

# REOLOGIA DO SUCO DE ACEROLA: EFEITOS DA CONCENTRAÇÃO E TEMPERATURA<sup>1</sup>

F.C. DA SILVA<sup>2</sup>, Daniela Helena Pelegrine GUIMARÃES<sup>3,\*</sup>, C.A. GASPARETTO<sup>4</sup>

## RESUMO

Neste trabalho foi determinado o comportamento reológico do suco industrializado de acerola, mediante um reômetro de cilindros concêntricos, em concentrações de sólidos solúveis de 4, 7, 10, 13 e 16°Brix e no intervalo de temperatura de 5°C a 85°C. Os dados 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. Os baixos valores obtidos para o índice de comportamento ( $0,338 \leq n_{hb} \leq 0,759$ ) confirmaram o comportamento pseudoplástico do suco. O efeito da temperatura no comportamento reológico do suco de acerola foi descrito por uma equação análoga a de Arrhenius ( $\eta_a = \eta_0 \exp(E_{at}/RT)$ ). Foi observado que a energia de ativação diminuiu com o aumento da concentração das amostras, expressa em sólidos solúveis, variando desde 3,50kcal/gmol, para as amostras a 4°Brix, até 1,79kcal/gmol, para as amostras a 16°Brix. Os dados da viscosidade aparente e da concentração de sólidos solúveis foram ajustados aos modelos potencial e exponencial. O modelo potencial mostrou ser o mais adequado para descrever o efeito da concentração sobre a viscosidade aparente do suco de acerola.

**Palavras-chave:** reologia; acerola; concentração; temperatura.

## SUMMARY

RHEOLOGY OF ACEROLA JUICE: EFFECTS OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE. The rheological behavior of the industrialized acerola juice was studied at different soluble solids concentrations 4, 7, 10, 13 and 16°Brix and temperatures from 5 to 85°C, using a concentric cylinder rheometer. 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 and the low values presented by the behavior index ( $0,338 \leq n_{hb} \leq 0,759$ ) confirm the pseudoplastic behavior of the acerola juice. An equation similar to the Arrhenius one ( $\eta_a = \eta_0 \exp(E_{at}/RT)$ ) described the effect of the temperature on the acerola juice. The results also showed that the activation energy decreases with the increasing in juice concentration, varying from 3.50kcal/gmol (4°Brix) to 1.79kcal/gmol (16°Brix). Potential and exponential models were tested considering the apparent viscosity data as a function of the soluble solids concentrations. For this purpose, the potential model showed the best performance.

**Keywords:** acerola; rheology; concentration; temperature.

## 1 - INTRODUÇÃO

A industrialização do suco de acerola vem se destacando de forma significativa. Isto se deve principalmente ao seu alto teor de vitamina C, sendo considerada na atualidade como uma das maiores fontes naturais desta vitamina, podendo atingir, em algumas variedades, até 4,676mg/100g de polpa [1,2].

Durante o processamento, armazenamento, comercialização e consumo, alimentos fluidos apresentam diferentes concentrações e estão sujeitos a diversas temperaturas. O conhecimento do comportamento reológico de sucos de frutas é fundamental em engenharia de processos e equipamentos. A definição de modelos adequados à descrição do escoamento é necessária ao projeto de tubulações e de bombas e aos sistemas de agitação e de mistura. O efeito da temperatura e da concentração sobre o comportamento reológico precisa ser conhecido para o entendimento e dimensionamento de operações unitárias tais como tratamento térmico e concentração [4, 5, 7, 8, 12, 15, 18].

O processo de concentração resulta na remoção de água e na conseqüente redução nos custos de embalagem, transporte e armazenamento. A viscosidade aparente dos produtos varia bastante durante este tipo de processo, a ponto de inviabilizar a produção dos mesmos com maiores concentrações.

É importante ressaltar que tais dados 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 para a produção de suco de acerola.

Na descrição do comportamento reológico, foram utilizados quatro modelos empíricos para relacionar os dados de tensão de cisalhamento com a taxa de deformação. Os modelos reológicos mais citados nas referências bibliográficas para a caracterização reológica de sucos e polpas de frutas são: Ostwald-De-Waele ou Lei da Potência, Herschel-Bulkley, Mizrahi & Berk e Casson, representados pelas Equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente:

$$\tau = K_{lp} \dot{\gamma}^{n_{lp}} \quad (1)$$

$$\tau = K_{0,hb} + 2 K_{hb} \dot{\gamma}^{n_{hb}} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Recebido para publicação em 09/09/2003. Aceito para publicação em 31/05/2005 (001212).

