

CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DA POLPA DE ARATICUM (ANNONA CRASSIFLORA MART)

C. G. RODRIGUES¹, R. C. C. DOMINGUES¹, W. A. SILVA.¹, M. H. M. REIS² L. A.
CARLOS¹ e F. C. CALLEGARI³

¹ Universidade Federal de São João Del-Rei – Departamento de Engenharia de Alimentos

² Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Química

³ Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: ruidomingues@ufsj.edu.br

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi avaliar a reologia da polpa filtrada de Marolo (*Annoma crassiflora*) variando-se a temperatura entre 10 e 40°C, utilizando-se os modelos reológicos de Bingham, Herschel-Bulkley e Ostwald-de-Waele para o ajuste dos dados experimentais. Foi utilizado um viscosímetro Brookfield LVDV-II + PRO com configuração de cilindros concêntricos. Os modelos reológicos foram analisados utilizando o software Statistica 7, sendo os parâmetros dos modelos não-lineares estimados pelo método de Gauss-Newton. A polpa de marolo filtrada apresentou caráter pseudo-plástico. O modelo que melhor representou os dados experimentais foi o modelo de Herschel-Bulkley, apresentando índices de fluidez na faixa de $n=0,73$, índices de consistência na faixa de $79,79 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, e ausência significativa de tensão residual par ao escoamento. Não foi observada influência significativa das viscosidades aparentes com o aumento da temperatura.

1. INTRODUÇÃO

Dentre vários países produtores de frutas, o Brasil é considerado o terceiro maior, com produção em torno de 34 milhões de toneladas, numa área de 2,2 milhões de hectares, proporcionando 4 milhões de emprego e PIB agrícola de US\$ 11 bilhões. (SIMON, 2001). De acordo com a FAO (Food ad Agriculture Organization, 2014) o comércio de frutas atingiu, em 2000, algo em torno de 10%, da produção mundial de frutas e hortaliças, com tendência de crescimento em função da preferência dos consumidores por frutas e vegetais frescos.

O bioma do Cerrado é o maior bioma brasileiro, apresenta diversos ecossistemas e diversificada flora, com mais de 12000 espécies de plantas. Cerca de 110 espécies de plantas possuem potencial econômico, incluindo fruteiras, palmeiras, madeiras, medicinais, condimentares e oleaginosas. Apesar de tanta riqueza, suas frutíferas tem sido pouco utilizadas. Seus frutos apresentam sabores característicos, proteínas, sais minerais, ácidos graxos, vitaminas do complexo B e carotenóides, além de atrativos sensoriais como cor, sabor, aroma peculiares e intensos. Entretanto são pouco explorados comercialmente. (SILVA *et al.*, 2001).

Dentre os frutos do cerrado, o Marolo, também conhecido por araticum, panã ou cabeça de nego (*Annoma crassiflora* Mar), representa bem as características descritas, como por exemplo, composição rica em vitaminas além de ferro, fósforo e cálcio (ALMEIDA, 1998). Sua polpa é consumida por populações locais em sua grande maioria *in natura* ou em forma de sorvetes, sucos ou geleias (SILVA *et al.*, 2001); de aparência arenosa, disposta em vários gomos amarelados contendo sementes em cada um, de sabor e aroma característicos. (Figura 1).

Na indústria de transformação de alimentos, utiliza-se a polpa da fruta que será submetida a etapas durante o processamento, como por exemplo agitação, bombeamento e transporte por tubulações. Para que essas etapas sejam economicamente otimizadas, é de fundamental importância conhecimentos de propriedades físicas e químicas da polpa submetida a tais processos. Uma dessas propriedades é o comportamento reológico, que ocupa uma posição de destaque, tornando-se útil além da medida de qualidade, como também em execução de projetos, aquisição, avaliação e operação de equipamentos processadores de alimentos tais como as bombas, sistemas de agitação, tubulações (IBARZ *et al.*, 1996).

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho consiste na caracterização reológica da polpa de Marolo, efetuada no Laboratório de Ciência e Tecnologia de Alimentos I, da UFSJ/ Campus Sete Lagoas MG.



Figura 1- Marolo, corte transversal.
Fonte Arquivo Pessoal

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada como matéria-prima polpa de Marolo (*Annona crassiflora* Mart.) adquirida na região de Sete lagoas – MG. A polpa foi previamente filtrada usando tecido malha fina, do tipo “amorim” e mantida congelada a -18°C e descongelada até temperatura ambiente para utilização nos experimentos.

As viscosidades foram analisadas com o auxílio de um viscosímetro digital Brookfield LVDV-II+ PRO, com geometria de cilindros concêntricos. Um banho ultratermostatizado foi utilizado para o controle da temperatura das amostras no decorrer dos experimentos. As viscosidades foram analisadas às temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40°C . Foi utilizado um adaptador que acoplado ao banho ultratermostatizado permitiu o controle da temperatura durante as análises (Figura 2) sendo que para cada temperatura analisada a rotação do *spindle* foi variada buscando aplicar o maior espectro de taxas de deformação possível. Foi verificado que essa faixa foi de 0 a $14,72\text{ s}^{-1}$ para todas as amostras.



