

# Influência da temperatura no comportamento reológico da polpa de jaboticaba

## *Influence of temperature on the rheological behavior of jaboticaba pulp*

Ana Carla Kawazoe SATO<sup>1</sup>, Rosiane Lopes da CUNHA<sup>1\*</sup>

### Resumo

O comportamento reológico em estado estacionário e dinâmico da polpa de jaboticaba foi estudado em diferentes temperaturas (5, 25, 45, 65 e 85 °C). As amostras foram submetidas a ensaios em estado estacionário (0 a 300 s<sup>-1</sup>) para o ajuste dos diferentes modelos de escoamento. O modelo de Herschel-Bulkley foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, no qual se observou a redução do índice de consistência (k) e um leve aumento do índice de comportamento de escoamento (n) com o aumento da temperatura. Ensaios oscilatórios, com valores de tensão dentro do intervalo linear, foram realizados para obtenção dos espectros mecânicos. As amostras analisadas a 5 °C apresentaram maior módulo de armazenamento (G'), indicando uma maior interação entre as partículas a esta temperatura, o que contribui para o fortalecimento da rede elástica. A polpa analisada a 45 °C não apresentou a mesma tendência que as outras temperaturas, o que pode ser um indicio do início da estruturação da pectina natural presente na polpa.

**Palavras-chave:** reologia; temperatura; viscoelasticidade; *Myrciaria jaboticaba*.

### Abstract

The steady state and dynamic rheological behavior of jaboticaba pulp was studied at different temperatures (5, 25, 45, 65 and 85 °C). Flow curves were obtained from 0 to 300 s<sup>-1</sup> and the data were fitted to different models. The Herschel-Bulkley model showed the best fit (R<sup>2</sup> > 0.98) to the experimental data. Increasing the temperature caused a decrease in the consistency index (k) and a slight increase in the flow index (n). Oscillatory rheological measurements were taken in the viscoelastic region to obtain mechanical spectra. The storage modulus (G') of samples stored at 5 °C was much higher than that recorded at other temperatures, indicating more intense particle interactions at this temperature, which contributed to strengthen the elastic network. At 45 °C, the jaboticaba pulp showed a distinct behavior, possibly indicating the beginning of gelation of the pulp's natural pectin.

**Keywords:** rheology; temperature; viscoelasticity; *Myrciaria jaboticaba*.

## 1 Introdução

A jaboticabeira (*Myrciaria* spp.) é uma planta nativa do Brasil, sendo encontrada em extensa faixa do país, desde o Pará até o Rio Grande do Sul. Com maior ocorrência e produtividade nos estados da região Sudeste, é geralmente cultivada como planta de fundo de quintal, em pomares domésticos de chácaras, sítios ou fazendas. Dentre as diversas variedades existentes, a Sabará (*Myrciaria jaboticaba* (Vell.) Berg) é a mais cultivada e com o fruto mais apreciado e mais doce<sup>19</sup>. A jaboticaba é um fruto bastante interessante do ponto de vista nutricional, pois apresenta boa quantidade de niacina, ferro e antocianinas em sua composição<sup>19</sup>. No entanto, a quantidade de informações sobre a jaboticaba na literatura é bastante escassa, principalmente no que se refere às suas propriedades físicas e, conseqüentemente, às suas potencialidades na indústria alimentícia.

Dentre as propriedades reológicas, as curvas de escoamento são as mais importantes para o projeto de tubulações e equipamentos, no controle de qualidade, no desenvolvimento de novos produtos, na aceitabilidade por parte do consumidor, bem como em um melhor entendimento do comportamento estrutural dos produtos<sup>7,28</sup>.

Em função do seu comportamento de escoamento, os fluidos podem ser basicamente classificados como newtonianos, quando a viscosidade do sistema independe da taxa de deformação aplicada, ou não-newtonianos, que podem depender ou não do tempo de cisalhamento. Os comportamentos mais comuns de fluidos alimentícios não-newtonianos independentes do tempo são do tipo pseudoplástico, quando a viscosidade do material diminui com o aumento da taxa de deformação, e o Herschel-Bulkley, cujo comportamento é similar ao pseudo-plástico, mas com tensão residual. A tensão residual ( $\sigma_0$ ) é um importante parâmetro reológico que pode ser utilizado para estimar a espessura do revestimento de superfícies, avaliar a força necessária para que um fluido saia da embalagem, ou dificultar a sedimentação de partículas suspensas. Polpas de frutas como tomate, manga, acerola, cajá, graviola, melão e morango foram caracterizadas na literatura como sendo fluidos pseudoplásticos com tensão residual<sup>8,16,26</sup>.

