | 4,142          |
| $R^2$                           | 0,991         | 0,992          | 0,987          | 0,998          | 0,997          | 0,998          |

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 verifica-se que os parâmetros de controle de ajuste do modelo de Herschel-Bulkley (HB) na concentração de 13,0 °Brix, estão variando de 0,004 a 0,837, de 0,037 a 8,375 e de 0,995 a 1,000 para  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$ , respectivamente, e para o modelo da Lei de Potência (LP), estão variando de

3,508 a 6,677, de 38,584 a 73,451 e de 0,972 a 0,986 para  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$ , respectivamente.

Na Tabela 4.5 observa-se que os parâmetros de controle de ajuste do modelo de Mizrahi & Berk (MB) na concentração de 13,0 °Brix, estão variando de 0,014 a 0,957, de 0,140 a 9,571 e de 0,993 a 1,000 para  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$ , respectivamente, e para o modelo de Casson (C), estão variando de 0,327 a 3,335, de 3,598 a 36,689 e de 0,987 a 0,998 para  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$ , respectivamente.

Pode-se concluir que os modelos de Mizrahi & Berk (MB), Lei da Potência (LP), Herschel-Bulkley (HB) e Casson (C), utilizados para descrever o comportamento reológico do suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix, apresentaram variadas faixas de parâmetros de controle, sendo que o modelo de Herschel-Bulkley proporcionou os melhores parâmetros de controle de ajuste em toda a faixa de temperatura estudada, apresentando os menores valores da soma dos quadrados dos resíduos (SSR) e do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), além dos valores mais elevados para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Os resultados dos ajustes dos modelos obtidos, utilizando-se as demais concentrações estão contidas nas Tabelas A.6 a A.21 do Apêndice.

As Tabelas A.6 a A.9 apresentam os parâmetros de controle de ajuste e os parâmetros dos modelos LP, HB, MB e C, na concentração de 4,0 °Brix. Verifica-se que o modelo de HB apresentou os melhores parâmetros de controle de ajuste, visto que as faixas de valores para  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$  estão variando, respectivamente, de 0,001 a 0,022, de 0,008 a 0,220 e de 0,998 a 1,000.

As Tabelas A.10 a A.13 apresentam os parâmetros de controle de ajuste e os parâmetros dos modelos LP, HB, MB e C, na concentração de 7,0 °Brix. O modelo de HB apresentou os melhores parâmetros de controle de ajuste, visto que



as faixas de valores para  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$  estão variando, respectivamente, de 0,009 a 0,047, de 0,093 a 0,467 e de 0,999 a 1,000.

Nas Tabelas A.14 a A.17 estão representados os parâmetros de controle de ajuste e os parâmetros dos modelos LP, HB, MB e C, na concentração de 10,0 °Brix. O modelo de HB apresentou os melhores parâmetros de controle de ajuste, visto que as faixas de valores para  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$  estão variando, respectivamente, de 0,004 a 0,837, de 0,037 a 8,375 e de 0,995 a 1,000.

Nas Tabelas A.18 a A.21 estão representados os parâmetros de controle de ajuste e os parâmetros dos modelos LP, HB, MB e C, na concentração de 16,0 °Brix. O modelo de HB apresentou os melhores parâmetros de controle de ajuste, visto que as faixas de valores de  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$  estão variando, respectivamente, de 0,217 a 0,972, de 2,170 a 9,720 e de 0,997 a 0,999. Nesta concentração os piores parâmetros de controle de ajuste são observados na aplicação do modelo LP, visto que as faixas de valores de  $\chi^2$ , SSR e  $R^2$  estão variando, respectivamente, de 4,273 a 9,887, de 47,003 a 108,760 e de 0,970 a 0,985.

Oliveira (1997) determinou os parâmetros reológicos do suco de acerola nas temperaturas de (10, 30 e 50) °C e concentrações de (8, 15, 21 e 27) °Brix, utilizando os modelos reológicos de HB, LP e C. verificou que o modelo de HB foi o que apresentou os menores valores para o  $\chi^2$  e os maiores para  $R^2$ . Segundo a autora, o parâmetro tensão inicial do modelo HB apresentou-se negativo, o que não tem significado físico, concluindo, portanto, que o comportamento real do suco de acerola, nas condições estudadas, pode ser predito pelo modelo LP, que também apresentou bons parâmetros de ajuste, enquanto que nesta dissertação, não foi encontrado valor negativo no parâmetro tensão inicial.



### 4.2.3. Reogramas e curva de viscosidade

As Figuras 4.1 a 4.5 representam os reogramas (tensão de cisalhamento versus taxa de deformação) e as Figuras 4.6 a 4.10 representam as curvas de viscosidade (viscosidade aparente versus taxa de deformação) obtidas em diferentes temperaturas para o suco de acerola, nas concentrações de (4,0; 7,0; 10,0; 13,0 e 16,0) °Brix. Os pontos marcados representam os pontos reais dos reogramas, enquanto que as linhas contínuas são os resultados do modelo de Herschel-Bulkley (HB).

O valor do índice de comportamento indica o grau de pseudoplasticidade de sucos de frutas, de forma que quanto mais afastado se encontra da unidade, maior a pseudoplasticidade do produto. Este comportamento pode ser visualizado nas Figuras 4.1 a 4.5, onde verifica-se que a inclinação das curvas de escoamento diminui com o aumento da taxa de deformação. Isto evidencia uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação, verificando-se um comportamento pseudoplástico para o suco de acerola em todas as faixas de temperatura e concentração, como pode ser comprovado pelas Figuras 4.6 a 4.10.

Nas Figuras 4.1 a 4.5 observa-se que para uma taxa de deformação fixa, a tensão de cisalhamento diminui a medida que aumenta a temperatura. Este efeito é mais pronunciado em temperaturas menores. Observa-se também que a tensão de cisalhamento aumenta com a concentração de sólidos solúveis, a taxa de deformação e temperatura constantes.

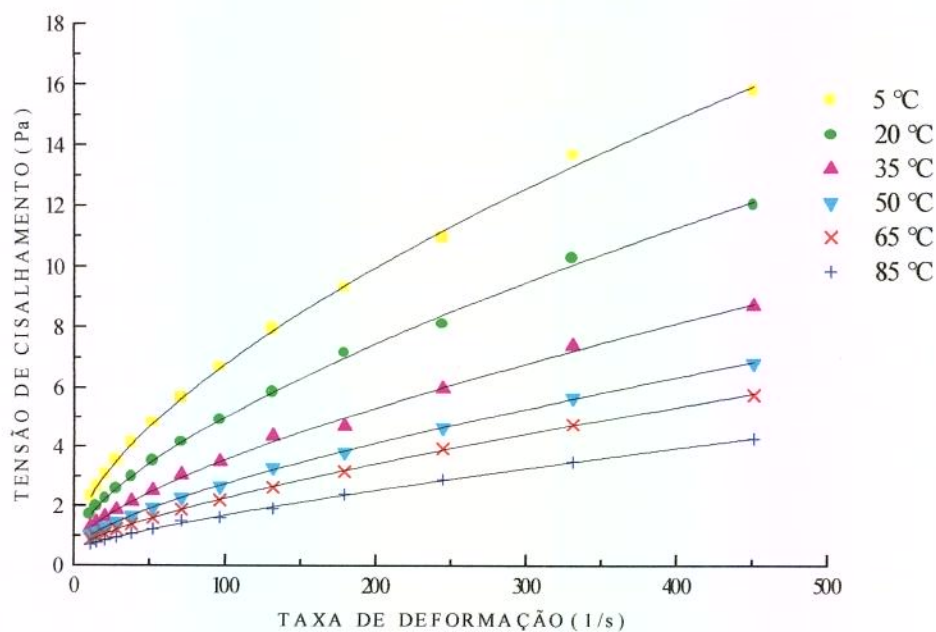


Figura 4.1. Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 4,0 °Brix.

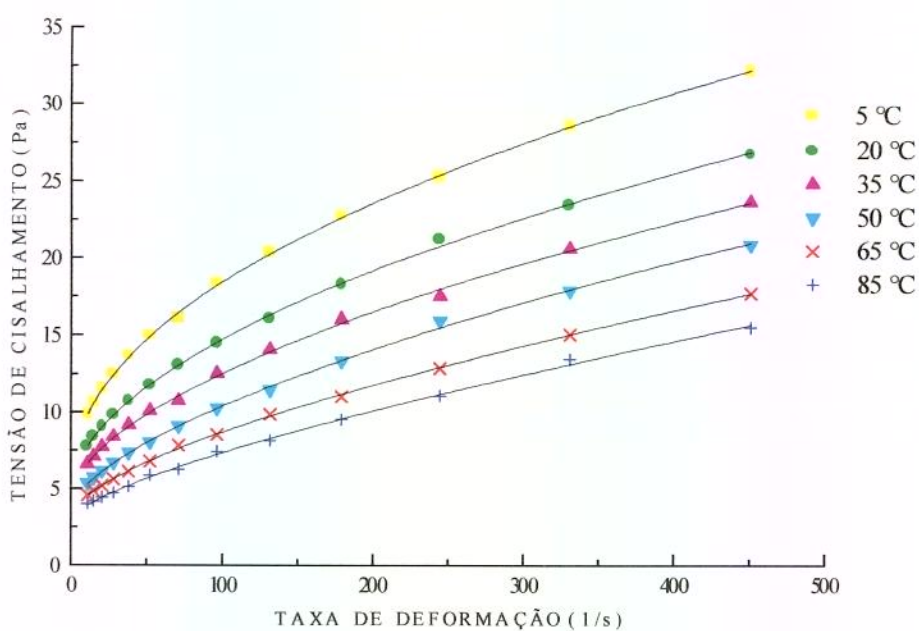


Figura 4.2. Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 7,0 °Brix.

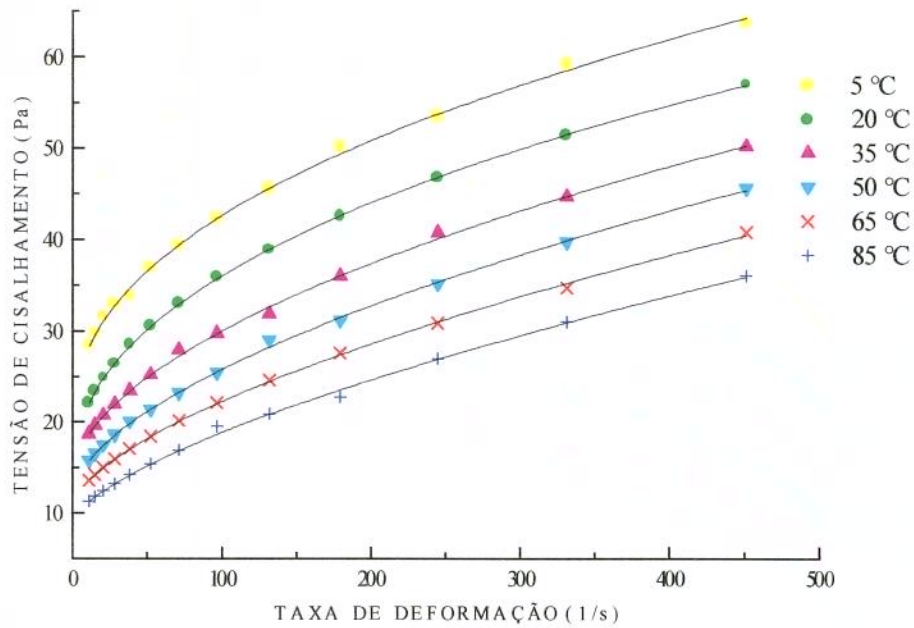


Figura 4.3. Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 10,0 °Brix.

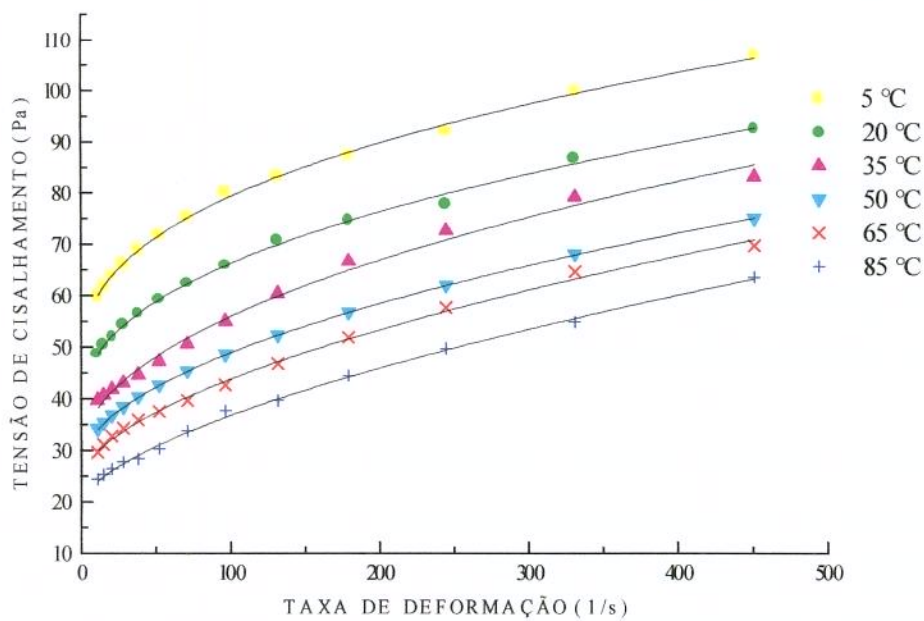


Figura 4.4. Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 13,0 °Brix.