Figura 2- A) Viscosímetro, B) Spindle e adaptador de amostra.
Fonte Arquivo Pessoal

2.1. Cálculo dos parâmetros dos modelos reológicos

Os valores experimentais obtidos em relação a tensão de cisalhamento e taxa de deformação foram ajustados, através de regressão não linear, aos modelos de reológicos de Bingham (Equação 1), Herschel-Bulkley (Equação 2) e Ostwald-de-Waele (Equação 3).

$$\tau = K_{0,B} + K_B(\dot{\gamma}) \quad (1)$$

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

$$\tau = K_{ow}(\dot{\gamma})^{n_{ow}} \quad (3)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento (Pa), $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação (s^{-1}), K_B , K_{HB} , K_{ow} são os índices de consistência ($mPa \cdot s$), $K_{0,B}$ e $K_{0,HB}$ (Pa) são as tensões residuais dos respectivos modelos. Os parâmetros n_B , n_{HB} e n_{ow} (adimensionais) são os índices de fluxo.

Os parâmetros reológicos foram determinados a partir do ajuste dos dados experimentais de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação com cada equação apresentada. Este ajuste foi realizado com o auxílio do software Statística 7.0 (Statsoft) utilizando o método de Gauss-Newton.

O efeito da temperatura sobre a viscosidade aparente foi descrito mediante uma equação análoga à de Arrhenius (IBARZ *et al.*, 2003), conforme apresentado na Equação (4).

$$\eta_a = \eta_\infty \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

Onde η_a é a viscosidade aparente ($mPa \cdot s$), η_∞ é a viscosidade à deformação infinita, R é a constante universal dos gases, E_a é a energia de ativação para o escoamento e T (K) a temperatura.

A Equação (4) 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 (SILVA *et al.*, 2005).

A temperatura pode afetar diferentes parâmetros reológicos como a viscosidade, índice de consistência e tensão residual. Usualmente decréscimo na viscosidade e índices de consistência são observados com o aumento da temperatura (IBARZ *et al.*, 2003).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para polpa de Marolo filtrada nas temperaturas avaliadas:

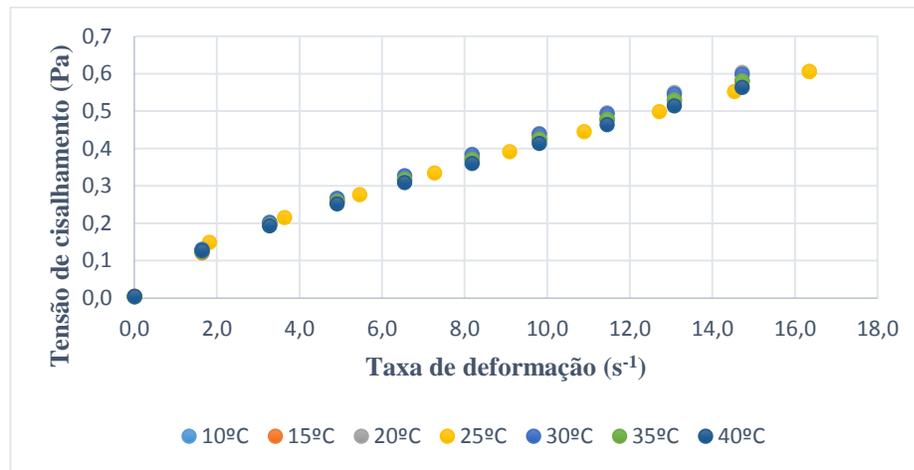


Figura 3 – Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para polpa filtrada de Marolo

Na Figura 3 não é observada variação aparente da viscosidade das amostras com a temperatura. Este comportamento pode ser também notado na Figura 4:

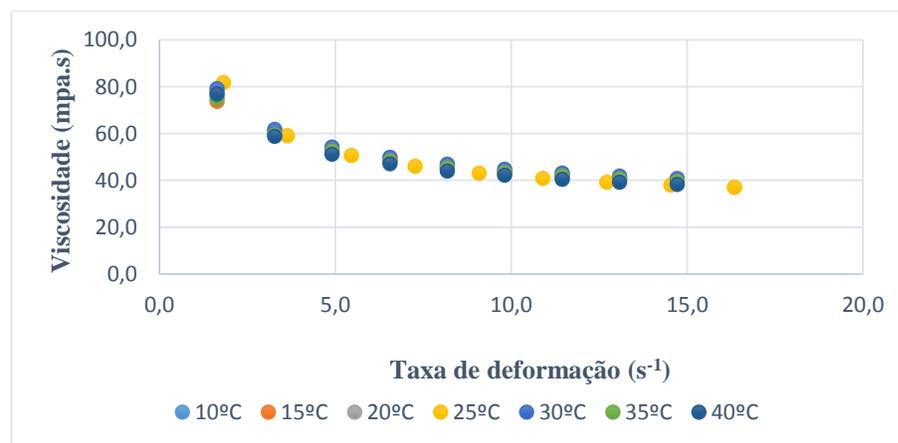


Figura 4 – Viscosidade aparente em função da taxa de deformação para polpa filtrada de Marolo

Em uma análise preliminar, a Figura 3 apresenta um comportamento de aparente linearidade entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento para todas as amostras, indicando comportamento Newtoniano. Entretanto, observando a Figura 4, percebe-se que a viscosidade aparente diminui a taxa de deformação aplicada, o que sugere comportamento pseudo-plástico. A modelagem matemática dos dados de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, conforme apresentado na Tabela 1, confirma as características das curvas.