Além das curvas de escoamento, os ensaios reológicos oscilatórios (dinâmicos) contribuem para a avaliação da estabilidade de suspensões, uma vez que fornecem parâmetros associados ao comportamento estrutural do material, pois neste tipo de ensaio, são utilizadas baixas taxas de deformação, similar ao que ocorre durante a sedimentação das partículas de uma suspensão. Como respostas destes ensaios, são obtidos os módulos de armazenamento (G') e de dissipação (G''), que são analisados em função da frequência ( $\omega$ ) produzindo o denominado "espectro mecânico", considerando que baixas frequências correspondem a grandes intervalos de tempo e vice-versa<sup>17</sup>. De um modo geral, este tipo de ensaio permite classificar uma dispersão como: solução diluída; solução

Recebido para publicação em 1/2/2007

Aceito para publicação em 7/8/2007 (002254)

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia de Alimentos,

Faculdade de Engenharia de Alimentos,

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, CP 6121, CEP 13083-862, Campinas - SP, Brasil,

E-mail: rosiane@fea.unicamp.br

\*A quem a correspondência deve ser enviada

concentrada (sistema de redes entrelaçadas) e gel fraco ou gel forte, dependendo da relação  $G'$  e  $G''$ .

Em massa de tomate, o aumento do conteúdo de sólidos insolúveis e do tamanho das suas partículas levou ao aumento dos valores de  $G'$  e  $G''$ , mostrando a forte influência destas características sobre o comportamento reológico de suspensões<sup>23</sup>.

Durante o processamento de polpas de frutas, frequentemente utilizam-se tratamentos térmicos e/ou resfriamento, o que faz com que o estudo da influência da temperatura sobre o comportamento reológico destes produtos seja de grande importância. De maneira geral, é possível constatar que o aumento da temperatura leva à diminuição gradativa da viscosidade aparente da polpa. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da temperatura no comportamento reológico em estado estacionário e dinâmico da polpa de jaboticaba.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Material

As jaboticabas da variedade Sabará foram adquiridas no CEAGESP/SP e transportadas até Campinas sob refrigeração. A polpa da fruta foi obtida a partir de uma única batelada de processamento. Os frutos foram selecionados manualmente com a finalidade de eliminar jaboticabas verdes e deterioradas. A lavagem foi realizada em solução de cloro (50 ppm) e o despulpamento foi realizado em despulpadeira de facas com tela de 1,6 mm de abertura. As polpas então foram embaladas em porções de aproximadamente 150 g, em embalagens de polietileno de baixa densidade, congeladas e estocadas a  $-18\text{ }^\circ\text{C}$  por um período de até 3 meses.

#### Caracterização da matéria-prima

Análises de umidade (base úmida), açúcares redutores e totais, cinzas, lipídeos, proteínas e acidez total (% ácido cítrico) foram realizadas para a caracterização da polpa de jaboticaba utilizada neste estudo<sup>20</sup>. O teor de polpa foi determinado por centrifugação (3000 rpm por 30 minutos). O conteúdo de sólidos solúveis foi determinado através de um refratômetro de bancada (Zeiss, Alemanha) e expresso em  $^\circ\text{Brix}$ . Um pHmetro analyser 300 (Analyser Com. e Ind. Ltda., Brasil), calibrado com soluções padrão de pH 4,0 e 7,0, foi utilizado para a determinação do pH da polpa.

### 2.2 Medidas reológicas

Os ensaios reológicos em estado estacionário e dinâmico foram realizados em reômetro de tensão controlada, da marca

Carri-Med CSL<sup>2</sup> 500 (TA Instruments, Inglaterra), equipado com placas paralelas em aço inoxidável de 4 e 6 cm de diâmetro. A placa superior era do tipo rugosa para evitar efeitos de escorregamento entre a amostra e a geometria de medida. A distância entre as placas foi de 2,0 mm, determinada a partir de ensaios preliminares. Os ensaios reológicos foram realizados com a temperatura variando entre 5 e 85  $^\circ\text{C}$ . Óleo de silicone foi colocado ao redor da amostra para reduzir a evaporação da água durante a realização dos ensaios a altas temperaturas. Todos os ensaios foram realizados com um mínimo de 3 repetições por amostra, com uma nova amostra para cada repetição.

Nos ensaios oscilatórios, primeiramente foram realizadas varreduras de tensão para a determinação do intervalo de viscoelasticidade linear. Com um valor de tensão fixo que estivesse dentro do intervalo linear, varreduras de frequência de 0,01 a 10 Hz foram efetuadas para a obtenção do espectro mecânico, nas diferentes temperaturas estudadas. O comportamento dos módulos de armazenamento ( $G'$ ) e dissipação ( $G''$ ), assim como os valores médios do ângulo de fase ( $\tan \delta = G''/G'$ ) foram avaliados em função da frequência.