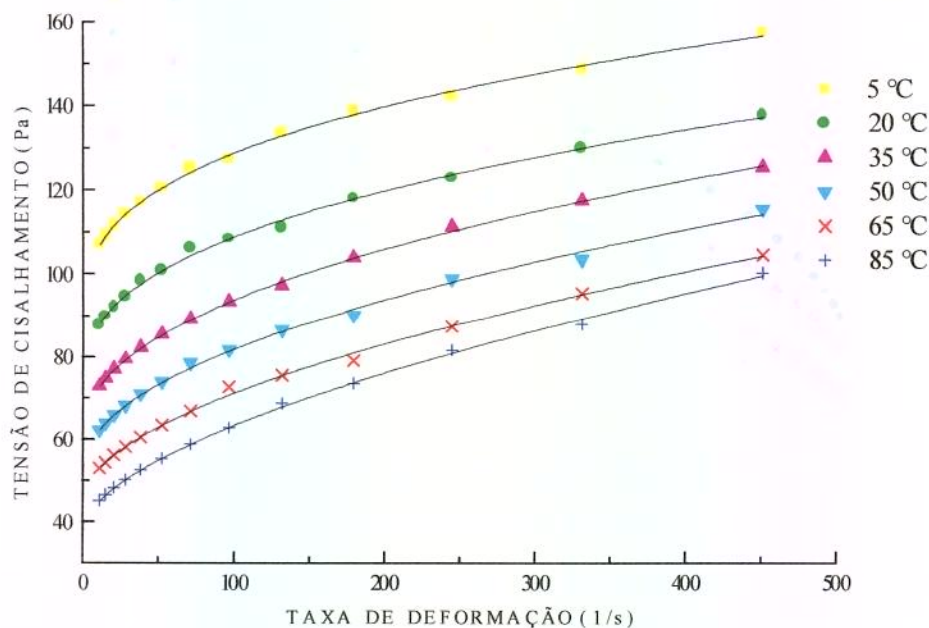


Figura 4.5. Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 16,0 °Brix.

Nas Figuras 4.6 a 4.10 observa-se que para uma taxa de deformação fixa, a viscosidade aparente diminui a medida que aumenta a temperatura. Este efeito é mais pronunciado em temperaturas menores. Observa-se também que a viscosidade aparente aumenta com a concentração de sólidos solúveis, a taxa de deformação e temperatura constantes.

Segundo Pelegri (1999), a temperatura afeta a viscosidade de sucos e polpas de frutas, já que a maioria apresenta-se na forma de sólidos dispersos em meios líquidos. Um aumento da temperatura faz com que a viscosidade da fase líquida diminua, aumentando a mobilidade das partículas em suspensão, diminuindo consequentemente, a viscosidade dos sucos e das polpas.

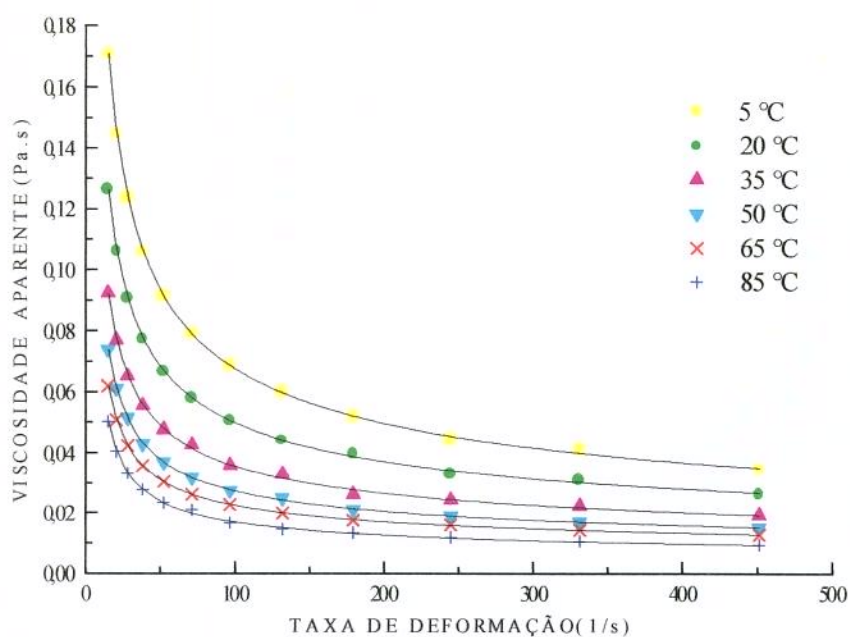


Figura 4.6. Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 4,0 °Brix, em diversas temperaturas.

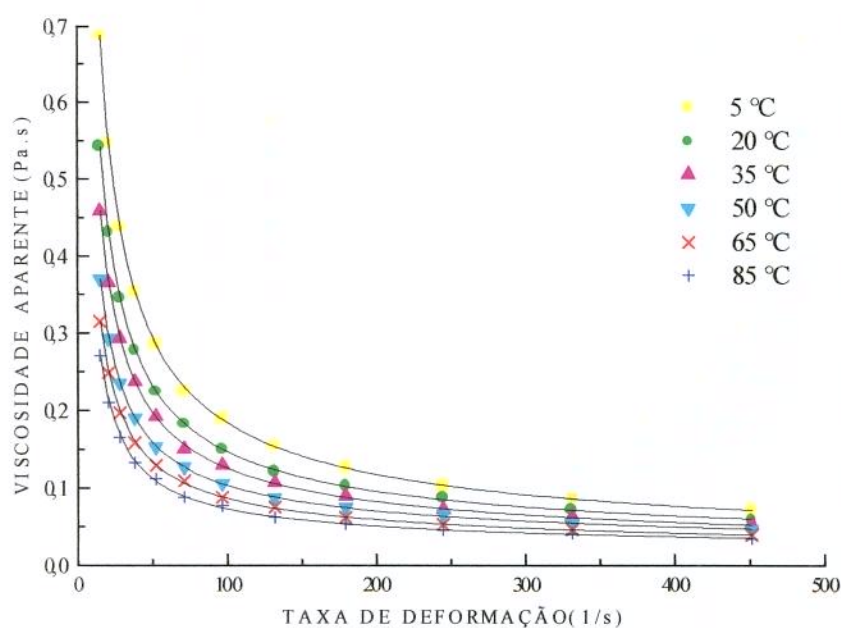


Figura 4.7. Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 7,0 °Brix, em diversas temperaturas.

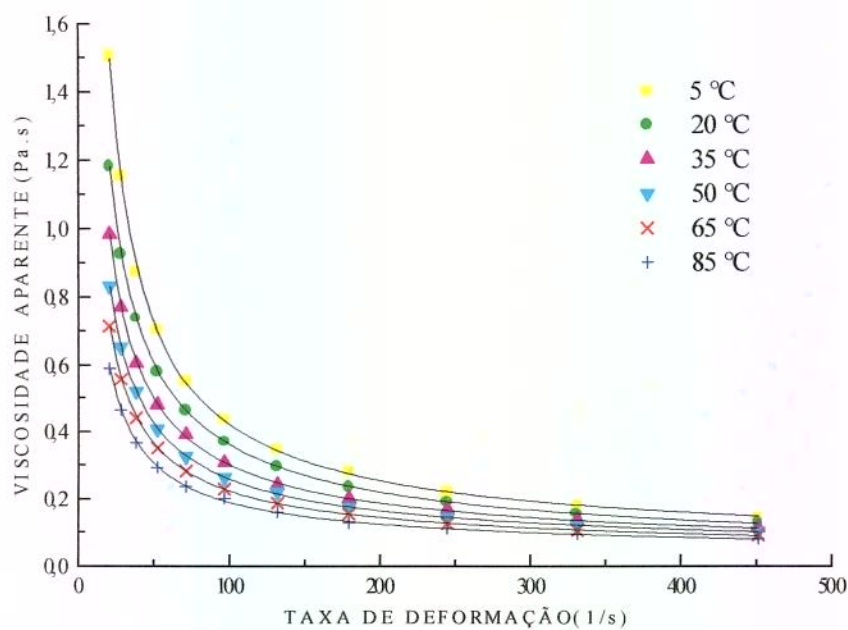


Figura 4.8. Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 10,0 °Brix, em diversas temperaturas.

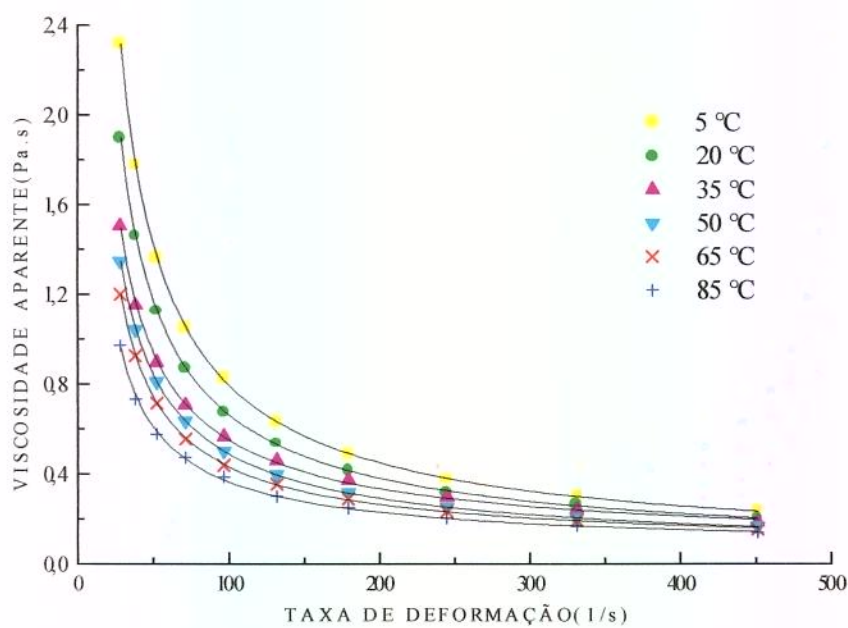


Figura 4.9. Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix, em diversas temperaturas.



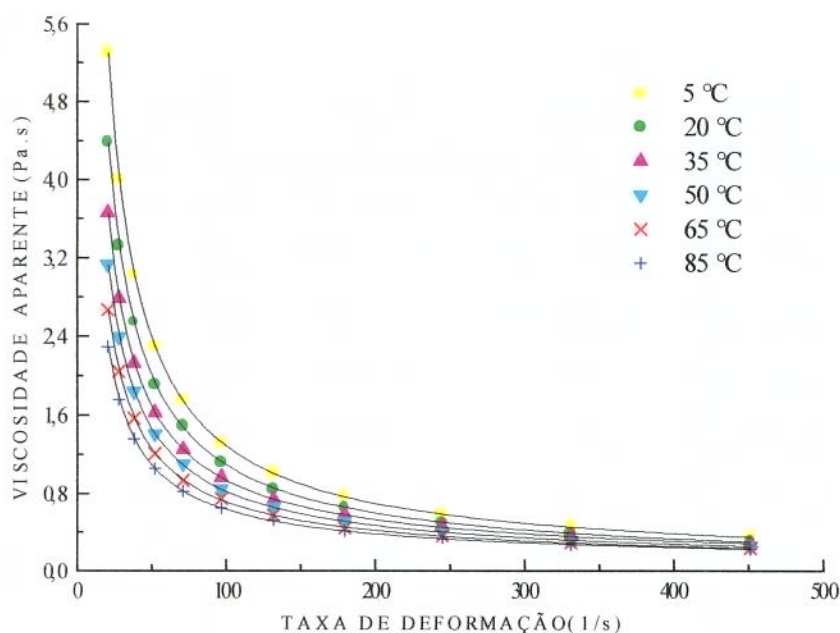


Figura 4.10. Viscosidade aparente do suco de acerola na concentração de 16,0 °Brix, em diversas temperaturas.

### 4.3. EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE OS PARÂMETROS REOLÓGICOS

#### 4.3.1. Efeito da temperatura sobre o índice de comportamento

O efeito da temperatura sobre o parâmetro reológico que representa o índice de comportamento ( $n_{hb}$ ) do modelo de Herschel-Bulkley, foi ajustado buscando-se uma dependência do tipo linear em função da temperatura, descrito pelo modelo:

$$n_{hb} = A + BT \quad (4.1)$$

onde A é o coeficiente linear, B é o coeficiente angular ( $K^{-1}$ ) e T a temperatura absoluta (K).

Tabela 4.7. Parâmetros obtidos pela modelagem da índice de comportamento ( $n_{hb}$ ) em função da temperatura do suco de acerola.

| Parâmetros                     | Conc.<br>4,0 °Brix    | Conc.<br>7,0 °Brix     | Conc.<br>10,0 °Brix    | Conc.<br>13,0 °Brix    | Conc.<br>16,0 °Brix    |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>A</b>                       | $7,6 \times 10^{-2}$  | $-37,1 \times 10^{-2}$ | $-36,3 \times 10^{-2}$ | $-43,6 \times 10^{-2}$ | $-55,0 \times 10^{-2}$ |
| <b>B (K<sup>-1</sup>)</b>      | $19,2 \times 10^{-4}$ | $30,4 \times 10^{-4}$  | $29,1 \times 10^{-4}$  | $29,9 \times 10^{-4}$  | $32,0 \times 10^{-4}$  |
| <b>erro A</b>                  | $0,9 \times 10^{-2}$  | $3,4 \times 10^{-2}$   | $3,9 \times 10^{-2}$   | $3,9 \times 10^{-2}$   | $2,6 \times 10^{-2}$   |
| <b>erro B (K<sup>-1</sup>)</b> | $0,6 \times 10^{-4}$  | $1,1 \times 10^{-4}$   | $1,2 \times 10^{-4}$   | $1,2 \times 10^{-4}$   | $0,8 \times 10^{-4}$   |
| $\chi^2$                       | $1,6 \times 10^{-5}$  | $4,9 \times 10^{-5}$   | $6,5 \times 10^{-5}$   | $6,4 \times 10^{-5}$   | $2,9 \times 10^{-5}$   |
| <b>SSR</b>                     | $0,7 \times 10^{-4}$  | $2,0 \times 10^{-4}$   | $2,6 \times 10^{-4}$   | $2,6 \times 10^{-4}$   | $1,2 \times 10^{-4}$   |
| <b>R<sup>2</sup></b>           | 0,996                 | 0,995                  | 0,993                  | 0,993                  | 0,997                  |

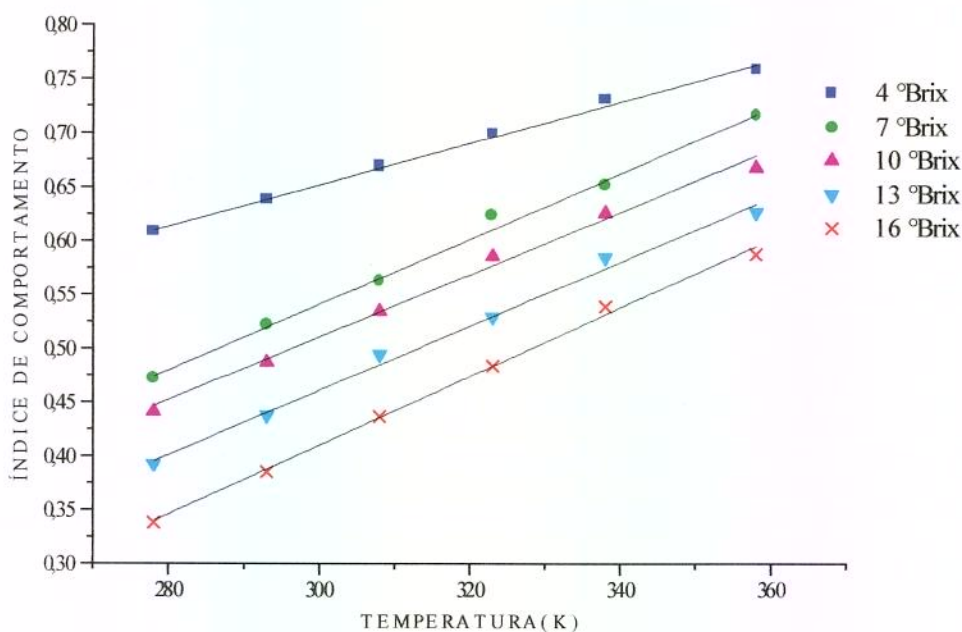


Figura 4.11. Efeito da temperatura sobre o parâmetro  $n_{hb}$  do modelo de Herschel-Bulkley, para o suco de acerola em diversas concentrações de sólidos solúveis.