<sup>2</sup> EMBRAPA – Agroindústria – Rua Laudelino da Freitas Castro, 432 – Portal das Colinas – Guaratinguetá-SP. CEP 12516-190. E-mail: dhguima@uol.com.br

<sup>3</sup> Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, CP 6121, CEP: 13083-970, Campinas -SP.

\* A quem a correspondência deve ser enviada.

$$\tau \propto \dot{\gamma}^{0,5} \left[ K_{0,mb} + 2 K_{mb} \dot{\gamma}^{n_{mb}} \right] \quad (3)$$

$$\tau \propto \dot{\gamma}^{0,5} \left[ K_{0,c} + 2 K_c \dot{\gamma}^{n_c} \right] \quad (4)$$

onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento;  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação;  $K_{lp}$ ,  $K_{hb}$ ,  $K_{mb}$  e  $K_c$  são os índices de consistência;  $K_{0,hb}$ ,  $K_{0,mb}$  e  $K_{0,c}$  são constantes dos modelos e  $n_{lp}$ ,  $n_{hb}$  e  $n_{mb}$  são os índices de comportamento reológico.

O efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente pode ser descrito mediante uma equação análoga à de Arrhenius [4,7,13,18].

$$\eta_a \propto \eta_0 \exp \left( \frac{E_{at}}{RT} \right) \quad (5)$$

onde  $\eta_a$  é a viscosidade aparente (Pa.s),  $\eta_0$  é uma constante (Pa.s),  $E_{at}$  é a energia de ativação para escoamento viscoso (kcal.gmol<sup>-1</sup>),  $R$  é a constante dos gases (1,987.10<sup>-3</sup> kcal.gmol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) e  $T$  é a temperatura absoluta (K). A Equação (5) 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 [9,15].

O efeito da concentração sobre a viscosidade aparente de sucos de frutas é importante em aplicações tais como na concentração de fluidos alimentares. Em faixas limitadas de concentração e a uma taxa de deformação e temperatura fixas, o efeito da concentração de sólidos na viscosidade aparente pode ser descrito por relações do tipo exponencial [6,12,20] ou do tipo potência [7,14], conforme descrito pelas Equações (6) e (7), respectivamente:

$$\eta_a \propto a_{0,n} \left( \frac{C}{C_0} \right)^{a_{1,n}} \quad (6)$$

$$\eta_a = a_{0,n} \cdot C^{a_{1,n}} \quad (7)$$

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

Os objetivos deste trabalho foram testar a aplicabilidade dos quatro modelos reológicos, citados anteriormente, em suco industrializado de acerola, em diversas temperaturas e concentrações de sólidos solúveis, e determinar a variação da viscosidade aparente e dos valores dos parâmetros destes modelos em função das variáveis experimentais temperatura e concentração.

## 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 – Obtenção das amostras de suco de acerola

As amostras de suco de acerola foram cedidas pela empresa Cajuba, na forma congelada, pasteurizada e

concentrada a 13°Brix. As amostras foram preparadas por diluição com água destilada nas concentrações de 4, 7 e 10°Brix. Parte da amostra recebida foi concentrada a 16°Brix utilizando-se um liofilizador, marca Labconco, como parte do processo de liofilização onde o produto foi retirado antes de estar completamente desidratado.

As amostras de suco de acerola foram cedidas pela empresa Cajuba, na forma congelada, pasteurizada e concentrada a 13,0°Brix. As amostras foram preparadas por diluição com água destilada nas concentrações de 4,0; 7,0 e 10,0°Brix. Parte da amostra recebida foi concentrada a 17,2°Brix utilizando-se um liofilizador, marca Labconco, como parte do processo de liofilização onde o produto foi retirado antes de estar completamente liofilizado. O liofilizador é composto de duas câmaras, uma de liofilização e outra de condensação. A câmara de liofilização é composta de duas bandejas de aço, cada uma com capacidade de cerca de 500mL.