Os ensaios de curvas de escoamento foram realizados dentro do intervalo de taxas de deformação entre 0 e 300  $\text{s}^{-1}$  em três rampas com ciclo crescente, decrescente e crescente, para avaliar e eliminar a tixotropia. Os dados de tensão em função da taxa de deformação, obtidos após a eliminação da tixotropia, foram ajustados aos diferentes modelos de escoamento (Tabela 1). Como parâmetro de controle do ajuste, foi utilizado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Dentre os diferentes modelos que relacionam o efeito da temperatura na viscosidade dos fluidos, o modelo de Arrhenius é o mais utilizado (Equação 1), podendo também ser utilizado para avaliar o efeito sobre o valor de  $k$  (índice de consistência) em fluidos que seguem o comportamento do tipo lei da potência, através da substituição do parâmetro  $\eta_{\text{ap}}$  por  $k^{21}$ .

$$\ln \eta_{\text{ap}} = \left( \frac{E_a}{R} \right) * T^{-1} + B \quad (1)$$

onde  $\eta_{\text{ap}}$  é a viscosidade aparente (Pa.s),  $E_a$  a energia de ativação ( $\text{J.gmol}^{-1}$ ),  $R$  a constante universal dos gases ( $8,3144 \text{ J.gmol}^{-1}.\text{K}$ ),  $T$  a temperatura absoluta (K) e  $B$  o parâmetro de ajuste.

Os valores de viscosidade aparente a 100  $\text{s}^{-1}$  e o índice de consistência obtidos nas diferentes temperaturas foram ajustados ao modelo de Arrhenius.

## 3 Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os dados da caracterização da polpa de jaboticaba utilizada neste trabalho. De um modo geral, a

**Tabela 1.** Modelos reológicos utilizados nos ajustes das curvas de escoamento da polpa de jaboticaba.

Newtoniano	Lei da potência	Plástico de Bingham	Herschel-Bulkley
$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma}$	$\sigma = k \cdot \dot{\gamma}^n$	$\sigma = \sigma_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$	$\sigma = \sigma_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$

$\sigma$  = tensão de cisalhamento (Pa);  $\dot{\gamma}$  = taxa de deformação ( $1/\text{s}$ );  $\eta$  = viscosidade (Pa.s);  $k$  = índice de consistência ( $\text{Pa.s}^n$ );  $n$  = índice de comportamento (-);  $\sigma_0$  = tensão residual (Pa); e  $\mu_p$  = viscosidade plástica (Pa.s).

**Tabela 2.** Características físico-químicas da polpa de jabuticaba.

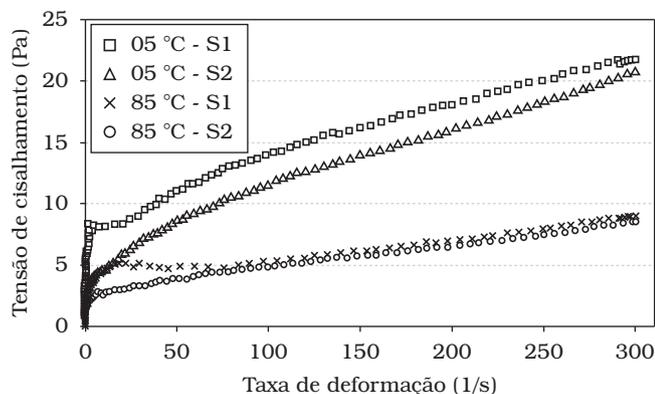
Umidade (%) (base úmida)	85,51	±0,01
Teor de polpa (%)	21,70	±0,30
Açúcares totais (%)	11,80	±0,30
Açúcares redutores (%)	9,80	±0,20
Cinzas (%)	0,34	±0,01
Lipídeos (%)	0,14	±0,02
Proteínas (%)	0,33	±0,04
Acidez ( $\frac{\text{g}_{\text{ácido cítrico}}}{100 \text{ mL}}$ )	1,37	±0,03
Sólidos solúveis (°Brix)	13,00	±0,20
pH	3,22	±0,01

polpa utilizada neste trabalho apresentou características de sólidos solúveis, pH e acidez bastante próximas às das frutas colhidas na região de Casa Branca - SP<sup>18</sup>.

**3.1 Curvas de escoamento**

As curvas de escoamento típicas da polpa de jabuticaba podem ser observadas na Figura 1, em que são apresentados os resultados correspondentes à amostra sem cisalhamento prévio (S1) e em estado estacionário (S2) (sem alteração da viscosidade com o tempo de cisalhamento), mostrando uma histerese que é característica de comportamento reológico dependente do tempo. Nesta figura são apresentadas somente as amostras às temperaturas de 5 e 85 °C, ou seja, a menor e a maior temperatura estudadas, sendo que as demais temperaturas mostraram comportamento intermediário. Esta redução da tensão com o tempo de cisalhamento, indicado pela histerese entre as curvas do primeiro e último ciclo (S1 e S2) é um indício de que a polpa de jabuticaba apresenta comportamento tixotrópico. Neste caso, a área entre as curvas S1 e S2 pode ser utilizada para a avaliação qualitativa desta propriedade<sup>28</sup>. Assim, na Tabela 3 pode-se observar a variação do comportamento tixotrópico em função das diferentes temperaturas estudadas, em que pode-se perceber que a histerese entre as curvas tende a ser menor com o aumento da temperatura, como observado para suco de amora e pasta de gergelim<sup>3,4</sup>.