Observa-se na Tabela 4.7, que a tentativa de correlacionar o índice de comportamento  $n_{hb}$ , do modelo de Herschel-Bulkley, em função da temperatura através de relação linear, descrita pelo modelo ( $n_{hb} = A + BT$ ), teve sucesso em todas as faixas de temperatura e concentração. As faixas de valores dos parâmetros de controle de ajuste ( $\chi^2$ , SSR e  $R^2$ ), estão variando de  $1,6 \times 10^{-5}$  a  $6,5 \times 10^{-5}$ , de  $0,7 \times 10^{-4}$  a  $2,6 \times 10^{-4}$ , e de 0,993 a 0,997, respectivamente.

A Figura 4.11 representa o efeito da temperatura sobre o parâmetro  $n_{hb}$  do modelo de Herschel-Bulkley, para o suco de acerola em diversas concentrações de sólidos solúveis. O índice de comportamento cresce com o aumento da temperatura a concentração constante e decresce com o aumento da concentração de sólidos solúveis a temperatura constante.

Um detalhe muito importante pode ser verificado na Tabela 4.7 e na Figura 4.11. Em baixas concentrações de sólidos solúveis, o efeito da temperatura sobre o índice de comportamento é menor, este fato pode ser melhor acompanhado pelo parâmetro B do modelo ( $n_{hb} = A+BT$ ). O parâmetro B (inclinação da reta) aumenta com o aumento da concentração de sólidos solúveis do suco de acerola. Na concentração de 4,0 °Brix este efeito é bem menos intenso do que em concentrações superiores.

A vantagem de descrever o índice de comportamento ( $n_{hb}$ ) em função da temperatura, é que essa representação é bastante conveniente, principalmente para uso em algoritmos de cálculos de processos e equipamentos.



#### 4.3.2. Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente

O efeito da temperatura nas propriedades de transporte do suco de acerola, precisa ser conhecido para o adequado entendimento e dimensionamento de equipamentos e processos, tais como pasteurização e esterilização.

Mediante um ajuste não-linear dos dados de viscosidade aparente da Tabela 4.8 à equação de Arrhenius, (eq. 2.8), determinou-se os valores de energia de ativação e do parâmetro ( $\eta_0$ ) do suco de acerola em diversas concentrações de sólidos solúveis estudadas, na faixa de temperatura de (5,0 a 85,0)°C. Os parâmetros estão relacionados na Tabela 4.8.

Como pode ser observado na Figura 4.12, a viscosidade aparente ( $\eta_a$ ), calculada a partir do modelo de Herschel-Bulkley, para a taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , aumenta com o inverso da temperatura, indicando que a viscosidade aparente diminui com o aumento da temperatura. Os dados experimentais da viscosidade aparente em função do inverso da temperatura ajustaram-se muito bem às retas praticamente paralelas, mostrando que a concentração influi muito pouco sobre a energia de ativação, visto que ela é função do coeficiente angular. Quando a concentração da amostra diminui para 4,0 °Brix, a viscosidade aparente diminui de forma muito mais intensa, indicando uma maior dependência da temperatura com a viscosidade aparente. Este fato pode ser evidenciado na Tabela 4.9, onde determina-se a razão de variação (Q) entre o maior e o menor valor da viscosidade aparente, na faixa de temperatura estudada, para cada concentração.

Para a concentração de 4,0 °Brix a razão de variação (Q) foi de 4,0 , e para as concentrações de (7,0; 10,0; 13,0 e 16,0)°Brix, foram respectivamente de 2,5; 2,3; 2,2 e 2,0. Isto indica que quanto menor a concentração, maior a razão de

variação (Q) e, por consequência, maior será a energia de ativação, como pode ser acompanhado na Tabela 4.9.

Os valores da energia de ativação, calculados para a taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , variam entre 1,781 kcal/gmol, para as amostras de suco de acerola a 16,0 °Brix, e 3,450 kcal/gmol, para as amostras a 4,0 °Brix. Existe uma clara tendência da energia de ativação diminuir com o aumento do conteúdo de sólidos solúveis nas amostras de suco de acerola. Esse comportamento foi registrado, até então, somente para suco concentrado de maracujá e para polpas de frutas (Saravacos, 1970; Holdsworth, 1971; Vitali *et al.*, 1974). De forma geral, pode-se dizer que quanto maior a energia de ativação, maior a dependência da viscosidade aparente com a temperatura.

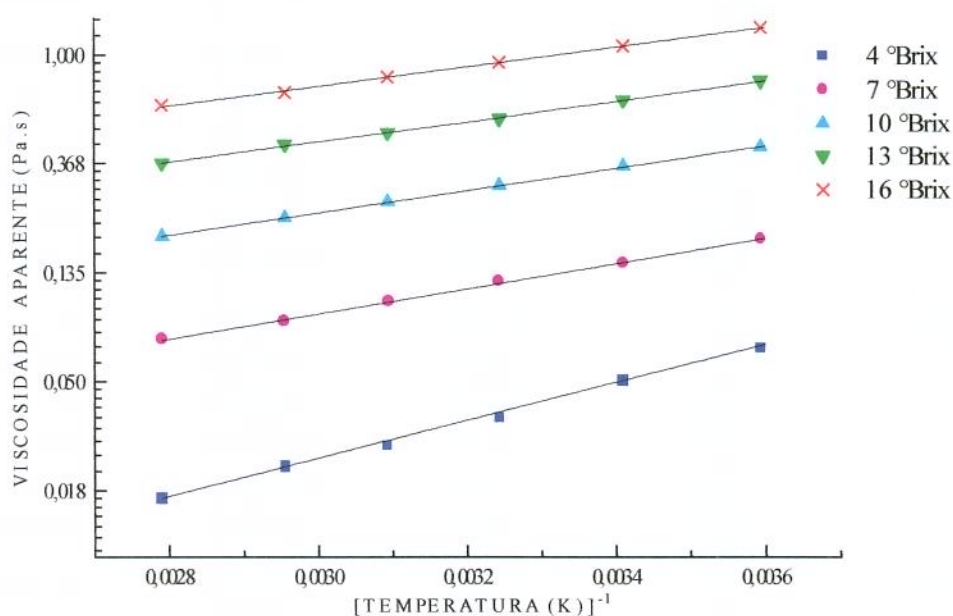


Figura 4.12. Efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente calculada na taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , segundo a equação de Arrhenius, para suco de acerola em diversas concentrações.

Tabela 4.8. Parâmetros da equação de Arrhenius obtidos da relação com a viscosidade aparente calculada em diferentes taxas de deformação e concentrações de sólidos solúveis.

| Conc. (°Brix) | $\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> ) | E <sub>at</sub> (kcal/gmol) | $\eta_0$ (Pa.s) | R <sup>2</sup> |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|
| 4,0           | 1                                 | 1,772                       | 0,04094         | 0,979          |
|               | 50                                | 3,399                       | 0,00020         | 0,997          |
|               | 100                               | 3,450                       | 0,00013         | 0,998          |
|               | 150                               | 3,432                       | 0,00011         | 0,998          |
|               | 300                               | 3,336                       | 0,00010         | 0,998          |
|               | 450                               | 3,249                       | 0,00010         | 0,997          |
| 7,0           | 1                                 | 1,851                       | 0,22899         | 0,990          |
|               | 50                                | 2,389                       | 0,00389         | 0,998          |
|               | 100                               | 2,295                       | 0,00289         | 0,999          |
|               | 150                               | 2,197                       | 0,00266         | 0,998          |
|               | 300                               | 1,962                       | 0,00263         | 0,997          |
|               | 450                               | 1,790                       | 0,00280         | 0,996          |
| 10,0          | 1                                 | 2,119                       | 0,47600         | 0,997          |
|               | 50                                | 2,177                       | 0,01423         | 1,000          |
|               | 100                               | 2,031                       | 0,01087         | 1,000          |
|               | 150                               | 1,910                       | 0,01000         | 1,000          |
|               | 300                               | 1,644                       | 0,00980         | 0,999          |
|               | 450                               | 1,459                       | 0,01031         | 0,998          |
| 13,0          | 1                                 | 2,172                       | 0,98448         | 0,987          |
|               | 50                                | 2,050                       | 0,03468         | 0,998          |
|               | 100                               | 1,882                       | 0,02616         | 0,999          |
|               | 150                               | 1,751                       | 0,02373         | 0,999          |
|               | 300                               | 1,470                       | 0,02257         | 0,998          |
|               | 450                               | 1,274                       | 0,02337         | 0,995          |
| 16,0          | 1                                 | 2,194                       | 1,80464         | 0,999          |
|               | 50                                | 1,961                       | 0,06896         | 0,999          |
|               | 100                               | 1,781                       | 0,05112         | 0,999          |
|               | 150                               | 1,643                       | 0,04565         | 0,998          |
|               | 300                               | 1,352                       | 0,04207         | 0,994          |
|               | 450                               | 1,148                       | 0,04278         | 0,988          |



Tabela 4.9. Valores da viscosidade aparente e energia de ativação na taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$  e dos parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para o suco de acerola em diversas concentrações e temperaturas.

| $E_{at}$<br>(kcal/gmol) | C<br>(°Brix) | T<br>(°C) | $K_{o,hb}$<br>(Pa) | $K_{hb}$<br>(Pa.s <sup>n</sup> ) | $n_{hb}$ | $\eta_a$<br>(Pa.s) | Q<br>( $\eta_{a,M}/\eta_{a,m}$ ) |
|-------------------------|--------------|-----------|--------------------|----------------------------------|----------|--------------------|----------------------------------|
| 3,450                   | 4,0          | 5,0       | 0,691              | 0,368                            | 0,609    | 0,068              | 4,0                              |
|                         |              | 20,0      | 0,613              | 0,232                            | 0,639    | 0,050              |                                  |
|                         |              | 35,0      | 0,578              | 0,136                            | 0,669    | 0,036              |                                  |
|                         |              | 50,0      | 0,541              | 0,088                            | 0,699    | 0,027              |                                  |
|                         |              | 65,0      | 0,503              | 0,060                            | 0,732    | 0,023              |                                  |
|                         |              | 85,0      | 0,483              | 0,036                            | 0,759    | 0,017              |                                  |
| 2,295                   | 7,0          | 5,0       | 5,105              | 1,508                            | 0,473    | 0,184              | 2,5                              |
|                         |              | 20,0      | 4,506              | 0,924                            | 0,522    | 0,147              |                                  |
|                         |              | 35,0      | 4,196              | 0,621                            | 0,563    | 0,125              |                                  |
|                         |              | 50,0      | 3,556              | 0,385                            | 0,624    | 0,104              |                                  |
|                         |              | 65,0      | 3,260              | 0,268                            | 0,652    | 0,087              |                                  |
|                         |              | 85,0      | 3,028              | 0,158                            | 0,717    | 0,073              |                                  |
| 2,031                   | 10,0         | 5,0       | 19,510             | 3,035                            | 0,441    | 0,426              | 2,3                              |
|                         |              | 20,0      | 15,634             | 2,131                            | 0,487    | 0,357              |                                  |
|                         |              | 35,0      | 13,518             | 1,407                            | 0,534    | 0,300              |                                  |
|                         |              | 50,0      | 11,908             | 0,935                            | 0,586    | 0,258              |                                  |
|                         |              | 65,0      | 10,638             | 0,650                            | 0,626    | 0,223              |                                  |
|                         |              | 85,0      | 8,950              | 0,456                            | 0,668    | 0,188              |                                  |
| 1,882                   | 13,0         | 5,0       | 45,673             | 5,504                            | 0,393    | 0,792              | 2,2                              |
|                         |              | 20,0      | 37,798             | 3,785                            | 0,437    | 0,662              |                                  |
|                         |              | 35,0      | 29,091             | 2,747                            | 0,495    | 0,559              |                                  |
|                         |              | 50,0      | 27,295             | 1,879                            | 0,529    | 0,488              |                                  |
|                         |              | 65,0      | 24,559             | 1,295                            | 0,585    | 0,437              |                                  |
|                         |              | 85,0      | 19,836             | 0,937                            | 0,627    | 0,367              |                                  |
| 1,781                   | 16,0         | 5,0       | 86,863             | 8,821                            | 0,338    | 1,286              | 2,0                              |
|                         |              | 20,0      | 72,694             | 6,099                            | 0,385    | 1,087              |                                  |
|                         |              | 35,0      | 59,568             | 4,565                            | 0,437    | 0,937              |                                  |
|                         |              | 50,0      | 51,921             | 3,207                            | 0,484    | 0,818              |                                  |
|                         |              | 65,0      | 44,799             | 2,199                            | 0,539    | 0,711              |                                  |
|                         |              | 85,0      | 37,992             | 1,682                            | 0,589    | 0,633              |                                  |

Observa-se na Tabela 4.9 que o índice de comportamento ( $n_{hb}$ ) aumenta com a temperatura a concentração constante, e diminui com o aumento da concentração a temperatura constante. Na concentração de 4,0 °Brix, o efeito da temperatura sobre o índice de comportamento é bem menor do que em concentrações superiores. A explicação deste fenômeno é que, sendo maior a energia de ativação na concentração de 4,0 °Brix, então o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente é maior, pois a viscosidade aparente é função do inverso da temperatura. Já o efeito da temperatura sobre o índice de comportamento é menor, pois o índice de comportamento é função da temperatura, conforme Figura 4.11.