O suco de acerola 13,0°Brix foi inicialmente congelado a - 40°C levando 2 horas e 15 min para chegar a esta temperatura. A bomba de vácuo foi ligada até atingir um vácuo de aproximadamente 2,0mmHg e em seguida ligou-se o aquecimento na câmara de liofilização durante 5 horas e 30 minutos. O aumento de temperatura acelerou a sublimação da água contida no suco. O Brix foi controlado através do tempo de aquecimento, onde foi obtido um produto a 16,5°Brix. A partir daí foi realizada uma diluição para 16,0°Brix. Anteriormente foi verificado, através de alguns testes, que 5 horas e 30 minutos ultrapassaria um pouco a concentração de 16,0°Brix. Desta forma foi utilizado este tempo de aquecimento, com a posterior parada do processo de liofilização, para atingir uma concentração superior esperada.

### 2.2 – Caracterização físico-química do suco de acerola:

Foram realizadas as seguintes análises físico-químicas no suco de acerola a 13°Brix: sólidos solúveis, pH, acidez total, sólidos totais, açúcares totais e redutores, amido, pectina e vitamina C [3], teor de polpa [16], e densidade, através de um densímetro digital, marca Paar, modelo DMA 48.

### 2.3 – Medidas reológicas

As medidas reológicas foram realizadas mediante emprego do reômetro rotacional, tipo Searle, marca Contraves, modelo Rheomat 30, de cilindros concêntricos. Este sistema, cujo cilindro interno é rotacional e o externo fixo, baseia-se na determinação do torque no próprio cilindro interno.

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 350rpm. 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. 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 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.

As medidas reológicas foram determinadas nas temperaturas de 5, 20, 35, 50, 65 e 85°C e concentrações de 4, 7, 10, 13 e 16°Brix.

#### 2.4 – Cálculos dos parâmetros reológicos

Todos os resultados foram processados utilizando-se os softwares Statistica 5.0 e Origin 4.0. Os valores experimentais da 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), tendo sido determinados os parâmetros reológicos destes modelos, assim como os respectivos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), a soma dos quadrados dos resíduos (SSR) e o qui-quadrado ( $\theta^2$ ).

Os valores da energia de ativação foram determinados a partir da variação da viscosidade aparente com a temperatura, mediante a equação análoga à de Arrhenius.

Para determinar o efeito da concentração sobre a viscosidade aparente, foram testados os modelos potencial e exponencial.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 – Caracterização físico-química

**TABELA 1.** Caracterização físico-química do suco de acerola a 13,0°Brix

| Determinação                          | Valores Obtidos |
|---------------------------------------|-----------------|
| Sólidos solúveis (°Brix)              | 13,0            |
| pH                                    | 3,34            |
| Acidez total (g de ác.málico/100 g)   | 1,89            |
| Açúcares totais (%)                   | 8,42            |
| Açúcares redutores (%)                | 6,07            |
| Açúcares não-redutores (%)            | 2,35            |
| Sólidos totais (%)                    | 15,41           |
| Umidade (% em base úmida)             | 84,59           |
| Pectina (%)                           | 1,05            |
| Amido (%)                             | 2,33            |
| Vitamina C (mg/100 g)                 | 2018,67         |
| Densidade a 20°C (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,0555          |
| Teor de polpa (%)                     | 85,32           |

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 1* mostra os resultados obtidos para a caracterização físico-química do suco de acerola.

Os resultados obtidos estão na faixa dos valores encontrados pelos autores MATSUURA [10] e OLIVA [11], com exceção dos teores de sólidos totais e de polpa, que estão superiores. É importante ressaltar que o teor de polpa é um termo característico de análise de sucos nas indústrias.

#### 3.2. Comportamento reológico do suco de acerola

As equações para o cálculo da taxa de deformação dadas pelos fabricantes de reômetros se baseiam 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 externo e interno neste experimento é de 1,015, uma das menores neste tipo de equipamento. 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 de Potência, sendo neste caso recalculadas as taxas de deformação.

Dentre os modelos de Mizrahi & Berk (MB), Lei de Potência (LP), Herschel-Bulkley (HB) e Casson (C), utilizados para descrever o comportamento reológico do suco de acerola, o de Herschel-Bulkley proporcionou melhores parâmetros de controle de ajuste na maior parte das faixas de temperatura e concentração estudadas, apresentando os menores valores de SSR e  $\theta^2$ , além dos valores mais elevados para o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>).