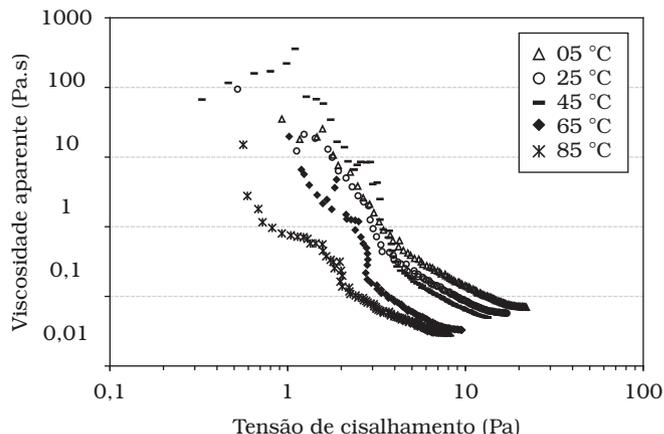
A Figura 2 apresenta as curvas da viscosidade aparente em função da tensão de cisalhamento da polpa de jabuticaba em diferentes temperaturas. Pode-se observar que a polpa de



**Figura 1.** Primeiro ciclo (S1) e último ciclo (S2) de cisalhamento das curvas de escoamento da polpa de jabuticaba a 5 e 85 °C.

**Tabela 3.** Área entre as curvas correspondentes ao primeiro e último ciclo de cisalhamento (tixotropia) nas diferentes temperaturas estudadas.

Temperatura	Tixotropia (Pa.s)
05 °C	631,07
25 °C	441,95
45 °C	438,96
65 °C	201,45
85 °C	218,76



**Figura 2.** Curva de escoamento da polpa de jabuticaba em diferentes temperaturas (5 a 85 °C).

jabuticaba mostrou decréscimo da viscosidade aparente com o aumento da tensão de cisalhamento, o que é característico do comportamento pseudoplástico. A baixas tensões de cisalhamento pode-se observar que a viscosidade aparente tende a infinito, indicando a possível presença de tensão residual. Também pode-se observar um platô nas curvas de escoamento entre 1 e 3 Pa, principalmente nas temperaturas mais elevadas, o que pode ser atribuído ao efeito de escorregamento<sup>6</sup> entre geometria de medida e amostra, indicando que o uso de superfície rugosa não permitiu a completa eliminação deste problema. Avaliando o efeito da temperatura, pode-se observar que a altas tensões de cisalhamento, a viscosidade decresce significativamente com o aumento da temperatura. No entanto, a baixas tensões (até 4 Pa), a viscosidade das amostras nas menores temperaturas (5 a 45 °C) mostram valores similares, indicando menor influência da temperatura a baixas tensões de cisalhamento.

As curvas de escoamento obtidas nas diferentes temperaturas foram ajustadas a diferentes modelos reológicos (Tabela 1), e o modelo de Herschel-Bulkley (HB) foi o que melhor descreveu o comportamento da polpa de jabuticaba (Tabela 4). Este comportamento de escoamento foi observado em diversos fluidos alimentícios, como polpa de açaí<sup>10</sup>, suco de acerola<sup>27</sup>, pasta de amendoim<sup>12</sup> e molho de tomate<sup>22</sup>. O modelo Lei da Potência também apresentou um razoável ajuste ao comportamento de escoamento da polpa de jabuticaba, com elevado coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), o que se deveu aos baixos valores de tensão residual obtidos pelo ajuste do modelo HB (de 1 a 2 Pa), o qual equivale matematicamente ao modelo Lei da Potência com a adição de mais um parâmetro, que é a tensão residual.

**Tabela 4.** Parâmetros de ajuste de diferentes modelos ao comportamento reológico da polpa de jabuticaba.

Modelo	Parâmetros	5 °C	25 °C	45 °C	65 °C	85 °C
Newtoniano	$\eta$ (Pa.s)	0,08	0,06	0,05	0,04	0,03
	$R^2$	0,746	0,725	0,718	0,745	0,712
Lei da potência	$k$ (Pa.s <sup>n</sup> )	1,36	1,11	1,08	0,99	0,66
	$n$	0,47	0,46	0,45	0,43	0,47
	$R^2$	0,990	0,985	0,972	0,969	0,975
Plástico de Bingham	$\sigma_0$ (Pa)	4,17	3,28	3,03	2,25	1,74
	$\mu_p$ (Pa.s)	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02
	$R^2$	0,957	0,961	0,965	0,963	0,967
Herschel-Bulkley	$\sigma_0$ (Pa)	1,62	1,55	1,82	1,49	1,05
	$k$ (Pa.s <sup>n</sup> )	0,71	0,48	0,34	0,27	0,20
	$n$	0,58	0,60	0,65	0,66	0,67
	$R^2$	0,997	0,995	0,993	0,985	0,990

De maneira geral, é possível notar que o aumento da temperatura levou à redução do índice de consistência ( $k$ ) da polpa de jabuticaba, refletindo uma consequente redução na viscosidade aparente da polpa. Em relação ao índice de comportamento ( $n$ ), foi observado somente um pequeno aumento deste parâmetro com o aumento da temperatura, indicando pouca influência da temperatura na pseudoplasticidade do sistema<sup>25</sup>.