A Figura 4.13 apresenta a energia de ativação, calculada pela variação da viscosidade aparente, segundo equação de Arrhenius, em função da taxa de deformação nas faixas de temperatura e concentração estudadas.

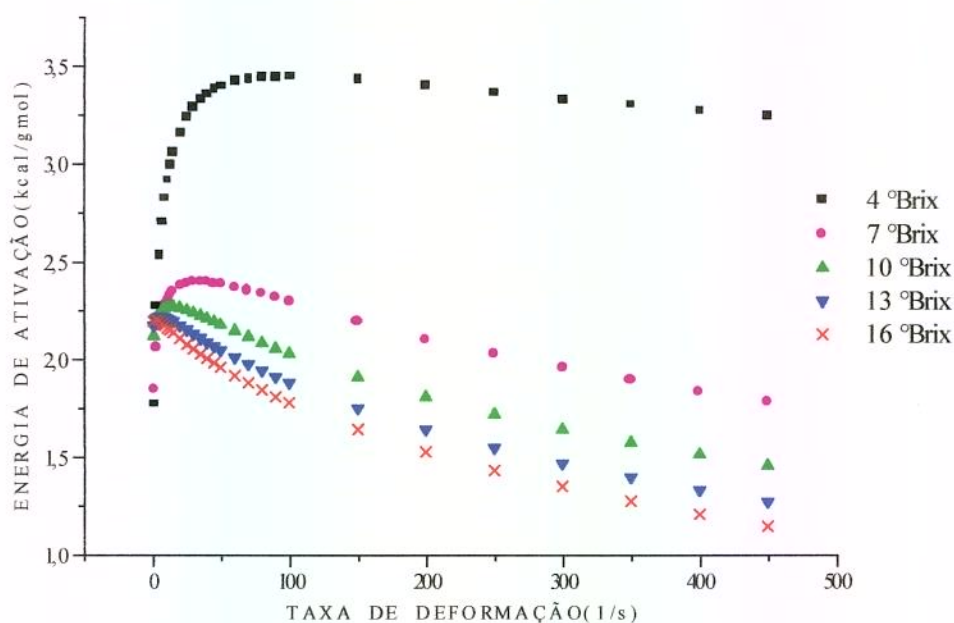


Figura 4.13. Efeito da taxa de deformação sobre a energia de ativação calculada pela variação da viscosidade aparente, segundo equação de Arrhenius, nas faixas de temperatura e concentração estudadas.

Tabela 4.10. Variação da energia de ativação em função da taxa de deformação, em diversas concentrações de sólidos solúveis.

| CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SOLÚVEIS |                      |                      |                      |                      |                                   |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 4,0 °Brix                        | 7,0 °Brix            | 10,0 °Brix           | 13,0 °Brix           | 16,0 °Brix           |                                   |
| $E_{at}$ (kcal/gmol)             | $E_{at}$ (kcal/gmol) | $E_{at}$ (kcal/gmol) | $E_{at}$ (kcal/gmol) | $E_{at}$ (kcal/gmol) | $\dot{\gamma}$ (s <sup>-1</sup> ) |
| 1,772                            | 1,851                | 2,119                | 2,172                | 2,194                | 1                                 |
| 2,274                            | 2,062                | 2,202                | 2,209                | 2,203                | 3                                 |
| 2,534                            | 2,165                | 2,236                | 2,218                | 2,196                | 5                                 |
| 2,703                            | 2,229                | 2,254                | 2,218                | 2,186                | 7                                 |
| 2,826                            | 2,273                | 2,264                | 2,215                | 2,174                | 9                                 |
| 2,919                            | 2,305                | 2,269                | 2,209                | 2,162                | 11                                |
| 2,993                            | 2,329                | 2,270                | 2,202                | 2,150                | 13                                |
| 3,053                            | 2,348                | 2,270                | 2,195                | 2,138                | 15                                |
| 3,163                            | 2,378                | 2,264                | 2,174                | 2,109                | 20                                |
| 3,237                            | 2,393                | 2,253                | 2,153                | 2,081                | 25                                |
| 3,290                            | 2,400                | 2,239                | 2,131                | 2,055                | 30                                |
| 3,329                            | 2,402                | 2,224                | 2,110                | 2,030                | 35                                |
| 3,359                            | 2,400                | 2,209                | 2,089                | 2,006                | 40                                |
| 3,381                            | 2,395                | 2,193                | 2,069                | 1,983                | 45                                |
| 3,399                            | 2,389                | 2,177                | 2,050                | 1,961                | 50                                |
| 3,423                            | 2,374                | 2,146                | 2,012                | 1,920                | 60                                |
| 3,437                            | 2,355                | 2,116                | 1,977                | 1,882                | 70                                |
| 3,445                            | 2,336                | 2,086                | 1,944                | 1,846                | 80                                |
| 3,449                            | 2,316                | 2,058                | 1,912                | 1,812                | 90                                |
| 3,450                            | 2,295                | 2,031                | 1,882                | 1,781                | 100                               |
| 3,432                            | 2,197                | 1,910                | 1,751                | 1,643                | 150                               |
| 3,402                            | 2,109                | 1,808                | 1,643                | 1,531                | 200                               |
| 3,369                            | 2,031                | 1,721                | 1,550                | 1,435                | 250                               |
| 3,336                            | 1,962                | 1,644                | 1,470                | 1,352                | 300                               |
| 3,306                            | 1,899                | 1,576                | 1,398                | 1,277                | 350                               |
| 3,277                            | 1,842                | 1,515                | 1,333                | 1,210                | 400                               |
| 3,249                            | 1,790                | 1,459                | 1,274                | 1,148                | 450                               |



Inicialmente, a energia de ativação aumenta em função da taxa de deformação, até atingir um limite máximo. A partir desse limite, a energia de ativação começa a diminuir num gradiente menor que o gradiente de aumento, em toda a faixa de concentração, conforme Tabela 4.10. Este fenômeno não foi citado em nenhuma publicação científica até o período da revisão bibliográfica apresentada neste trabalho.

Verifica-se na Tabela 4.10, que o limite superior da energia de ativação para cada concentração estudada, (4,0; 7,0; 10,0; 13,0 e 16,0) °Brix, apresenta os seguintes valores: (3,450; 2,402; 2,270; 2,270; 2,218 e 2,203) kcal/gmol, os quais correspondem às taxas de deformação de (100; 35; 15; 7 e 1)  $s^{-1}$ , respectivamente. Observa-se que na taxa de deformação de 1  $s^{-1}$ , a energia de ativação aumenta com a concentração de sólidos solúveis. A representação em amarelo corresponde ao limite superior.

#### 4.3.3. Efeito da temperatura sobre o índice de consistência

Mediante um ajuste não-linear dos dados de índice de consistência contidos na Tabela 4.9, aplicados à eq. (2.9), foram determinados os valores de energia de ativação e do parâmetro ( $C_{0,k}$ ) do suco de acerola em diversas concentrações de sólidos solúveis, na faixa de temperatura de (5,0 a 85,0) °C. Os parâmetros estão relacionados na Tabela 4.11.

Para o modelo de Herschel-Bulkley (HB), onde existe o termo tensão inicial ( $K_{0,hb}$ ), não foi buscada sua dependência com a temperatura. Isto porque esse parâmetro não foi medido diretamente pelo equipamento, sendo portanto apenas o resultado de um ajuste matemático da curva.

Como pode ser observado na Figura 4.14, o índice de consistência ( $K_{hb}$ ), calculado a partir do modelo de Herschel-Bulkley, aumenta com o inverso da

temperatura, indicando que o índice de consistência diminui com o aumento da temperatura. Para o modelo de Herschel-Bulkley, os valores dos parâmetros  $K_{0,hb}$  e  $K_{hb}$  crescem com o aumento da concentração de sólidos solúveis a temperatura constante.

Os valores da energia de ativação calculados a partir do índice de consistência ( $K_{hb}$ ), variam entre 4,063 kcal/gmol, para as amostras de suco de acerola a 16,0 °Brix, e 5,586 kcal/gmol, para as amostras a 4,0 °Brix. Existe uma clara tendência da energia de ativação diminuir com o aumento do conteúdo de sólidos solúveis nas amostras de suco de acerola. De uma forma geral, pode-se dizer que quanto maior a energia de ativação, maior a dependência do índice de consistência com a temperatura.

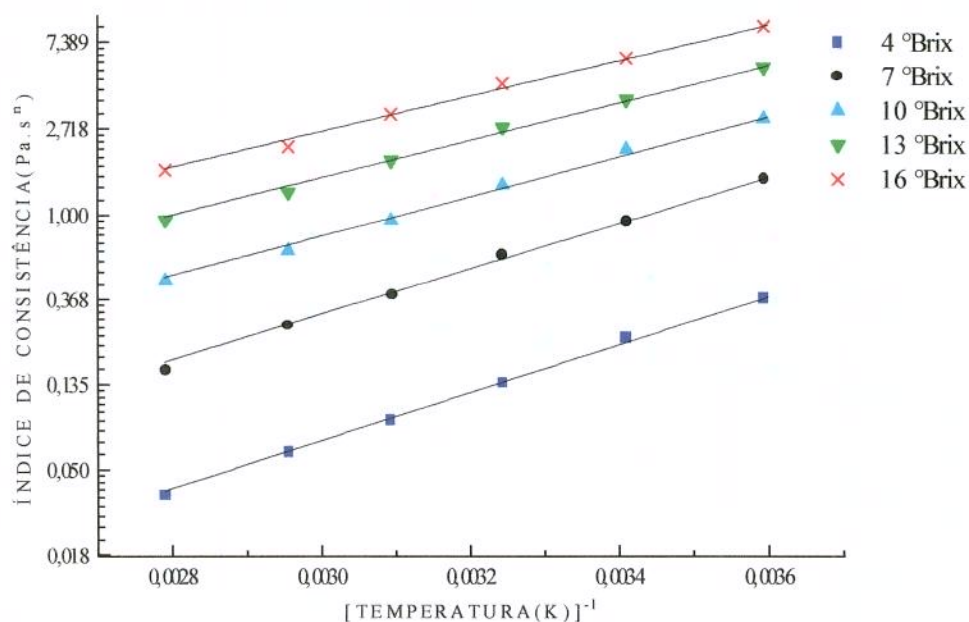


Figura 4.14. Efeito da temperatura sobre o índice de consistência calculado segundo a equação de Arrhenius, para suco de acerola em diversas concentrações.

Verifica-se nas Tabelas 4.10 e 4.11, que a energia de ativação ( $E_{at}$ ) calculada a partir do índice de consistência ( $K_{hb}$ ), é maior do que a energia de ativação calculada a partir da viscosidade aparente ( $\eta_a$ ), em todas as faixas de concentração e de taxa de deformação. Já quando se calculam os valores de energia de ativação a partir de ( $\eta_a$ ), para taxa de deformação igual a  $1 \text{ s}^{-1}$ , e a partir de ( $K_{0,hb}+K_{hb}$ ), os mesmos apresentaram-se semelhantes, conforme Tabela 4.11. Este fato é bastante razoável, pois a viscosidade aparente aplicada ao modelo de Herschel-Bulkley é representada pela equação:

$$\eta_a = \frac{K_{0,hb}}{\dot{\gamma}} + K_{hb} \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4.1)$$

onde para  $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$ , a viscosidade aparente é representada por :  $\eta_a = K_{0,hb}+K_{hb}$ .

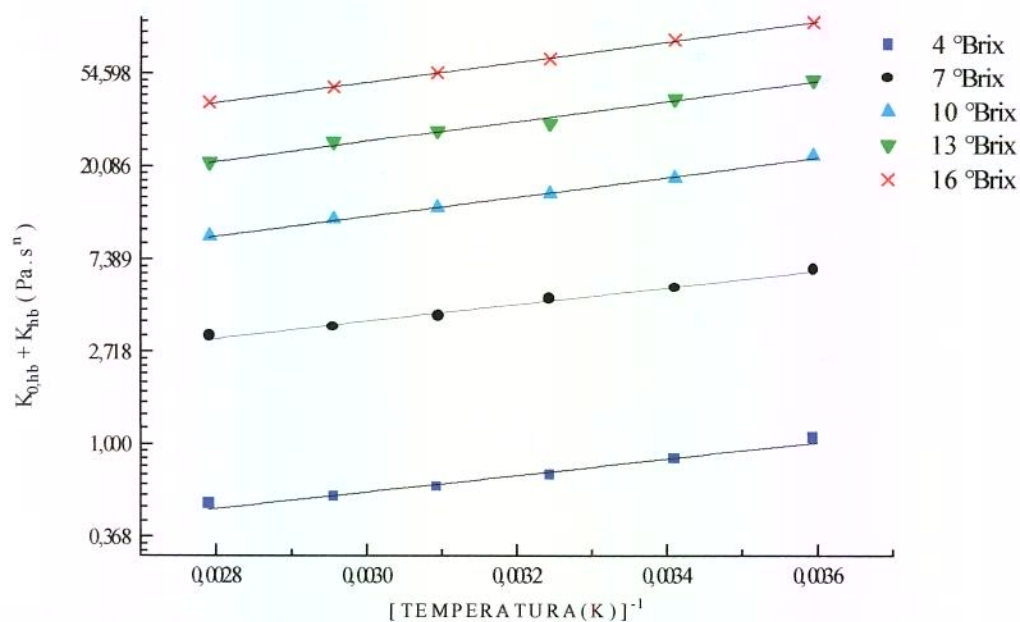


Figura 4.15. Efeito da temperatura sobre o somatório do índice de consistência e da tensão inicial, segundo equação de Arrhenius, para suco de acerola em diversas concentrações.