Nas concentrações de 4 e 7°Brix, em toda a faixa de temperatura, todos os modelos apresentaram parâmetros de controle aceitáveis para serem escolhidos como representativos do comportamento reológico do suco de acerola. Nas concentrações de 10, 13 e 16°Brix, os modelos reológicos LP e C não proporcionaram bons parâmetros de controle de ajuste. Os valores de SSR do modelo reológico LP variaram de 10,1 a 19,5 (10°Brix), de 38,6 a 73,5 (13°Brix), e de 47,0 a 108,8 (16°Brix). Os valores SSR do modelo reológico C variaram de 0,7 a 14,3 (10°Brix), de 3,6 a 36,7 (13°Brix), e de 4,4 a 38,1 (16°Brix). Já no modelo reológico HB, os valores de SSR variaram de 0,5 a 2,6 (10°Brix), de 0 a 8,4 (13°Brix), e de 2,2 a 9,7 (16°Brix).

Verifica-se nas *Tabelas 2, 3, 4 e 5* que o modelo de HB descreve adequadamente o comportamento reológico do suco de acerola a 13°Brix, pois apresenta melhores

parâmetros de controle de ajuste em toda a faixa de temperatura, ou seja, os menores valores de SSR e  $\chi^2$  (qui-quadrado), e os maiores valores de  $R^2$ .

**TABELA 2.** Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley (HB) para suco de acerola a 13°Brix

|                               | Temperatura (°C) |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 5                | 20     | 35     | 50     | 65     | 85     |
| $K_{0,hb}$ (Pa)               | 45,673           | 37,798 | 29,091 | 27,295 | 24,559 | 19,836 |
| $K_{hb}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 5,504            | 3,785  | 2,747  | 1,879  | 1,295  | 0,937  |
| $n_{hb}$ (-)                  | 0,393            | 0,437  | 0,495  | 0,529  | 0,585  | 0,627  |
| $\theta^2$                    | 0,424            | 0,599  | 2,337  | 0,004  | 0,563  | 0,378  |
| SSR                           | 4,236            | 5,988  | 23,375 | 0,037  | 5,632  | 3,781  |
| $R^2$                         | 0,999            | 0,998  | 0,994  | 1,000  | 0,997  | 0,998  |

**TABELA 3.** Parâmetros do modelo da Lei de Potência (LP) para suco de acerola a 13°Brix

|                               | Temperatura (°C) |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 5                | 20     | 35     | 50     | 65     | 85     |
| $K_{lp}$ (Pa.s <sup>n</sup> ) | 38,629           | 29,441 | 19,892 | 17,760 | 14,341 | 10,381 |
| $n_{lp}$ (-)                  | 0,161            | 0,182  | 0,232  | 0,229  | 0,253  | 0,286  |
| $\theta^2$                    | 3,508            | 3,930  | 6,677  | 3,986  | 5,330  | 4,792  |
| SSR                           | 38,584           | 43,227 | 73,451 | 43,848 | 58,633 | 52,714 |
| $R^2$                         | 0,986            | 0,982  | 0,974  | 0,979  | 0,972  | 0,972  |

**TABELA 4.** Parâmetros do modelo de Mizrahi & Berk (MB) para suco de acerola a 13°Brix

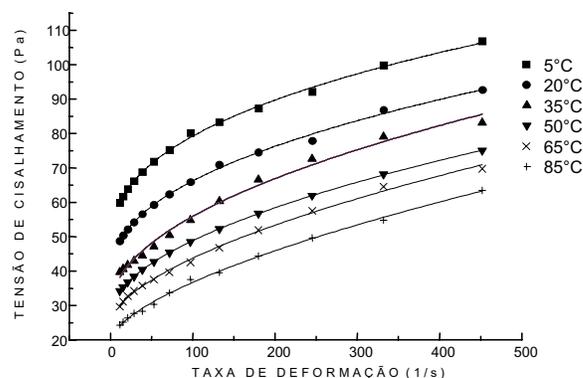
|                               | Temperatura (°C) |       |        |       |       |       |
|-------------------------------|------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
|                               | 5                | 20    | 35     | 50    | 65    | 85    |
| $K_{0,mb}$ (Pa)               | 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 |
| $\theta^2$                    | 0,500            | 0,689 | 2,557  | 0,014 | 0,629 | 0,399 |
| SSR                           | 5,004            | 6,890 | 25,571 | 0,140 | 6,293 | 3,986 |
| $R^2$                         | 0,998            | 0,997 | 0,991  | 1,000 | 0,997 | 0,998 |