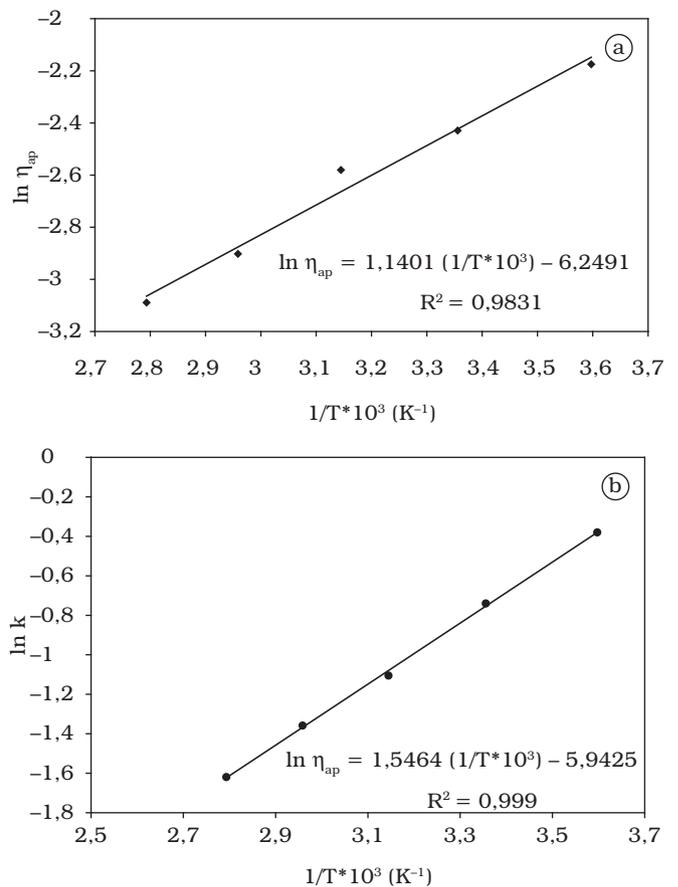
Na Figura 3, pode-se observar o ajuste do modelo de Arrhenius para a viscosidade aparente em uma taxa de deformação de  $100 \text{ s}^{-1}$ , valor característico de diversos processos aplicados a alimentos (Figura 3a), e para o índice de consistência (Figura 3b) da polpa de jabuticaba em função da temperatura.

Comparando os parâmetros obtidos pelo ajuste dos dados de índice de consistência com os da viscosidade aparente em função do inverso da temperatura, nota-se que os valores de energia de ativação com base na viscosidade aparente ( $E_a$ ) foram levemente inferiores aos valores obtidos com base no índice de consistência ( $E_{ak}$ ) (Tabela 5), tal como observado por VITALI e RAO<sup>30</sup> e AHMED<sup>1</sup>.

**Tabela 5.** Parâmetros obtidos pelo ajuste do modelo de Arrhenius com base na viscosidade aparente ( $100 \text{ s}^{-1}$ ) e índice de consistência ( $k$ ).

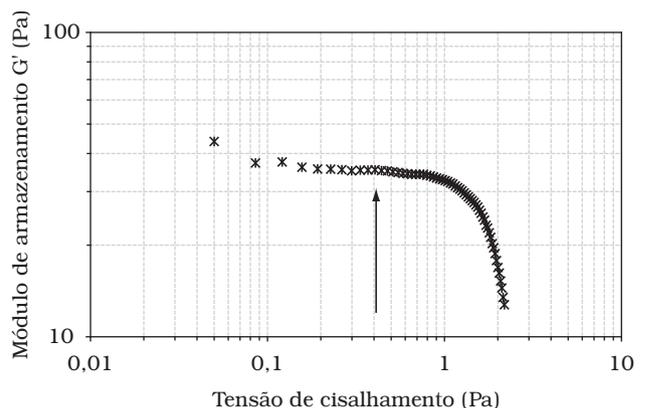
	$E_a$ (kcal.gmol <sup>-1</sup> )	B
$\eta_{ap}$ ( $100 \text{ s}^{-1}$ )	2,26	-6,2491
$k$ (Pa.s <sup>n</sup> )	3,11	-5,9425

Quando comparada com materiais de baixa viscosidade, como o suco de maçã ( $E_a$  equivalente a 3,52 e 5,31 kcal.gmol<sup>-1</sup> para sucos com e sem pectina, respectivamente), e viscosidade bastante elevada, como o purê de pêra ( $E_a = 1,90 \text{ kcal.gmol}^{-1}$ ) e polpa de açaí ( $E_a = 1,5 \text{ kcal.gmol}^{-1}$ )<sup>2,24</sup>, a polpa de jabuticaba apresenta energia de ativação ( $E_a$ ) intermediária. Através da energia de ativação, é possível avaliar o efeito da temperatura sobre os parâmetros reológicos do fluido, de modo que quanto maior for o valor de  $E_a$ , maior será a influência da temperatura. Assim, a viscosidade aparente de purês de frutas diminui moderadamente com o aumento da temperatura, enquanto que a de sucos clarificados apresenta um declínio mais intenso. Esta diferença pode ser atribuída à presença da polpa suspensa nos purês, uma vez que a temperatura não tem grande influência nas propriedades de escoamento de sólidos.