Tabela 4.11. Representação dos valores de energia de ativação e dos parâmetros do modelo de Arrhenius, utilizando-se as variáveis dependentes do índice de consistência e da viscosidade aparente, em diversas concentrações.

| Variável de ajuste                    | Parâmetro                       | Concentração de sólidos solúveis |                       |                       |                       |                       |
|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                       |                                 | 4,0 °Brix                        | 7,0 °Brix             | 10,0 °Brix            | 13,0 °Brix            | 16,0 °Brix            |
| $K_{hb}$                              | $E_{at}$ (kcal/gmol)            | 5,586                            | 5,322                 | 4,590                 | 4,277                 | 4,063                 |
|                                       | $C_{0,k}$ (Pa.s <sup>n</sup> )  | $2,00 \times 10^{-5}$            | $1,00 \times 10^{-4}$ | $7,60 \times 10^{-4}$ | $2,42 \times 10^{-3}$ | $5,70 \times 10^{-3}$ |
|                                       | $R^2$                           | 0,998                            | 0,999                 | 0,996                 | 0,997                 | 0,997                 |
| $\eta_a$                              | $E_{at}$ (kcal/gmol)            | 3,450                            | 2,295                 | 2,031                 | 1,882                 | 1,781                 |
|                                       | $\eta_0$ (Pa.s)                 | $1,30 \times 10^{-4}$            | $2,89 \times 10^{-3}$ | $1,09 \times 10^{-2}$ | $2,62 \times 10^{-2}$ | $5,11 \times 10^{-2}$ |
|                                       | $R^2$                           | 0,998                            | 0,999                 | 1,000                 | 0,999                 | 0,999                 |
| $K_{0,hb} + K_{hb}$                   | $E_{at}$ (kcal/gmol)            | 1,772                            | 1,842                 | 2,118                 | 2,171                 | 2,200                 |
|                                       | $C_{0,k'}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,041                            | 0,232                 | 0,477                 | 0,986                 | 1,786                 |
|                                       | $R^2$                           | 0,981                            | 0,992                 | 0,997                 | 0,987                 | 0,999                 |
| $(\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1})$ | $E_{at}$ (kcal/gmol)            | 1,772                            | 1,851                 | 2,119                 | 2,172                 | 2,194                 |
|                                       | $\eta_0$ (Pa.s)                 | 0,041                            | 0,229                 | 0,476                 | 0,985                 | 1,804                 |
|                                       | $R^2$                           | 0,979                            | 0,990                 | 0,997                 | 0,987                 | 0,999                 |

É importante ressaltar que a energia de ativação calculada pela viscosidade aparente deveria ser representada por  $E_{at,\eta}$ , e que a energia de ativação calculada pelo índice de consistência deveria ser representada por  $E_{at,k}$ , para que trabalhos publicados não apresentem confusão, o que é bastante comum.

A conclusão desse estudo é que a energia de ativação calculada através da relação de Arrhenius, tendo como variável dependente o índice de consistência, não se trata de um valor intermediário entre os extremos inferior e superior de taxa de deformação, obtidos quando a variável dependente é a viscosidade aparente.

## 4.4. EFEITO DA CONCENTRAÇÃO SOBRE OS PARÂMETROS REOLÓGICOS

### 4.4.1. Efeito da concentração sobre a viscosidade aparente

A medição da concentração em termos de teor de sólidos solúveis é fácil e rápida, e está relacionada diretamente ao teor de sólidos totais e ao teor de sólidos em suspensão (conteúdo de polpa), o que sem dúvida, afeta realmente os parâmetros do modelo HB.

O efeito da concentração nas propriedades de transporte do suco de acerola precisa ser conhecido para o adequado entendimento e dimensionamento de equipamentos e processos, tais como concentração e diluição, já que o suco concentrado de acerola é reconstituído no período de entressafra.

Em faixas limitadas de concentração e a taxa de deformação e a temperatura fixas, o efeito da concentração de sólidos na viscosidade aparente pode ser descrito alternativamente por relações do tipo exponencial ou potência. O efeito da concentração sobre o índice de consistência também pode ser descrito analogamente, por relações do tipo exponencial ou potência.

Mediante um ajuste não-linear dos dados de viscosidade aparente a uma taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , contidos na Tabela 4.9, às eqs. (2.11) e (2.12), determinou-se os valores dos parâmetros  $a_{0,p}$  e  $a_{1,p}$ , do modelo tipo potência, e os valores dos parâmetros  $a_{0,e}$  e  $a_{1,e}$ , do modelo tipo exponencial, em função da concentração de sólidos solúveis, na faixa de temperatura de (5,0 a 85,0)°C.

As Tabelas 4.12 e 4.13, mostram os resultados dos ajustes da viscosidade aparente com a concentração de sólidos solúveis, utilizando-se os modelos potencial e exponencial, respectivamente.



Tabela 4.12. Parâmetros de ajuste ao modelo potencial aplicado às curvas de viscosidade aparente, na taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , em função da concentração de sólidos solúveis.

| Temperatura<br>(°C) | $a_{0,p}$<br>(Pa.s/°Brix <sup>a1,p</sup> ) | $a_{1,p}$<br>- | $\chi^2$ | SSR    | $R^2$  |
|---------------------|--------------------------------------------|----------------|----------|--------|--------|
| 5,0                 | 0,0020                                     | 2,3311         | 0,0001   | 0,0003 | 0,9997 |
| 20,0                | 0,0015                                     | 2,3763         | 0,0000   | 0,0001 | 0,9998 |
| 35,0                | 0,0011                                     | 2,4377         | 0,0000   | 0,0001 | 0,9999 |
| 50,0                | 0,0009                                     | 2,4728         | 0,0000   | 0,0000 | 1,0000 |
| 65,0                | 0,0008                                     | 2,4629         | 0,0000   | 0,0001 | 0,9996 |
| 85,0                | 0,0005                                     | 2,6001         | 0,0000   | 0,0000 | 1,0000 |

Tabela 4.13. Parâmetros de ajuste ao modelo exponencial aplicado às curvas de viscosidade aparente, na taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , em função da concentração de sólidos solúveis.

| Temperatura<br>(°C) | $a_{0,e}$<br>(Pa.s) | $a_{1,e}$<br>(°Brix <sup>-1</sup> ) | $\chi^2$ | SSR    | $R^2$  |
|---------------------|---------------------|-------------------------------------|----------|--------|--------|
| 5,0                 | 0,0581              | 0,1948                              | 0,0034   | 0,0101 | 0,9898 |
| 20,0                | 0,0466              | 0,1981                              | 0,0026   | 0,0077 | 0,9892 |
| 35,0                | 0,0374              | 0,2025                              | 0,0018   | 0,0053 | 0,9900 |
| 50,0                | 0,0314              | 0,2049                              | 0,0015   | 0,0046 | 0,9889 |
| 65,0                | 0,0278              | 0,2041                              | 0,0016   | 0,0047 | 0,9853 |
| 85,0                | 0,0212              | 0,2133                              | 0,0008   | 0,0025 | 0,9900 |

O modelo potencial define melhor as curvas de viscosidade aparente com a concentração, pois apresenta os menores parâmetros de controle de ajuste ( $\chi^2$  e SSR) e os maiores coeficientes de determinação ( $R^2$ ), em toda a faixa de temperatura estudada. Estes resultados assemelham-se com os propostos por Vitali *et al.* (1974) para o suco concentrado de maracujá e para polpas de frutas.



Como se pode observar na Tabela 4.12, o parâmetro  $a_{0,p}$  tende a diminuir com o aumento da temperatura. O valor deste parâmetro varia desde 0,0020 Pa.s/ $^{\circ}\text{Brix}^{a_{1,p}}$ , a uma temperatura de 5,0 °C, até 0,0005 Pa.s/ $^{\circ}\text{Brix}^{a_{1,p}}$ , a 85,0 °C. Um comportamento inverso se observa no parâmetro  $a_{1,p}$ , que ainda de maneira muito modesta, aumenta com o aumento da temperatura.

Verifica-se na Tabela 4.12, que a temperatura exerce pouca influência sobre o parâmetro  $a_{1,p}$ . Esse parâmetro varia de 2,3 a 2,6 em toda a faixa de temperatura (5,0 a 85,0) °C. Isto pode ser evidenciado na Figura 4.16, na qual as retas de ajuste são praticamente paralelas, já que o coeficiente angular é  $a_{1,p}$ .

Observa-se na Figura 4.16, que a viscosidade aparente aumenta com a elevação da concentração e diminui com o aumento da temperatura.

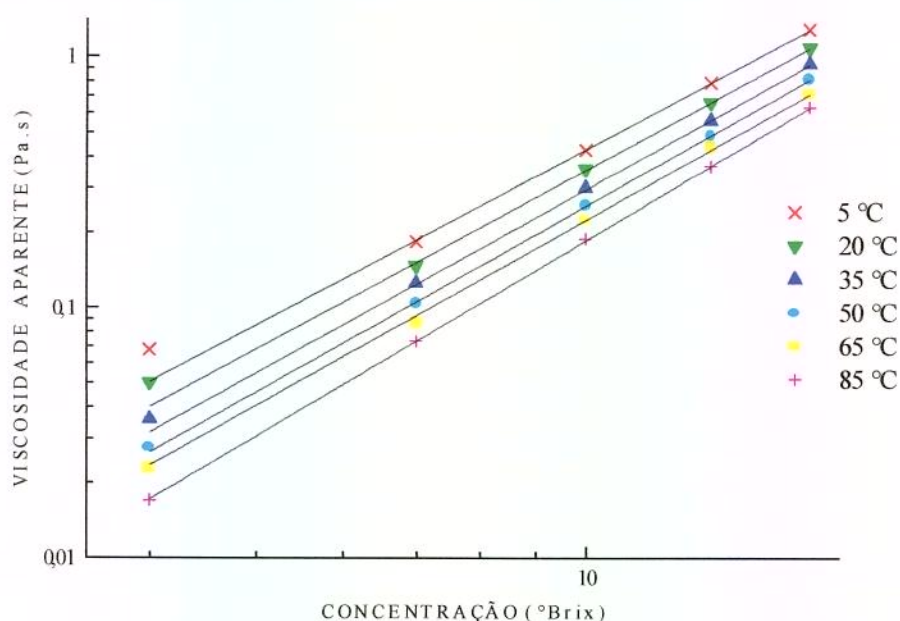


Figura 4.16. Efeito da concentração sobre a viscosidade aparente calculada à taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , segundo relação potencial, para o suco de acerola em diversas temperaturas.

#### 4.4.2. Efeito da concentração sobre o índice de consistência

Mediante um ajuste não-linear dos dados do índice de consistência, contidos na Tabela 4.9 às equações (2.13) e (2.14), determinou-se os valores dos parâmetros  $b_{0,p}$  e  $b_{1,p}$ , do modelo tipo potência, e os valores dos parâmetros  $b_{0,e}$  e  $b_{1,e}$ , do modelo tipo exponencial, em função da concentração de sólidos solúveis estudadas, na faixa de temperatura de (5,0 a 85,0)°C.

As Tabelas 4.14 e 4.15, mostram os resultados dos ajustes do índice de consistência em função da concentração de sólidos solúveis, utilizando-se os modelos do tipo potência e exponencial, respectivamente.

Tabela 4.14. Parâmetros de ajuste ao modelo potencial aplicado às curvas de índice de consistência em função da concentração de sólidos solúveis.

| Temperatura<br>(°C) | $b_{0,p}$<br>(Pa.s <sup>n</sup> / °Brix <sup>b<sub>1,p</sub></sup> ) | $b_{1,p}$<br>- | $\chi^2$ | SSR    | R <sup>2</sup> |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------|----------|--------|----------------|
| 5,0                 | 0,0182                                                               | 2,2288         | 0,0062   | 0,0187 | 0,9996         |
| 20,0                | 0,0113                                                               | 2,2704         | 0,0009   | 0,0026 | 0,9999         |
| 35,0                | 0,0049                                                               | 2,4674         | 0,0006   | 0,0017 | 0,9999         |
| 50,0                | 0,0024                                                               | 2,5952         | 0,0001   | 0,0003 | 1,0000         |
| 65,0                | 0,0018                                                               | 2,5690         | 0,0000   | 0,0001 | 1,0000         |
| 85,0                | 0,0007                                                               | 2,8079         | 0,0000   | 0,0001 | 0,9999         |

Tabela 4.15. Parâmetros de ajuste ao modelo exponencial aplicado às curvas de índice de consistência em função da concentração de sólidos solúveis.

| Temperatura<br>(°C) | $b_{0,e}$<br>(Pa.s <sup>n</sup> ) | $b_{1,e}$<br>(°Brix <sup>-1</sup> ) | $\chi^2$ | SSR    | R <sup>2</sup> |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------|--------|----------------|
| 5,0                 | 0,4392                            | 0,1888                              | 0,1820   | 0,5461 | 0,9881         |
| 20,0                | 0,2901                            | 0,1917                              | 0,1030   | 0,3091 | 0,9861         |
| 35,0                | 0,1766                            | 0,2045                              | 0,0482   | 0,1447 | 0,9887         |
| 50,0                | 0,1085                            | 0,2128                              | 0,0216   | 0,0648 | 0,9899         |
| 65,0                | 0,0764                            | 0,2112                              | 0,0105   | 0,0315 | 0,9895         |
| 85,0                | 0,0454                            | 0,2268                              | 0,0054   | 0,0160 | 0,9911         |

O modelo potencial define melhor as curvas de índice de consistência em função da concentração, pois apresenta os menores parâmetros de controle de ajuste ( $\chi^2$  e SSR) e os maiores coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), em toda a faixa de temperatura estudada. Estes resultados assemelham-se com os propostos por Rao & Coley (1983) quando utilizaram concentrados de tomate e modelaram o efeito da concentração de sólidos totais nos índices de consistência dos modelos HB e MB.

Verifica-se na Tabela 4.14, que o parâmetro  $b_{0,p}$  tende a diminuir com o aumento da temperatura. Os valores destes parâmetros oscilam desde 0,018 Pa.s<sup>n</sup>/°Brix<sup>b<sub>1,p</sub></sup>, a uma temperatura de 5,0 °C, até 0,0007 Pa.s<sup>n</sup>/°Brix<sup>b<sub>1,p</sub></sup>, a 85,0 °C. Um comportamento inverso se observa no parâmetro  $b_{1,p}$ .

Observa-se na Figura 4.17 que a viscosidade aparente aumenta com a elevação da concentração, e diminui com o aumento da temperatura.