**TABELA 5.** Parâmetros do modelo de Casson (C) para suco de acerola a 13°Brix

|                            | Temperatura (°C) |        |        |       |       |       |
|----------------------------|------------------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                            | 5                | 20     | 35     | 50    | 65    | 85    |
| $K_{0,c}$ (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 |
| $\theta^2$                 | 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 |

Com o aumento da temperatura, observou-se um aumento no índice de comportamento e uma diminuição no índice de consistência em todos os modelos utilizados. Estes fatos se repetem em todas as faixas de temperatura e concentração.

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 é melhor visualizado na *Figura 1*, onde pode-se notar que a inclinação das curvas diminui com o aumento da taxa de deformação. Isto evidencia uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação.



**FIGURA 1.** Relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento descrita pelo modelo de Herschel-Bulkley (HB) para o suco de acerola a 13°Brix.

### 3.3 – Efeito da temperatura e concentração

A medida de 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 (teor de polpa), que afetam os parâmetros do modelo HB. Para o modelo HB, onde existe o termo de tensão inicial  $K_{0,hb}$ , e considerando que este parâmetro não foi medido, sendo portanto apenas o resultado de um ajuste de curva, não foi determinada sua dependência com a temperatura.

Como pode ser observado na *Tabela 6*, os valores do parâmetro  $K_{0,hb}$  e  $K_{hb}$  do modelo HB crescem com o aumento da concentração, à temperatura constante, e diminuem com o aumento da temperatura, à concentração constante.

Mediante um ajuste não-linear dos dados de viscosidade aparente à equação de Arrhenius, foram obtidos os valores da energia de ativação do suco de acerola nas diversas concentrações de sólidos solúveis estudadas.

Os valores da energia de ativação variam entre 1,79kcal/gmol, para as amostras de suco de acerola a 16°Brix, e 3,50kcal/gmol, para as amostras a 4°Brix. Existe uma clara tendência da energia de ativação diminuir com o aumento do conteúdo de sólidos solúveis das amostras de suco de acerola, comportamento esse registrado somente para suco concentrado de maracujá e para polpas de frutas [9,17,19]. De uma forma geral, pode-se dizer que quanto maior for a energia de ativação ( $E_{at}$ ), maior será a dependência da viscosidade aparente ( $\eta_a$ ) e do índice de consistência ( $K_{hb}$ ) com a temperatura, ou seja, maior será a variação da  $\eta_a$  e do  $K_{hb}$  com a temperatura para uma dada concentração.

Pode-se observar na *Tabela 6*, que na concentração de 4,0°Brix a  $E_{at}$  é de 3,50kcal/gmol e a 16,0°Brix a  $E_{at}$  é de 1,79kcal/gmol, indicando uma maior variação da  $\eta_a$  e do  $K_{hb}$  na concentração de 4,0°Brix na faixa de temperatura estudada. Conforme *Tabela 6*, a 4,0°Brix a  $\eta_a$  variou de 0,068 Pa.s a 0,017 Pa.s, sugerindo um índice de

4,00 e a 16,0°Brix a  $\eta_a$  variou de 1,286 Pa.s a 0,633 Pa.s sugerindo um índice de variação de 2,03, mostrando que a  $E_{at}$  tende a diminuir com o aumento do conteúdo de sólidos solúveis e de sólidos totais. Logo quanto maior a quantidade de sólidos solúveis ou de sólidos totais, menores são a  $E_{at}$  e as variações de  $\eta_a$  e do  $K_{hb}$  na faixa de temperatura estudada.

Observa-se, na Tabela 6, que o índice de comportamento ( $n_{hb}$ ) aumenta com a temperatura e diminui com o aumento da concentração.