**Figura 3.** Efeito da temperatura sobre: a) viscosidade aparente ( $100 \text{ s}^{-1}$ ) e b) índice de consistência da polpa de jabuticaba.

### 3.2 Comportamento reológico a baixas deformações – ensaios oscilatórios

A Figura 4 apresenta o comportamento típico de  $G'$ , parâmetro associado ao comportamento elástico do sistema, em função da tensão para a polpa de jabuticaba. A varredura de tensão é fundamental para a avaliação do intervalo de viscoelasticidade linear, permitindo mensurar o valor máximo de

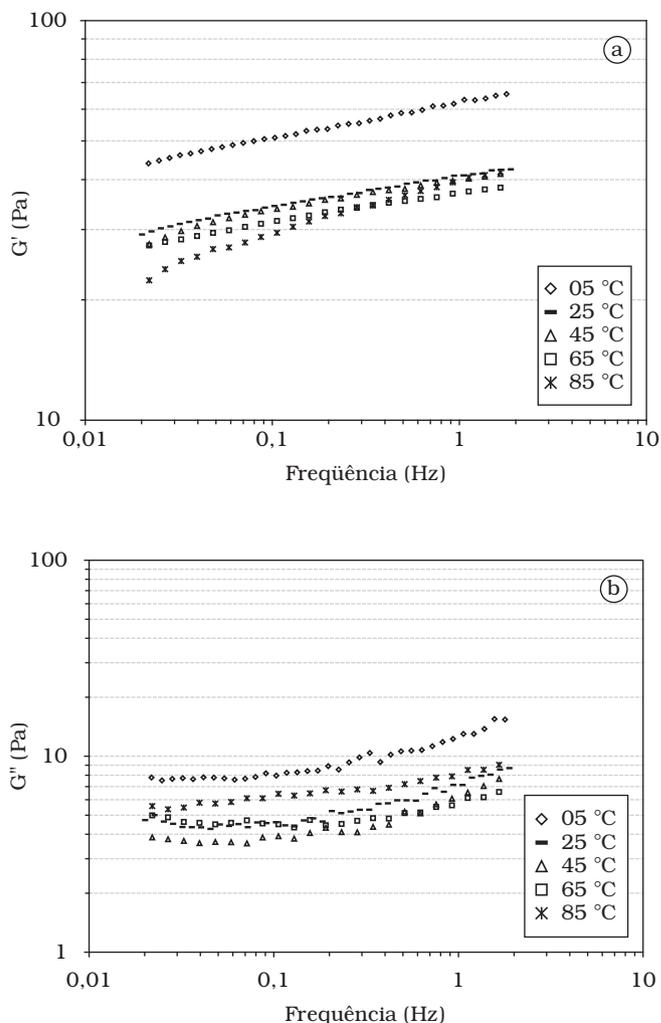
**Figura 4.** Varredura de tensão a  $25 \text{ °C}$  ( $f = 0,1 \text{ Hz}$ ) para determinação do intervalo de viscoelasticidade linear da polpa de jabuticaba; e a seta indica a tensão máxima, a partir da qual a amostra deixa de estar no intervalo linear ( $\sigma_{lim}$  - limite de linearidade).

tensão no qual não há quebra nem alterações na estrutura da amostra. O limite da linearidade pode ser determinado quando propriedades reológicas dinâmicas ( $G'$  e  $G''$ ) em uma varredura de tensão ou deformação, passam a variar fortemente após um intervalo em que estes valores se mantêm praticamente constantes<sup>13</sup>. Na Figura 4 pode-se observar que o intervalo de viscoelasticidade linear está localizado em tensões de cisalhamento inferiores a 0,4 Pa, pois a partir deste valor o módulo de armazenamento ( $G'$ ) passou a decrescer rapidamente.