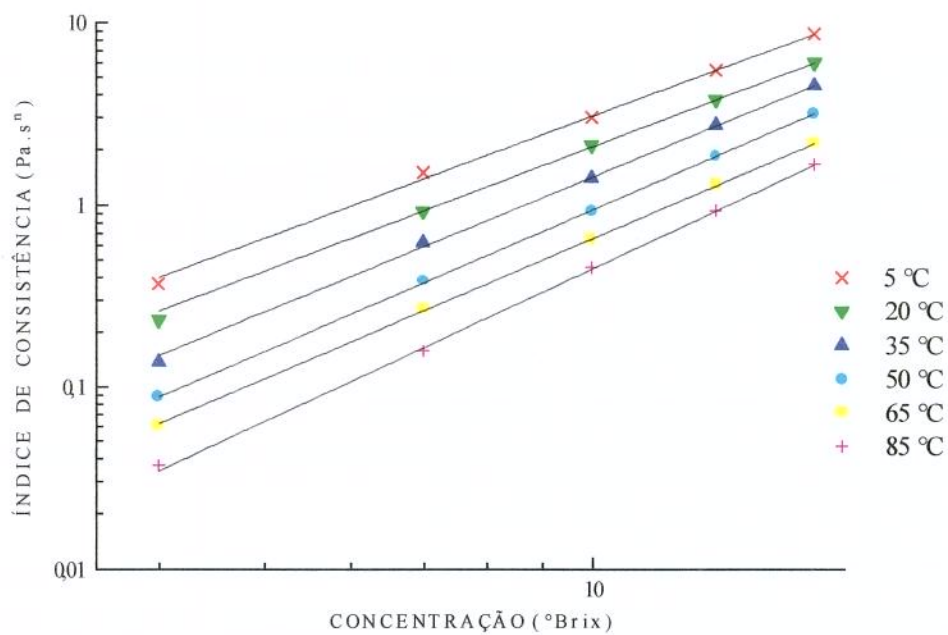


Figura 4.17. Efeito da concentração sobre o índice de consistência, segundo relação potencial, para o suco de acerola em diversas temperaturas.

## 5. CONCLUSÕES

1. O suco de acerola na concentração de sólidos solúveis de 13,0 °Brix, apresentou conteúdo de pectina de 2,05%. Este valor está 100% acima do encontrado em outros trabalhos, na mesma concentração de sólidos solúveis de suco de acerola. Neste trabalho o conteúdo de polpa e de sólidos totais também foram superiores em 14% e 20%, respectivamente.
2. Durante os experimentos preliminares, constatou-se ausência de comportamento dependente do tempo de duração da taxa de deformação.
3. O suco de acerola apresentou, em todas as faixas de temperatura e concentração estudadas, um forte comportamento não-Newtoniano com características pseudoplásticas, isto é, sua viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação.
4. O modelo de Herschel-Bulkley (HB) proporcionou os melhores parâmetros de controle de ajuste em todas as faixas de temperatura e concentração estudadas.
5. O índice de comportamento ( $n_{hb}$ ) do modelo de Herschel-Bulkley, pode ser descrito, em função da temperatura, através de uma relação do tipo ( $n_{hb} = A+BT$ ), em toda as faixas de temperatura e concentração, com o coeficiente de determinação variando de 0,993 a 0,997.
6. O índice de comportamento ( $n_{hb}$ ) aumenta com a temperatura a concentração constante, e diminui com o aumento da concentração de sólidos solúveis à temperatura constante. Em baixas concentrações de sólidos solúveis, o efeito da temperatura sobre o índice de comportamento é menor.

7. A viscosidade aparente e o índice de consistência foram correlacionados satisfatoriamente, em função da temperatura, mediante equação de Arrhenius, e em função da concentração através de modelo potencial.
8. Os valores da energia de ativação, calculados para a taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , variam entre 1,781 kcal/gmol, para as amostras de suco de acerola a 16,0 °Brix, e 3,450 kcal/gmol, para as amostras a 4,0 °Brix. Existe uma clara tendência da energia de ativação diminuir com o aumento da concentração de sólidos solúveis nas amostras de suco de acerola.
9. A energia de ativação aumenta em função da taxa de deformação, até atingir um limite máximo. A partir desse limite, a energia de ativação começa a diminuir num gradiente menor que o gradiente de aumento, em toda a faixa de concentração.
10. A energia de ativação aumenta com a concentração de sólidos solúveis, somente na taxa de deformação igual a  $1 \text{ s}^{-1}$ . A partir da taxa de deformação de  $9 \text{ s}^{-1}$ , a energia de ativação diminui com o aumento da concentração de sólidos solúveis.
11. A energia de ativação calculada através da relação de Arrhenius, tendo como variável dependente o índice de consistência ( $K_{hb}$ ), não se trata de um valor intermediário entre os extremos inferior e superior da energia de ativação quando a variável dependente for a viscosidade aparente, em toda a faixa de taxa de deformação.



## 6. SUGESTÕES

1. A literatura relata em sua grande maioria comportamento reológico de sucos e polpas de frutas apenas com relação ao conteúdo de sólidos solúveis expresso em °Brix , e sólidos totais. Apenas recentemente começaram surgir idéias de referir-se também ao conteúdo de pectina. No entanto, talvez seja importante ir além desses parâmetros e referir-se também ao conteúdo de polpa e densidade.
2. Estudar o efeito da concentração e temperatura sobre os parâmetros reológico dos modelos de Mizrahi & Berk e Casson.
3. Determinar a variação da viscosidade aparente e do índice de consistência com as variáveis experimentais temperatura e concentração, combinadas.
4. Estender o presente estudo a concentrações superiores a 16,0 °Brix.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, J.D.; ROMERO, C.H. Physical properties of fruits I – II. Density and viscosity of juices as functions of soluble solids content and temperature. **Latin American Applied Research**, v.19, p.15-21, 1989.
- ALVES, R.E.; MENEZES, J.B. Colheita e pós-colheita da acerola. In: SÃO JOSÉ, A.B.; ALVES, R.E. **Acerola no Brasil: produção e mercado**. Vitória da Conquista: 1995. p.77-89.
- ANDRADE, J.S. **Curvas de maturação e características nutricionais do camu-camu (*Myciaria dubia*), cultivado em terra firme da Amazônia Central Brasileira**: Campinas, 1991. 177p. Tese (Doutor em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- A.O.A.C. (Associaton of Official Analytical Chemists). **Official Methods of Analysis**; Edited by Sidney Williams. 14.ed. Arlington, 1984. 1141p.
- ARAÚJO, P.S.R.; MINAMI, K. **Acerola**. Campinas: Fundação Cargill, 1994. 81p.
- ASENJO, C.F. Acerola. In: NAGY, S. & SHAW, P. E. **Tropical and subtropical fruits- composition, properties and uses**. Westport: AVI, 1980. p.341-374.
- BARNES, H.A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, K. **An Introduction to Rheology**. New York: Elsevier Science Publishers, 1989. v.3.

- BEZERRA, J.R.M.V. **Estudo reológico do suco de manga – Efeito dos sólidos insolúveis**. Campinas, 1997. 81p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E.N. **Transport Phenomena**. New York: John Wiley & Sons, 1960. 780p.
- BLISKA, F.M.M.; LEITE, R.S.S.F. Aspectos econômicos e de mercado. In: SÃO JOSÉ, A.B.; ALVES, R.E. **Acerola no Brasil: produção e mercado**. Vitória da Conquista: 1995. p.107-123.
- BOGER, D.V.; TIU, C. Rheological properties of food products and their use in the design of flow systems. **Food Technology in Australia**, Clayton, v.26, n.8, p.325-335, 1974.
- BRANCO, I.G. **Suco de laranja concentrado – comportamento reológico a baixas temperaturas**. Campinas, 1995. 91p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas.
- CASTALDO, D.; PALMIERI, L.; LO VOI, A.; COSTABILE, P. Flow properties of babaco (*Carica Pentagona*) purees and concentrates. **Journal of Texture Studies**, Parma, v.21, p.253-264, 1990.
- CERVONE, N.W.; HARPER, J.M. Viscosity of an intermediate moisture dough. **Journal of Food Processing Engineering**, Colorado, v.2, n.1, p.83-95, 1978.
- CHARM, S.E. Viscometry of non-Newtonian food materials. **Food Research**, Chicago, v.25, n.3, p.351-362, 1960.



- CHARM, S.E. The direct determination of shear stress – shear rate behavior of foods in the presence of a yield stress. **Journal of Food Science**, Massachusetts, v.28, n.1, p.107-117, 1963.
- COMPANHIA DE CÍTRICOS DO BRASIL S.A. Comunicação pessoal, Salvador, 1999.
- FEITOSA, T.; MUNIZ, C.R.; BASTOS, M.S.R.; OLIVEIRA, M.E.B.; OLIVEIRA, S. Perfil microbiológico de frutas produzidas e comercializadas no estado do Ceará e Rio Grande do Norte. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, 15., 1996, Poços de Caldas. **Anais**.
- FERNANDEZ-MARTIN, F. Influence of temperature and composition on some physical properties of milk and milk concentrates. **Journal of Dairy Research**, v.39, p.75-82, 1972.
- FITTING, K.O.; MILLER, C.D. Variation in the ascorbic acid content of individuals fruits of the acerola. **Hawaii Farm Science**, v.7, n.2, p.7-15, 1958.
- HARPER, J.C.; EL SAHRIGI, A.F. Viscometric behavior of tomato concentrates. **Journal of Food Science**, v.30, n.3, p.470-476, 1965.
- HOLDSWORTH, S.D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behavior of fluid food products. **Journal of Texture Studies**, Dordrecht, v.2, n.4, p.393-418, 1971.
- HOLDSWORTH, S.D. Rheological models used for the prediction of the flow properties of food products: a literature review. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v.71, part C, p.139-179, sept., 1993.

- IBARZ, A.; PAGÁN, J. Rheology of Raspberry Juices. **Journal of Food Engineering**, v.6, p.269-289, 1987.
- IBARZ, A.; GONZALEZ, C.; ESPLUGAS, S.; VICENTE, M. Rheology of clarified fruit juices. **Journal of Food Engineering**, v.15, n.1, p.49-61, 1992.
- IBARZ, A.; GONÇALVES, C.; EXPLUGAS, S. Rheology of clarified passion fruit juices. **Fruit Processing**, v.6, n.8, p.330-333, 1996.
- INTERNATIONAL BOARD PLANT GENETIC RESOURCES. *Malpighia emarginata* (Acerola). In: **Genetic resources of tropical and subtropical fruits and nut**. Roma: 1986. p.52-54.
- KHALIL, K.E.; RAMAKRISHNA, P.; NANJUNDASWAMY, A.M.; PATWARDHAN, M.V. Rheological Behaviour of Clarified Banana Juice: Effect of Temperature and Concentration. **Journal of Food Engineering**, v.10, n.3, 1989.
- LEDIN, R.B. The Barbados or West Indian Cherry. **Florida Agricultural Experiment Station**. Bulletin n.594, p.1-27, 1958.
- LOPES, A.A. **Complete course in canning**. Baltimore, 10<sup>th</sup> edition. 1975.
- MATSUURA, F.C.A.U. **Processamento e caracterização de suco integral e concentrado congelado de acerola**. Campinas, 1994. 141p. Dissertação (Mestre em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas.
- MIZRAHI, S. & BERK, Z. Flow behaviour of concentrated orange juice: mathematical treatment. **Journal of Food Textures Studies**, v.3, p.69-79, 1972.

- MUSSER, R.S. Situação atual e perspectivas da acerola. In: SÃO JOSÉ, A.B.; ALVES, R.E. **Acerola no Brasil: produção e mercado**. Vitória da Conquista: 1995. p.4-6.
- NAGY, S.; CHEN, C.S.; SHAW, P.E. **Fruit juice processing technology**. Flórida: Agscience, 1993. 713p.
- OLIVA, P.B. **Estudo do armazenamento da acerola *in natura* e estabilidade do néctar de acerola**. Campinas, 1995. 103p. Dissertação (Mestre em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas.
- OLIVEIRA, J.R.P.; FILHO, W.S.S. Acerola: conservação, caracterização e seleção de germoplasma pelo CNPMF-EMBRAPA. In: SÃO JOSÉ, A.B.; ALVES, R.E. **Acerola no Brasil: produção e mercado**. Vitória da Conquista: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 1995. p.22-27.
- OLIVEIRA, R.P.S. **Determinação de propriedades físicas e de transporte de suco de acerola**. Campinas, 1997. 148p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- ONOFRE, P.M. **Redução da viscosidade em suco de laranja com tratamento enzimático**. Campinas, 1995. 71p. Dissertação (Mestre em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- PEARSON, D. **The chemical analysis of foods**. 5.ed., London: J. & A. Churchill, 1970. 452p.



- PELEGRINE, D. H. **Comportamento Reológico das polpas de manga e abacaxi**. Campinas, 1999. 114p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- RAO, M.A. Measurement of flow properties of food suspensions with a mixer. **Journal of Texture Studies**, v.6, n.4, p.533-539, 1975.
- RAO, M.A. Rheology of liquid foods – a review. **Journal of Texture Studies**, New York, v.8, n.2, p.135-168, 1977a.
- RAO, M.A. Measurement of flow properties of fluid foods – developments, limitations, and interpretation of phenomena. **Journal of Texture Studies**, New York, v.8, n.3, p.257-282, 1977b.
- RAO, M.A.; BOURNE, M.C.; COOLEY, H.J. Flow properties of tomato concentrates. **Journal of Texture Studies**, New York, v.12, n.4, p.521-538, 1981.
- RAO, M.A.; ANANTHESWARAN, R.C. Rheology of fluids in food processing. **Food Technology**, New York, v.36, n.2, p.116-126, 1982.
- RAO, M.A.; COOLEY, H.J. Applicability of flow models with yield for tomato concentrates. **Journal of Food Process Engineering**, New York, v.6, n.3, p.159-173, 1983.
- RAO, M.A.; COOLEY, H.J.; VITALI, A.A. Flow properties of concentrated juices at low temperatures. **Food Technology**, New York, v.38, n.3, p.113-119, 1984.