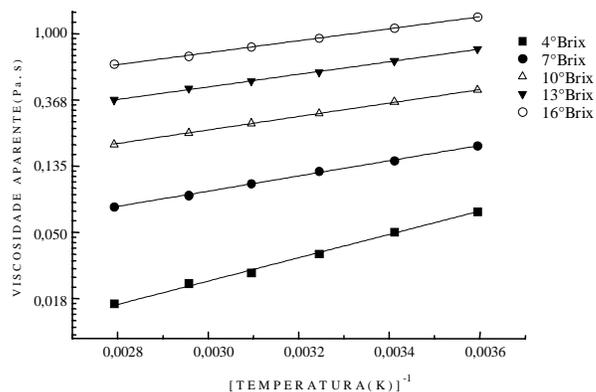
**TABELA 6.** Viscosidade aparente e energia de ativação, na taxa de deformação de 100 s<sup>-1</sup>, e dos parâmetros de HB, para o suco de acerola em diversas concentrações e temperaturas

| $E_{at}$<br>(kcal/gmol) | C<br>(°Brix) | T<br>(°C) | $K_{0,hb}$<br>(Pa) | $K_{hb}$<br>(Pa.s <sup>2</sup> ) | $n_{hb}$<br>(-) | $\eta_a$<br>(Pa.s) | $R^2$<br>(-) |
|-------------------------|--------------|-----------|--------------------|----------------------------------|-----------------|--------------------|--------------|
| 3,50                    | 4,0          | 5,0       | 0,691              | 0,368                            | 0,609           | 0,068              | 0,999        |
|                         |              | 20,0      | 0,613              | 0,232                            | 0,639           | 0,050              | 0,999        |
|                         |              | 35,0      | 0,578              | 0,136                            | 0,669           | 0,036              | 0,998        |
|                         |              | 50,0      | 0,541              | 0,088                            | 0,699           | 0,027              | 1,000        |
|                         |              | 65,0      | 0,503              | 0,060                            | 0,732           | 0,023              | 1,000        |
|                         |              | 85,0      | 0,483              | 0,036                            | 0,759           | 0,017              | 0,999        |
| 2,28                    | 7,0          | 5,0       | 5,105              | 1,508                            | 0,473           | 0,184              | 1,000        |
|                         |              | 20,0      | 4,506              | 0,924                            | 0,522           | 0,147              | 0,999        |
|                         |              | 35,0      | 4,196              | 0,621                            | 0,563           | 0,125              | 0,999        |
|                         |              | 50,0      | 3,556              | 0,385                            | 0,624           | 0,104              | 0,999        |
|                         |              | 65,0      | 3,260              | 0,268                            | 0,652           | 0,087              | 1,000        |
|                         |              | 85,0      | 3,028              | 0,158                            | 0,717           | 0,073              | 0,999        |
| 2,02                    | 10,0         | 5,0       | 19,510             | 3,035                            | 0,441           | 0,426              | 0,998        |
|                         |              | 20,0      | 15,634             | 2,131                            | 0,487           | 0,357              | 0,999        |
|                         |              | 35,0      | 13,518             | 1,407                            | 0,534           | 0,300              | 0,999        |
|                         |              | 50,0      | 11,908             | 0,935                            | 0,586           | 0,258              | 0,999        |
|                         |              | 65,0      | 10,638             | 0,650                            | 0,626           | 0,223              | 0,999        |
|                         |              | 85,0      | 8,950              | 0,456                            | 0,668           | 0,188              | 0,998        |
| 1,89                    | 13,0         | 5,0       | 45,673             | 5,504                            | 0,393           | 0,792              | 0,998        |
|                         |              | 20,0      | 37,798             | 3,785                            | 0,437           | 0,662              | 0,998        |
|                         |              | 35,0      | 29,091             | 2,747                            | 0,495           | 0,559              | 0,994        |
|                         |              | 50,0      | 27,295             | 1,879                            | 0,529           | 0,488              | 1,000        |
|                         |              | 65,0      | 24,559             | 1,295                            | 0,585           | 0,437              | 0,997        |
|                         |              | 85,0      | 19,836             | 0,937                            | 0,627           | 0,367              | 0,998        |
| 1,79                    | 16,0         | 5,0       | 86,863             | 8,821                            | 0,338           | 1,286              | 0,998        |
|                         |              | 20,0      | 72,694             | 6,099                            | 0,385           | 1,087              | 0,997        |
|                         |              | 35,0      | 59,568             | 4,565                            | 0,437           | 0,937              | 0,999        |
|                         |              | 50,0      | 51,921             | 3,207                            | 0,484           | 0,818              | 0,997        |
|                         |              | 65,0      | 44,799             | 2,199                            | 0,539           | 0,711              | 0,998        |
|                         |              | 85,0      | 37,992             | 1,682                            | 0,589           | 0,633              | 0,999        |