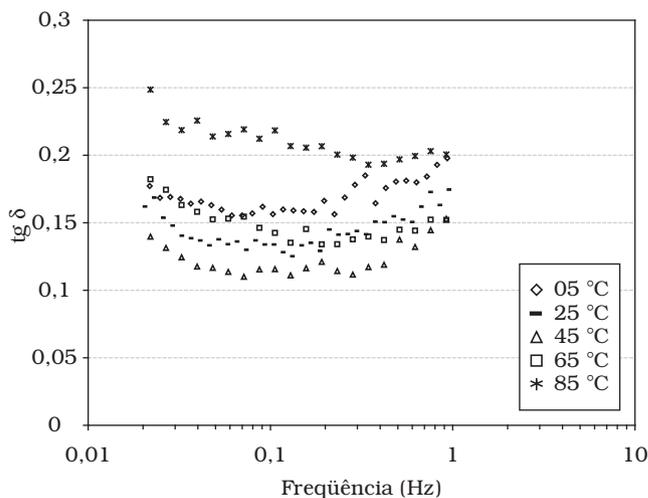
Na Figura 5 encontram-se representados os espectros mecânicos da polpa de jabuticaba, obtidos com valores de tensão dentro do intervalo linear, em que pode-se observar o comportamento dos módulos de armazenamento ( $G'$ ) e dissipação ( $G''$ ) em função da frequência, nas diferentes temperaturas estudadas. De maneira geral, foi observada uma pequena dependência dos valores de  $G'$  e  $G''$  com a frequência, porém com comportamento predominantemente elástico, ou seja, os valores de  $G'$  foram superiores a  $G''$  em todos os valores de frequência aplicados. No entanto, a relação  $G'/G''$  mostrou valores sempre inferiores a 10, o que permite classificar a polpa estudada como um gel fraco como observado para o purê de batata e de batata doce<sup>5,14</sup> e para "ketchup" e outros derivados de tomate<sup>23,29</sup>.

De maneira geral, pode-se observar que o aumento da temperatura levou a uma redução na diferença entre os valores de  $G'$  e  $G''$  (Figura 5), conforme observado no purê de batata doce<sup>14</sup>, sendo observado também um pequeno aumento da dependência com a frequência. Os ensaios realizados a 5 °C apresentaram maiores valores, tanto para  $G'$  quanto para  $G''$ , enquanto que nas amostras analisadas em temperaturas mais elevadas, estes parâmetros permaneceram próximos, não sendo estatisticamente diferentes entre si. Este comportamento foi muito mais pronunciado para  $G'$ , o que pode estar associado a uma maior interação entre as partículas a 5 °C, contribuindo para o fortalecimento da rede elástica. Os resultados obtidos a 45 °C também se destacam dos demais, uma vez que não seguem a tendência das curvas obtidas em outras temperaturas, o que também pode ser observado na Figura 2, a baixos valores de tensão de cisalhamento, e no comportamento de  $\tan \delta$  (Figura 6). Uma das propriedades da pectina é a habilidade em produzir géis fortes, em pH ácido e na presença de sacarose<sup>15</sup>, sendo que a formação da rede de pectina-sacarose depende de ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas, que são funções da temperatura<sup>9</sup>. As ligações de hidrogênio se estabilizam com o abaixamento da temperatura, enquanto que as interações hidrofóbicas são formadas a temperaturas elevadas. Assim, observa-se uma temperatura ótima de gelificação da pectina, o que depende fortemente do seu grau de metoxilação<sup>9</sup>. Assim, com um teor de açúcares e pH em torno de 12% e 3, respectivamente, é possível que a 45 °C tenha ocorrido um início de estruturação da pectina presente na polpa de jabuticaba, resultando em um comportamento diferenciado ao encontrado em outras temperaturas.

Avaliando o comportamento do ângulo de fase ( $\tan \delta$ ) ou razão  $G''/G'$ , é possível perceber a tendência desta relação em permanecer praticamente constante com a variação da frequência, com exceção à temperatura 85 °C. Neste caso,



**Figura 5.** Módulo de a) armazenamento ( $G'$ ); e b) dissipação ( $G''$ ) da polpa de jabuticaba em função da frequência a diferentes temperaturas.  $\diamond$  5 °C;  $\square$  25 °C;  $\Delta$  45 °C;  $\circ$  65 °C; e  $\times$  85 °C.



**Figura 6.** Tangente do ângulo de fase ( $\tan \delta$ ) ou relação  $G''/G'$  em função da frequência a diferentes temperaturas.

observa-se o decréscimo de  $\tan \delta$  com o aumento da frequência, comportamento típico de sólidos viscoelásticos<sup>11</sup>. Este comportamento poderia estar relacionado à evaporação de parte da água do sistema durante o ensaio de varredura de frequência, mesmo com a utilização de silicone ao redor da amostra, levando a polpa a se comportar como um material mais rígido, com o decorrer do ensaio. Em todo o intervalo de frequência para todas as temperaturas estudadas, observa-se que o valor de  $\tan \delta$  variou entre 0,10 e 0,25, o que indica um ângulo de fase entre 5 e 14°, ou seja, um comportamento de sólido viscoelástico.

#### 4 Conclusões

A polpa de jabuticaba integral possui comportamento pseudoplástico com pequena tensão residual, avaliado pelo bom ajuste do comportamento reológico ao modelo de Herschel-Bulkley. O aumento da temperatura levou à redução da viscosidade aparente ( $\eta_{ap}$ ) e do índice de consistência (k), obedecendo à equação de Arrhenius, e a redução da tixotropia dos sistemas. Os ensaios a baixas taxas de deformação permitiram observar um fortalecimento da rede elástica nos ensaios a 5 °C e um comportamento diferenciado nos ensaios realizados a 45 °C, o que pôde ser associado à possível gelificação da pectina presente na polpa.

#### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

#### Referências bibliográficas

- AHMED, J. Rheological behaviour and colour changes of ginger paste during storage. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 39, n. 3, p. 325-330, 2004.
- ALEXANDRE, D. **Conservação da polpa de açaí através da tecnologia de obstáculos e caracterização reológica**. Campinas, 2002. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- ALTAN, A.; KUŞ, S.; KAYA, A. Rheological behaviour and time dependent characterisation of gilaboru juice (*Viburnum opulus* L.). **Food Science and Technology International**, v. 11, n. 2, p. 129-137, 2005.
- ALTAY, F. L.; AK, M. M. Effects of temperature, shear rate and constituents on rheological properties of tahin (sesame paste). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 85, n. 1, p. 105-111, 2005.
- ALVAREZ, M. D.; FERNÁNDEZ, C.; CANET, W. Rheological behaviour of fresh and frozen potato puree in steady and dynamic shear at different temperatures. **European Food Research Technology**, v. 218, n. 6, p. 544-553, 2004.
- BARNES, H. A. A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure. **Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 56, n. 3, p. 221-251, 1995.
- BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An introduction to Rheology**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. 199 p.
- BHATTACHARYA, S. Yield stress and time-dependent rheological properties of mango pulp. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 6, p. 1029-1033, 1999.
- BRANDÃO, E. M., ANDRADE, C. T. Influência de fatores estruturais no processo de gelificação de pectinas de alto grau de metoxilação. **Polímeros**, n. 3, v. 9, p. 38 a 44.
- CARNEIRO, F. R. B. D. **Conservação de Polpa de Açaí por Métodos Combinados**. Campinas, 2000. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- CEPEDA, E. et al. Rheological behaviour of blueberry cloudy juice (*Vaccinium corymbosum* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 37, n. 3, p. 271-276, 2002.
- CITERNE, G. P.; CARREAU, P. J.; MOAN, M. **Rheological properties of peanut butter**. *Rheologica Acta*, v. 40, n. 1, p. 86-96, 2001.
- DAVIS, S. S. Rheological properties of semi-solid foodstuffs. **Journal Texture Studies**, v. 4, n. 1, p. 15-40, 1973.
- FASINA, O. O. et al. Viscoelastic properties of restructured sweetpotato puree. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 38, n. 4, p. 421-425, 2003.
- FENNEMA, O. R. **Food Chemistry**. New York: M. Dekker, 2ª ed., 1985. 991 p.
- FREITAS, I. C. **Estudo das interações entre biopolímeros e polpas de frutas tropicais em cisalhamento estacionário e oscilatório**. Campinas, 2002. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- GIBOREAU, A.; CUVELIER, G.; LAUNAY, B. Rheological behaviour of three biopolymer/water systems, with emphasis on yield stress and viscoelastic properties. **Journal of Texture Studies**, v. 25, n. 2, p. 119-137, 1994.
- OLIVEIRA, A. L. et al. Caracterização tecnológica de jabuticabas 'Sabará' provenientes de diferentes regiões de cultivo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n. 3, p. 397-400, 2003.
- PEREIRA, M. **Propagação via estacas apicais, caracterização morfológica e molecular de jabuticabeiras (*Myrciaria* spp)**. Piracicaba, 2003. Tese (Doutor em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- RANGANNA, S. **Manual of analysis of fruit and vegetable products**. New Dehi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1977, 634 p.
- RAO, M. A. **Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications**. Maryland: Aspen Publishers Inc., 1999. 433 p.
- RAO, M. A.; COOLEY, H. J. Rheological behavior of tomato pastes in steady and dynamic shear. **Journal of Texture Studies**, v. 23, n. 4, p. 415-425, 1992.
- SÁNCHEZ, M. C. et al. Influence of processing on rheological properties of tomato paste. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 82, n. 9, p. 990-997, 2002.
- 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.
- SARAVACOS, G. D.; KOSTAROPOULOS, A. E. Transport properties in processing of fruits and vegetables. **Food Technology**, v. 49, n. 9, p. 99-105, 1995.

26. SHARMA, S. K. et al. Effect of composition on the rheological properties of tomato thin pulp. **Food Research International**, v. 29, n. 2, p. 175-179, 1996.
27. SILVA, F. C.; GUIMARÃES, D. H. P.; GASPARETTO, C. A. Reologia do suco de acerola: efeitos da concentração e temperatura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 121, 2005.
28. STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering**. Michigan: Freeman Press, 2<sup>a</sup> ed, 1996. 418 p.
29. VALENCIA, C. et al. Linear viscoelasticity of tomato sauce products: influence of previous tomato paste processing. **European Food Research Technology**, v. 214, n. 5, p. 394-399, 2002.
30. 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. 882-888, 1984.