- RAO, M.A. Rheological properties of fluid foods. In: RAO, M.A.; RIZVI, S.S.H. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker, 1986. cap 1: p.1-47.
- RAO, M.A. & RIZVI, S.S. **Engineering Properties of Foods**, New York, Marcel Dekker, 1986.
- SANCHES-NIEVA, F. Extraction, processing, canning and keeping quality of acerola juice. **Journal of Agricultural of the University of Puerto Rico**, v.39, n.4, p.175-183, 1955.
- SARAVACOS, G.D. Tube viscometry of fruit purees and juices. **Food Technology**, Chicago, v.22, n.12, p.1585-1588, 1968.
- SARAVACOS, G.D. Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. **Journal of Food Science**, New York, v.35, n.2, p.122-125, 1970.
- SCHRAMM, G. **A practical approach to rheology and rheometry**. Karlsruhe: Gebrueder Haake Gmbh, 1994, 289p.
- SMITH, R.E. Effect of Gap Errors in Rotational Concentric Cylinder Viscometers. **Journal of Rheology**, v.28, n.2, p.155-160, 1984.
- STEFFE, J.F. **Rheological Methods in Food Process Engineering**. East Lansing: Freeman Press, 1992. 226p.
- VITALI, A.A.; ROIG, S.M.; RAO, M.A. Viscosity behavior of concentrated passion fruit juice. **Confructa**, Campinas, v.19, n.5, p.201-206, 1974.

- VITALI, A.A. **Comportamento reológico do purê de goiaba (*Psidium guajava* L.) em função da concentração e temperatura.** São Paulo, 1981. 151p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Universidade de São Paulo.
- VITALI, A.A.; RAO, M.A. Flow behavior of guava puree as a function of temperature and concentration. **Journal of Texture Studies**, v.13, n.3, p.275-289, 1982.
- VITALI, A.A.; RAO, M.A. Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: serum viscosity and effect of pulp content. **Journal of Food Science**, New York, v.49, n.3, p.876-881, 1984a.
- VITALI, A.A.; RAO, M.A. Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration. **Journal of Food Science**, New York, v.49, n.3, p.882-888, 1984b.
- WILKINSON, M.A. **Non-Newtonian Fluids: fluid mechanics, mixing and heat transfer.** New York: Pergamon Press, 1960. v.1.



## **APÊNDICE**

Tabela A.1. Resultado da média aritmética dos valores experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o suco de acerola na concentração de 4,0 °Brix.

| Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |                             |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|
| $\tau$ (Pa)     | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\gamma$ (s <sup>-1</sup> ) |
| 2,301           | 1,710            | 1,265            | 1,025            | 0,866            | 0,712            | 11,35                       |
| 2,637           | 1,946            | 1,423            | 1,139            | 0,955            | 0,773            | 15,43                       |
| 3,041           | 2,236            | 1,618            | 1,282            | 1,068            | 0,850            | 21,04                       |
| 3,522           | 2,582            | 1,854            | 1,466            | 1,206            | 0,947            | 28,53                       |
| 4,105           | 3,004            | 2,145            | 1,661            | 1,380            | 1,069            | 38,73                       |
| 4,811           | 3,520            | 2,503            | 1,940            | 1,598            | 1,223            | 52,67                       |
| 5,662           | 4,148            | 3,044            | 2,273            | 1,871            | 1,496            | 71,65                       |
| 6,686           | 4,909            | 3,483            | 2,657            | 2,210            | 1,608            | 97,34                       |
| 7,924           | 5,837            | 4,346            | 3,291            | 2,636            | 1,907            | 132,33                      |
| 9,314           | 7,159            | 4,695            | 3,804            | 3,168            | 2,394            | 179,84                      |
| 10,934          | 8,101            | 5,970            | 4,655            | 3,942            | 2,895            | 245,29                      |
| 13,669          | 10,292           | 7,378            | 5,670            | 4,762            | 3,484            | 331,79                      |
| 15,776          | 12,032           | 8,693            | 6,828            | 5,757            | 4,261            | 451,85                      |

Tabela A.2. Resultado da média aritmética dos valores experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o suco de acerola na concentração de 7,0 °Brix.

| Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |                             |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|
| $\tau$ (Pa)     | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\gamma$ (s <sup>-1</sup> ) |
| 9,841           | 7,802            | 6,588            | 5,338            | 4,566            | 3,991            | 11,35                       |
| 10,603          | 8,371            | 7,067            | 5,705            | 4,861            | 4,167            | 15,43                       |
| 11,496          | 9,045            | 7,681            | 6,154            | 5,215            | 4,415            | 21,04                       |
| 12,494          | 9,822            | 8,344            | 6,689            | 5,603            | 4,710            | 28,53                       |
| 13,659          | 10,735           | 9,154            | 7,338            | 6,123            | 5,122            | 38,73                       |
| 15,001          | 11,813           | 10,067           | 8,029            | 6,775            | 5,870            | 52,67                       |
| 16,062          | 13,079           | 10,720           | 9,088            | 7,809            | 6,258            | 71,65                       |
| 18,348          | 14,558           | 12,519           | 10,245           | 8,530            | 7,424            | 97,34                       |
| 20,403          | 16,046           | 14,067           | 11,449           | 9,872            | 8,132            | 132,33                      |
| 22,764          | 18,333           | 16,009           | 13,348           | 11,024           | 9,529            | 179,84                      |
| 25,311          | 21,254           | 17,529           | 15,932           | 12,904           | 11,080           | 245,29                      |
| 28,596          | 23,515           | 20,656           | 17,889           | 15,070           | 13,483           | 331,79                      |
| 32,222          | 26,826           | 23,686           | 20,928           | 17,734           | 15,528           | 451,85                      |

Tabela A.3. Resultado da média aritmética dos valores experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o suco de acerola na concentração de 10,0 °Brix.

| Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |                             |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|
| $\tau$ (Pa)     | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\gamma$ (s <sup>-1</sup> ) |
| 28,465          | 22,007           | 18,658           | 15,744           | 13,581           | 11,216           | 11,35                       |
| 29,735          | 23,48            | 19,58            | 16,503           | 14,213           | 11,745           | 15,43                       |
| 31,601          | 24,872           | 20,669           | 17,466           | 14,999           | 12,401           | 21,04                       |
| 32,855          | 26,415           | 21,933           | 18,573           | 15,924           | 13,192           | 28,53                       |
| 33,736          | 28,579           | 23,426           | 20,049           | 17,056           | 14,166           | 38,73                       |
| 36,901          | 30,498           | 25,191           | 21,373           | 18,444           | 15,368           | 52,67                       |
| 39,406          | 33,011           | 27,883           | 23,223           | 20,121           | 16,846           | 71,65                       |
| 42,244          | 35,877           | 29,728           | 25,423           | 22,155           | 19,452           | 97,34                       |
| 45,495          | 38,932           | 31,818           | 29,034           | 24,626           | 20,873           | 132,33                      |
| 50,219          | 42,536           | 36,014           | 31,189           | 27,618           | 22,797           | 179,84                      |
| 53,517          | 46,786           | 40,771           | 35,176           | 30,893           | 26,984           | 245,29                      |
| 59,319          | 51,545           | 44,717           | 39,776           | 34,734           | 31,029           | 331,79                      |
| 63,922          | 57,234           | 50,312           | 45,718           | 40,908           | 36,099           | 451,85                      |

Tabela A.4. Resultado da média aritmética dos valores experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o suco de acerola na concentração de 13,0 °Brix.

| Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |                             |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|
| $\tau$ (Pa)     | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\gamma$ (s <sup>-1</sup> ) |
| 59,854          | 48,715           | 39,606           | 34,117           | 29,643           | 24,294           | 11,35                       |
| 61,700          | 50,294           | 40,590           | 35,324           | 31,119           | 25,210           | 15,43                       |
| 63,805          | 52,118           | 41,697           | 36,721           | 32,718           | 26,333           | 21,04                       |
| 66,138          | 54,168           | 42,927           | 38,368           | 34,194           | 27,669           | 28,53                       |
| 68,779          | 56,518           | 44,526           | 40,303           | 35,793           | 28,294           | 38,73                       |
| 71,777          | 59,222           | 47,109           | 42,591           | 37,515           | 30,276           | 52,67                       |
| 75,165          | 62,317           | 50,430           | 45,314           | 39,606           | 33,681           | 71,65                       |
| 80,171          | 65,843           | 54,858           | 48,484           | 42,558           | 37,586           | 97,34                       |
| 83,276          | 70,883           | 60,270           | 52,242           | 46,740           | 39,566           | 132,33                      |
| 87,270          | 74,499           | 66,543           | 56,658           | 51,906           | 44,391           | 179,84                      |
| 92,076          | 77,844           | 72,570           | 61,914           | 57,564           | 49,642           | 245,29                      |
| 99,765          | 86,790           | 79,089           | 68,047           | 64,575           | 54,834           | 331,79                      |
| 106,788         | 92,689           | 83,148           | 75,007           | 69,741           | 63,505           | 451,85                      |



Tabela A.5. Resultado da média aritmética dos valores experimentais da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para o suco de acerola na concentração de 16,0 °Brix.

| Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |                             |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------------|
| $\tau$ (Pa)     | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\tau$ (Pa)      | $\gamma$ (s <sup>-1</sup> ) |
| 106,863         | 87,963           | 72,784           | 62,103           | 52,835           | 45,035           | 11,35                       |
| 109,046         | 89,943           | 74,681           | 63,805           | 54,321           | 46,417           | 15,43                       |
| 111,492         | 92,198           | 76,868           | 65,804           | 56,069           | 48,089           | 21,04                       |
| 114,156         | 94,692           | 79,327           | 68,085           | 58,108           | 50,057           | 28,53                       |
| 117,120         | 98,510           | 82,151           | 70,942           | 60,524           | 52,419           | 38,73                       |
| 120,425         | 100,703          | 85,391           | 73,846           | 63,386           | 55,264           | 52,67                       |
| 125,095         | 106,304          | 89,105           | 78,457           | 66,769           | 58,674           | 71,65                       |
| 127,148         | 108,342          | 93,334           | 81,636           | 72,752           | 62,741           | 97,34                       |
| 133,651         | 110,902          | 97,179           | 86,499           | 75,458           | 68,620           | 132,33                      |
| 138,641         | 118,032          | 103,714          | 90,145           | 79,007           | 73,457           | 179,84                      |
| 142,242         | 122,883          | 111,126          | 98,786           | 87,343           | 81,536           | 245,29                      |
| 148,586         | 129,706          | 117,257          | 103,362          | 95,261           | 87,780           | 331,79                      |
| 157,235         | 137,677          | 125,162          | 115,203          | 104,448          | 100,096          | 451,85                      |

Tabela A.6. Parâmetros do modelo da Lei de Potência (LP) para suco de acerola na concentração de 4,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|-----------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>K<sub>lp</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 0,549         | 0,379          | 0,269          | 0,206          | 0,162          | 0,137          |
| <b>n<sub>lp</sub></b>                         | 0,549         | 0,564          | 0,567          | 0,570          | 0,580          | 0,557          |
| <b>erro K<sub>lp</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 0,025         | 0,021          | 0,020          | 0,014          | 0,013          | 0,015          |
| <b>erro n<sub>lp</sub></b>                    | 0,008         | 0,010          | 0,014          | 0,013          | 0,015          | 0,019          |
| <b><math>\chi^2</math></b>                    | 0,037         | 0,031          | 0,028          | 0,015          | 0,014          | 0,013          |
| <b>SSR</b>                                    | 0,402         | 0,341          | 0,309          | 0,163          | 0,153          | 0,147          |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,998         | 0,997          | 0,995          | 0,996          | 0,995          | 0,990          |

Tabela A.7. Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola na concentração de 4,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |
|-----------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>K<sub>0,hb</sub> (Pa)</b>                  | 0,691           | 0,613            | 0,578            | 0,541            | 0,503            | 0,483            |
| <b>K<sub>hb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 0,368           | 0,232            | 0,136            | 0,088            | 0,060            | 0,036            |
| <b>n<sub>hb</sub></b>                         | 0,609           | 0,639            | 0,669            | 0,699            | 0,732            | 0,759            |
| <b>erro K<sub>0,hb</sub> (Pa)</b>             | 0,220           | 0,182            | 0,157            | 0,042            | 0,030            | 0,041            |
| <b>erro K<sub>hb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 0,053           | 0,039            | 0,030            | 0,007            | 0,005            | 0,005            |
| <b>erro n<sub>hb</sub></b>                    | 0,022           | 0,026            | 0,034            | 0,013            | 0,012            | 0,024            |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                          | 0,022           | 0,018            | 0,015            | 0,001            | 0,001            | 0,002            |
| <b>SSR</b>                                    | 0,220           | 0,178            | 0,153            | 0,013            | 0,008            | 0,015            |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,999           | 0,999            | 0,998            | 1,000            | 1,000            | 0,999            |

Tabela A.8. Parâmetros do modelo de Mizrahi & Berk (MB) para suco de acerola na concentração de 4,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|-----------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>K<sub>0,mb</sub> (Pa)</b>                  | 0,502         | 0,506          | 0,548          | 0,559          | 0,557          | 0,587          |
| <b>K<sub>mb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 0,446         | 0,331          | 0,221          | 0,160          | 0,122          | 0,077          |
| <b>n<sub>mb</sub></b>                         | 0,337         | 0,359          | 0,391          | 0,418          | 0,444          | 0,484          |
| <b>erro K<sub>0,mb</sub> (Pa)</b>             | 0,244         | 0,194          | 0,124          | 0,040          | 0,033          | 0,049          |
| <b>erro K<sub>mb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 0,077         | 0,067          | 0,056          | 0,016          | 0,013          | 0,013          |
| <b>erro n<sub>mb</sub></b>                    | 0,022         | 0,026          | 0,033          | 0,014          | 0,014          | 0,024          |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                          | 0,022         | 0,018          | 0,016          | 0,002          | 0,001          | 0,002          |
| <b>SSR</b>                                    | 0,223         | 0,181          | 0,154          | 0,016          | 0,012          | 0,017          |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,999         | 0,999          | 0,998          | 1,000          | 1,000          | 0,999          |

Tabela A.9. Parâmetros do modelo de Casson (C) para suco de acerola na concentração de 4,0 °Brix.