Observa-se, na Figura 2, como a viscosidade aparente, calculada para uma taxa de deformação de 100 s<sup>-1</sup>, aumenta com o inverso da temperatura, indicando que a viscosidade aparente diminui com o aumento da temperatura. A variação da viscosidade aparente apresenta comportamento muito similar para as concentrações de 16, 13, 10, e 7°Brix, indicando que o efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente é semelhante nesta faixa de concentração. Quando a concentração do suco diminui para 4°Brix, a viscosidade aparente diminui de forma muito mais intensa, indicando uma maior dependência com a temperatura.

As Tabelas 7 e 8 mostram os resultados dos ajustes da viscosidade aparente com a concentração de sólidos

solúveis, utilizando-se os modelos potencial e exponencial.



**FIGURA 2.** 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

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 aos propostos por VITALI, ROIG & RAO [19] para o suco de maracujá concentrado e para polpas de frutas. Como se pode apreciar na Tabela 7, o parâmetro  $a_{0,n}$  tende a diminuir com o aumento da temperatura. Os valores destes parâmetros oscilam desde 0,0020 Pa.s/°Brix<sup>a1,n</sup>, a uma temperatura de 5°C, até 0,0005 Pa.s/°Brix<sup>a1,n</sup>, a 85°C. Um comportamento inverso se observa no parâmetro  $a_{1,n}$ .

**TABELA 7.** Parâmetros do modelo potencial e de controle de ajuste da viscosidade aparente, na taxa de deformação de 100 s<sup>-1</sup>, em função da concentração de sólidos solúveis.

| Temperatura<br>(°C) | $a_{0,n}$<br>(Pa.s/°Brix <sup>a1,n</sup> ) | $a_{1,n}$<br>(-) | $\chi^2$<br>(-) | SSR<br>(-) | $R^2$<br>(-) |
|---------------------|--|------------------|-----------------|------------|--------------|
| 5,0                 | 0,00200                                    | 2,3311           | 0,0001          | 0,0003     | 0,9997       |
| 20,0                | 0,00149                                    | 2,3763           | 0,0000          | 0,0001     | 0,9998       |
| 35,0                | 0,00109                                    | 2,4377           | 0,0000          | 0,0001     | 0,9999       |
| 50,0                | 0,00086                                    | 2,4728           | 0,0000          | 0,0000     | 1,0000       |
| 65,0                | 0,00077                                    | 2,4629           | 0,0000          | 0,0001     | 0,9996       |
| 85,0                | 0,00047                                    | 2,6001           | 0,0000          | 0,0000     | 1,0000       |

Modelo potencial:  $\eta_a = a_{0,n} \cdot C^{a_{1,n}}$

#### 4 – CONCLUSÕES

O suco de acerola apresentou, em todas as faixas de temperatura e concentração estudadas, um forte comportamento não-Newtoniano, com características pseudoplásticas. Dentre os modelos reológicos de

Ostwald-de-Waele, Herschel-Bulkley, Mizrahi & Berk e Casson, utilizados para descrever o comportamento reológico do suco de acerola, o de Herschel-Bulkley proporcionou os melhores parâmetros de controle do ajuste, embora os demais modelos também tenham apresentados bons ajustes. A viscosidade aparente foi correlacionada satisfatoriamente em função da temperatura, mediante equação de Arrhenius e em função da concentração, através do modelo do tipo potência.