|                                 | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{0,c}$ (Pa)                  | 1,206         | 1,009          | 0,852          | 0,748          | 0,668          | 0,611          |
| $K_c$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 0,134         | 0,118          | 0,101          | 0,089          | 0,082          | 0,069          |
| erro $K_{0,c}$ (Pa)             | 0,046         | 0,037          | 0,030          | 0,016          | 0,011          | 0,010          |
| erro $K_c$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,003         | 0,003          | 0,002          | 0,001          | 0,011          | 0,001          |
| $\chi^2$                        | 0,124         | 0,061          | 0,027          | 0,006          | 0,003          | 0,002          |
| SSR                             | 1,367         | 0,671          | 0,302          | 0,067          | 0,028          | 0,017          |
| $R^2$                           | 0,994         | 0,995          | 0,996          | 0,998          | 0,999          | 0,999          |

Tabela A.10. Parâmetros do modelo da Lei de Potência (LP) para suco de acerola na concentração de 7,0 °Brix.

|                                    | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{lp}$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 3,965         | 2,897          | 2,330          | 1,629          | 1,385          | 1,087          |
| $n_{lp}$                           | 0,339         | 0,360          | 0,374          | 0,412          | 0,410          | 0,428          |
| erro $K_{lp}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,152         | 0,145          | 0,145          | 0,124          | 0,114          | 0,115          |
| erro $n_{lp}$                      | 0,007         | 0,010          | 0,012          | 0,014          | 0,016          | 0,020          |
| $\chi^2$                           | 0,259         | 0,277          | 0,307          | 0,304          | 0,253          | 0,297          |
| SSR                                | 2,849         | 3,052          | 3,372          | 3,340          | 2,785          | 3,270          |
| $R^2$                              | 0,995         | 0,993          | 0,991          | 0,989          | 0,987          | 0,987          |



Tabela A.11. Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola na concentração de 7,0 °Brix.

|                                    | Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |
|------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $K_{0,hb}$ (Pa)                    | 5,105           | 4,506            | 4,196            | 3,556            | 3,260            | 3,028            |
| $K_{hb}$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 1,508           | 0,924            | 0,621            | 0,385            | 0,268            | 0,158            |
| $n_{hb}$                           | 0,473           | 0,522            | 0,563            | 0,624            | 0,652            | 0,717            |
| erro $K_{0,hb}$ (Pa)               | 0,349           | 0,331            | 0,366            | 0,236            | 0,127            | 0,178            |
| erro $K_{hb}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,133           | 0,107            | 0,103            | 0,053            | 0,026            | 0,028            |
| erro $n_{hb}$                      | 0,013           | 0,017            | 0,025            | 0,021            | 0,015            | 0,028            |
| $\chi^2$                           | 0,023           | 0,029            | 0,047            | 0,028            | 0,009            | 0,025            |
| SSR                                | 0,228           | 0,292            | 0,467            | 0,277            | 0,093            | 0,246            |
| R <sup>2</sup>                     | 1,000           | 0,999            | 0,999            | 0,999            | 1,000            | 0,999            |

Tabela A.12. Parâmetros do modelo de Mizrahi & Berk (MB) para suco de acerola na concentração de 7,0 °Brix.

|                                    | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{0,mb}$ (Pa)                    | 1,897         | 1,824          | 1,805          | 1,661          | 1,630          | 1,594          |
| $K_{mb}$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 0,591         | 0,418          | 0,305          | 0,229          | 0,167          | 0,111          |
| $n_{mb}$                           | 0,304         | 0,341          | 0,377          | 0,417          | 0,448          | 0,501          |
| erro $K_{0,mb}$ (Pa)               | 0,303         | 0,107          | 0,214          | 0,089          | 0,144          | 0,170          |
| erro $K_{mb}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,062         | 0,058          | 0,055          | 0,038          | 0,017          | 0,022          |
| erro $n_{mb}$                      | 0,013         | 0,018          | 0,024          | 0,022          | 0,014          | 0,029          |
| $\chi^2$                           | 0,024         | 0,033          | 0,048          | 0,033          | 0,011          | 0,028          |
| SSR                                | 0,241         | 0,327          | 0,489          | 0,330          | 0,099          | 0,282          |
| R <sup>2</sup>                     | 1,000         | 0,999          | 0,999          | 0,999          | 1,000          | 0,998          |

Tabela A.13. Parâmetros do modelo de Casson (C) para suco de acerola na concentração de 7,0 °Brix.

|                                 | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{0,c}$ (Pa)                  | 2,823         | 2,458          | 2,229          | 1,924          | 1,770          | 1,593          |
| $K_c$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 0,139         | 0,132          | 0,126          | 0,127          | 0,116          | 0,112          |
| erro $K_{0,c}$ (Pa)             | 0,051         | 0,041          | 0,034          | 0,026          | 0,015          | 0,019          |
| erro $K_c$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,004         | 0,003          | 0,002          | 0,002          | 0,001          | 0,001          |
| $\chi^2$                        | 0,481         | 0,247          | 0,140          | 0,069          | 0,018          | 0,026          |
| SSR                             | 5,289         | 2,715          | 1,545          | 0,754          | 0,201          | 0,282          |
| R <sup>2</sup>                  | 0,996         | 0,994          | 0,996          | 0,998          | 0,999          | 0,998          |

Tabela A.14. Parâmetros do modelo da Lei de Potência (LP) para suco de acerola na concentração de 10,0 °Brix.

|                                    | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{lp}$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 14,929        | 10,679         | 8,227          | 6,399          | 5,235          | 3,953          |
| $n_{lp}$                           | 0,234         | 0,270          | 0,290          | 0,313          | 0,327          | 0,353          |
| erro $K_{lp}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,594         | 0,373          | 0,470          | 0,433          | 0,402          | 0,355          |
| erro $n_{lp}$                      | 0,008         | 0,007          | 0,011          | 0,013          | 0,015          | 0,017          |
| $\chi^2$                           | 1,774         | 0,916          | 1,693          | 1,725          | 1,640          | 1,569          |
| SSR                                | 19,515        | 10,076         | 18,618         | 18,973         | 18,044         | 17,263         |
| R <sup>2</sup>                     | 0,988         | 0,993          | 0,985          | 0,983          | 0,980          | 0,977          |

Tabela A.15. Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola na concentração de 10,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |
|-----------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>K<sub>0,hb</sub> (Pa)</b>                  | 19,510          | 15,634           | 13,518           | 11,908           | 10,638           | 8,950            |
| <b>K<sub>hb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 3,035           | 2,131            | 1,407            | 0,935            | 0,650            | 0,456            |
| <b>n<sub>hb</sub></b>                         | 0,441           | 0,487            | 0,534            | 0,586            | 0,626            | 0,668            |
| <b>erro K<sub>0,hb</sub> (Pa)</b>             | 1,333           | 0,139            | 0,709            | 0,467            | 0,322            | 0,450            |
| <b>erro K<sub>hb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 0,562           | 0,001            | 0,221            | 0,121            | 0,072            | 0,087            |
| <b>erro n<sub>hb</sub></b>                    | 0,026           | 0,001            | 0,023            | 0,020            | 0,017            | 0,029            |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                          | 0,258           | 0,092            | 0,146            | 0,087            | 0,052            | 0,126            |
| <b>SSR</b>                                    | 2,577           | 1,012            | 1,462            | 0,873            | 0,519            | 1,260            |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,998           | 0,999            | 0,999            | 0,999            | 0,999            | 0,998            |

Tabela A.16. Parâmetros do modelo de Mizrahi & Berk (MB) para suco de acerola na concentração de 10,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|-----------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>K<sub>0,mb</sub> (Pa)</b>                  | 4,122         | 3,295          | 3,429          | 3,235          | 3,076          | 2,817          |
| <b>K<sub>mb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 0,548         | 0,676          | 0,344          | 0,257          | 0,197          | 0,160          |
| <b>n<sub>mb</sub></b>                         | 0,321         | 0,301          | 0,387          | 0,428          | 0,461          | 0,490          |
| <b>erro K<sub>0,mb</sub> (Pa)</b>             | 0,801         | 0,143          | 0,624          | 0,282          | 0,056          | 0,301          |
| <b>erro K<sub>mb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 0,217         | 0,026          | 0,108          | 0,084          | 0,021          | 0,081          |
| <b>erro n<sub>mb</sub></b>                    | 0,027         | 0,005          | 0,023          | 0,018          | 0,015          | 0,027          |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                          | 0,282         | 0,098          | 0,150          | 0,091          | 0,043          | 0,217          |
| <b>SSR</b>                                    | 2,821         | 1,085          | 1,504          | 1,013          | 0,433          | 2,178          |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,998         | 0,999          | 0,999          | 0,999          | 0,999          | 0,998          |



Tabela A.17. Parâmetros do modelo de Casson (C) para suco de acerola na concentração de 10,0 °Brix.

|                                 | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{0,c}$ (Pa)                  | 4,957         | 4,344          | 3,883          | 3,499          | 3,203          | 2,849          |
| $K_c$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 0,149         | 0,157          | 0,154          | 0,154          | 0,150          | 0,149          |
| erro $K_{0,c}$ (Pa)             | 0,053         | 0,056          | 0,037          | 0,026          | 0,017          | 0,024          |
| erro $K_c$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 0,004         | 0,004          | 0,003          | 0,002          | 0,001          | 0,002          |
| $\chi^2$                        | 1,303         | 1,174          | 0,439          | 0,179          | 0,064          | 0,108          |
| SSR                             | 14,332        | 12,916         | 4,826          | 1,972          | 0,699          | 1,189          |
| R <sup>2</sup>                  | 0,991         | 0,992          | 0,996          | 0,998          | 0,999          | 0,998          |

Tabela A.18. Parâmetros do modelo da Lei de Potência (LP) para suco de acerola na concentração de 16,0 °Brix.

|                                    | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $K_{lp}$ (Pa.s <sup>n</sup> )      | 80,426        | 63,042         | 47,445         | 38,406         | 30,269         | 22,921         |
| $n_{lp}$                           | 0,105         | 0,123          | 0,154          | 0,171          | 0,194          | 0,231          |
| erro $K_{lp}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 1,494         | 1,552          | 1,517          | 1,561          | 1,526          | 1,418          |
| erro $n_{lp}$                      | 0,004         | 0,005          | 0,007          | 0,008          | 0,010          | 0,012          |
| $\chi^2$                           | 4,273         | 5,244          | 6,315          | 7,626          | 8,669          | 9,887          |
| SSR                                | 47,003        | 57,687         | 69,461         | 83,891         | 95,359         | 108,760        |
| R <sup>2</sup>                     | 0,985         | 0,981          | 0,980          | 0,975          | 0,971          | 0,970          |

Tabela A.19. Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola na concentração de 16,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5,0 °C | Temp.<br>20,0 °C | Temp.<br>35,0 °C | Temp.<br>50,0 °C | Temp.<br>65,0 °C | Temp.<br>85,0 °C |
|-----------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>K<sub>0,hb</sub> (Pa)</b>                  | 86,863          | 72,694           | 59,568           | 51,921           | 44,799           | 37,992           |
| <b>K<sub>hb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 8,821           | 6,099            | 4,565            | 3,207            | 2,199            | 1,682            |
| <b>n<sub>hb</sub></b>                         | 0,338           | 0,385            | 0,437            | 0,484            | 0,539            | 0,589            |
| <b>erro K<sub>0,hb</sub> (Pa)</b>             | 3,490           | 3,245            | 1,244            | 2,179            | 1,623            | 0,954            |
| <b>erro K<sub>hb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 1,987           | 1,616            | 0,531            | 0,800            | 0,496            | 0,246            |
| <b>erro n<sub>hb</sub></b>                    | 0,030           | 0,036            | 0,016            | 0,036            | 0,034            | 0,022            |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                          | 0,650           | 0,926            | 0,217            | 0,972            | 0,789            | 0,370            |
| <b>SSR</b>                                    | 6,495           | 9,264            | 2,170            | 9,720            | 7,893            | 3,703            |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,998           | 0,997            | 0,999            | 0,997            | 0,998            | 0,999            |

Tabela A.20. Parâmetros do modelo de Mizrahi & Berk (MB) para suco de acerola na concentração de 16,0 °Brix.

|                                               | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|-----------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>K<sub>0,mb</sub> (Pa)</b>                  | 9,165         | 8,381          | 7,541          | 7,050          | 6,539          | 5,988          |
| <b>K<sub>mb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 0,588         | 0,461          | 0,413          | 0,320          | 0,251          | 0,227          |
| <b>n<sub>mb</sub></b>                         | 0,284         | 0,324          | 0,357          | 0,397          | 0,439          | 0,469          |
| <b>erro K<sub>0,mb</sub> (Pa)</b>             | 1,215         | 1,216          | 0,100          | 0,572          | 0,339          | 0,192          |
| <b>erro K<sub>mb</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 0,339         | 0,186          | 0,053          | 0,103          | 0,097          | 0,064          |
| <b>erro n<sub>mb</sub></b>                    | 0,029         | 0,035          | 0,017          | 0,034          | 0,032          | 0,021          |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                          | 0,688         | 0,988          | 0,236          | 1,203          | 0,849          | 0,463          |
| <b>SSR</b>                                    | 7,383         | 10,881         | 2,360          | 10,103         | 8,491          | 3,835          |
| <b>R<sup>2</sup></b>                          | 0,998         | 0,997          | 0,999          | 0,997          | 0,998          | 0,999          |

Tabela A.21. Parâmetros do modelo de Casson (C) para suco de acerola na concentração de 16,0 °Brix.

|                                              | Temp.<br>5 °C | Temp.<br>20 °C | Temp.<br>35 °C | Temp.<br>50 °C | Temp.<br>65 °C | Temp.<br>85 °C |
|----------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>K<sub>0,c</sub> (Pa)</b>                  | 10,058        | 9,068          | 8,127          | 7,443          | 6,764          | 6,109          |
| <b>K<sub>c</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b>      | 0,120         | 0,129          | 0,149          | 0,155          | 0,164          | 0,183          |
| <b>erro K<sub>0,c</sub> (Pa)</b>             | 0,048         | 0,046          | 0,039          | 0,040          | 0,034          | 0,024          |
| <b>erro K<sub>c</sub> (Pa.s<sup>n</sup>)</b> | 0,004         | 0,004          | 0,003          | 0,003          | 0,003          | 0,002          |
| <b>χ<sup>2</sup></b>                         | 3,462         | 2,620          | 1,640          | 1,489          | 0,911          | 0,398          |
| <b>SSR</b>                                   | 38,083        | 28,819         | 18,043         | 16,382         | 10,023         | 4,378          |
| <b>R<sup>2</sup></b>                         | 0,988         | 0,990          | 0,995          | 0,995          | 0,997          | 0,999          |