**TABELA 8.** Parâmetros do modelo exponencial e de controle de ajuste da viscosidade aparente, na taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , em função da concentração de sólidos solúveis.

| Temperatura<br>(°C) | $a_{0,n}$<br>(Pa.s) | $a_{1,n}$<br>(°Brix <sup>-1</sup> ) | $\chi^2$<br>(-) | SSR<br>(-) | R <sup>2</sup><br>(-) |
|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------|------------|-----------------------|
| 5,0                 | 0,05814             | 0,1948                              | 0,0034          | 0,0101     | 0,9898                |
| 20,0                | 0,04660             | 0,1981                              | 0,0026          | 0,0077     | 0,9892                |
| 35,0                | 0,03740             | 0,2025                              | 0,0018          | 0,0053     | 0,9900                |
| 50,0                | 0,03144             | 0,2049                              | 0,0015          | 0,0046     | 0,9889                |
| 65,0                | 0,02782             | 0,2041                              | 0,0016          | 0,0047     | 0,9853                |
| 85,0                | 0,02121             | 0,2133                              | 0,0008          | 0,0025     | 0,9900                |

Modelo exponencial:

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALVES, D.G. **Obtenção de acerola (*Malpighia puniceifolia* L.) em passa utilizando processos combinados de desidratação osmótica e secagem.** Campinas, 2003, 149p. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- [2] ALVES, R.E.; MENEZES, J.B. Colheita e pós-colheita da acerola. In: São José, A.B. e Alves, R.E. **Acerola no Brasil: produção e mercado.** Vitória da Conquista, 1995. p. 77-89.
- [3] A.O.A.C. (Association of Official Analytical Chemists), **Official Methods of Analysis**, 14<sup>a</sup>.edição. Arlington: SIDNEY WILLIAMS, 1984.
- [4] BEZERRA, J.R.M.V. **Comportamento Reológico da Polpa de Manga (*mangifera indica* L-Keitt).** Campinas, 2000, 120p. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- [5] CANTU, D.L.; RAO, M.A.; GASPARETTO, C. A. Rheological Properties of Noncohesive Apple Dispersion with Helical and Vane Impellers: Effect of Concentration and Particle Size. **Journal of Food Process Engineering**, v. 23, n. 5, p. 373-385, 2000.
- [6] CERVONE, N.W.; HARPER, J.M. Viscosity of an intermediate moisture dough. **Journal of Food Processing Engineering**, v. 2, n. 1, p. 83-95, 1978.
- [7] FERREIRA, G.M.; QUEIROZ, A.J.M.; CONCEIÇÃO, R.S.; GASPARETTO, C.A. Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**, v. 4, n. 2, p. 176-184, 2002.
- [8] HARPER, J.C.; EL SAHRIGI, A.F. Viscometric behavior of tomato concentrates. **Journal of Food Science**, v. 30, n. 3, p. 470-476, 1965.
- [9] HOLDSWORTH, S.D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behavior of fluid food products. **Journal of Texture Studies**, v. 2, n. 4, p. 393-418, 1971.
- [10] MATSUURA, F.C.A. **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 (UNICAMP).
- [11] 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 (UNICAMP).
- [12] PELEGRINE, D.H.G.; SILVA, F.C.; GASPARETTO, C.A. Rheological Behavior of Pineapple and Mango Pulps. **Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science And Technology**, v. 35, p. 645-648, 2002.
- [13] RAO, M.A. Rheology of liquid foods. **Journal of Texture Studies**, v. 8, n. 2, p. 135-168, 1977.
- [14] RAO, M.A.; BOURNE, M.C.; COOLEY, H.J. Flow properties of tomato concentrates. **Journal of Texture Studies**, v. 12, n. 4, p. 521-538, 1981.
- [15] 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. 5, p. 1-47.
- [16] REED, B.J.; HENDRIX JR., C.M.; HENDRIX, D.L. **Quality Control Manual for Citrus Processing Plants**, 1<sup>a</sup>.edição. Florida: INTERCIT, 1986.
- [17] SARAVACOS, G.D. Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. **Journal of Food Science**, v. 35, n. 2, p. 122-125, 1970.
- [18] VIDAL, J.R.M.B.; GASPARETTO, C.A.; GRANDIN, A. Efeito da temperatura no comportamento reológico pa polpa de manga. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 1, n. 2, p. 69-76, 2000.
- [19] VITALI, A.A.; ROIG, S.M.; RAO, M.A. Viscosity behavior of concentrated passion fruit juice. **Confructa**, v.19, n.5, p.201-206, 1974.
- [20] VITALI, A.A.; RAO, M.A. Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration. **Journal of Food Science**, v.49, n.3, p.882-88, 1984.