Tabela 1 Parâmetros Reológicos para polpa de Marolo

| Modelo | Parâmetro | Unidade | Temperatura (°C) | | | | | | |
|-------------------------|------------|------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Bingham | $K_{0,B}$ | $N \cdot m^{-2}$ | 0,057 | 0,055 | 0,056 | 0,068 | 0,058 | 0,055 | 0,057 |
| | K_B | $mPa \cdot s$ | 36,80 | 37,20 | 38,60 | 33,70 | 38,10 | 37,20 | 35,80 |
| | R^2 | | 0,906 | 0,01 | 0,855 | 0,414 | 0,531 | 0,813 | 0,494 |
| Ostwald-de-Waele | K_{OW} | $mPa \cdot s$ | 82,90 | 96,00 | 84,60 | 93,10 | 89,90 | 82,50 | 86,60 |
| | n_{OW} | | 0,72 | 0,65 | 0,73 | 0,66 | 0,70 | 0,72 | 0,69 |
| | R^2 | | 0,982 | 0,959 | 0,986 | 0,976 | 0,986 | 0,988 | 0,984 |
| Herschel-Bulkley | $K_{0,HB}$ | $N \cdot m^{-2}$ | 0,004 | 0,005 | 0,004 | 0,007 | 0,004 | 0,003 | 0,005 |
| | K_{HB} | $mPa \cdot s$ | 80,80 | 77,50 | 80,70 | 80,70 | 81,80 | 79,00 | 78,00 |
| | n_{HB} | | 0,73 | 0,74 | 0,74 | 0,71 | 0,73 | 0,74 | 0,73 |
| | R^2 | | 0,999 | 1 | 1 | 0,999 | 1 | 1 | 0,999 |

R^2 – Coeficiente de determinação

O Modelo de Bingham pressupõe que exista uma linearidade entre a taxa de deformação e tensão de cisalhamento de um fluido e também a presença de uma tensão residual para o escoamento. Observa-se pelos resultados da Tabela 1 que o modelo de Bingham fora o que representou de forma menos satisfatória os dados experimentais, por ter apresentado os menores valores de R^2 em todas as temperaturas analisadas.

Os modelos de Ostwald-de-Waele (também conhecido como Power Law) e Herschel-Bulkley apresentaram em todas as temperaturas valores de R^2 próximos da unidade, o que indica uma boa representação dos modelos aos dados experimentais, sendo o modelo de Herschel-Bulkley ligeiramente mais preciso. O valor do parâmetro Índice de fluxo (n_{HB} e n_{OW}) indicam o grau de pseudo-plasticidade da amostra, sendo que quanto mais próximo da unidade, mais a mesma se comporta como um fluido Newtoniano. Analisando os valores do índice de fluxo a todas as temperaturas, nos modelos de Ostwald-de-Waele e Herschel-Bulkley foram observados valores médios de 0,7 (desvio médio $\pm 0,025$) e 0,73 ($\pm 0,01$) respectivamente, mostrando variação desprezível dos parâmetros com a temperatura. Tendo em vista que todos os valores observados foram menores que 1, é possível se classificar a polpa filtrada de Marolo como um fluido pseudo-plástico em toda a faixa de temperaturas analisada.

Os parâmetros índice de consistência (K_{HB} e K_{OW}) apresentaram Valores médios de 87,94

($\pm 4,33$) e 79,79 ($\pm 1,39$) $mPa \cdot s$ para o modelo de Ostwald-de-Waele e Herschel-bulkley respectivamente. A ordem de grandeza do desvio médio dos valores também leva a conclusão de que os índices de consistência não variam na faixa de temperaturas avaliada.

O modelo de Herschel-Bulkley considera a presença da tensão residual para o escoamento, e os valores dos parâmetros $K_{0,HB}$ observados a todas as temperaturas se encontram na ordem de $10^{-3} N \cdot m^{-2}$ podendo ser desprezados. Dessa forma, admite-se que a polpa de Marolo filtrada não necessita da aplicação de uma tensão para que se inicie o escoamento.

O ajuste da viscosidade aparente medida na taxa de deformação de $8,18 s^{-1}$ em função da temperatura de acordo com a Equação (4) determinou valores de $\eta_{\infty} = 0,449 mPa \cdot s$ e $E_a = 0,543 J \cdot mol^{-1}$. O baixo valor da energia de ativação encontrado confirma a baixa dependência da viscosidade aparente com a temperatura.

O comportamento pseudo-plástico é um comportamento comum em polpas de frutas, sendo o mesmo amplamente reportado na literatura para sucos e polpas de frutas. Segundo Holdsworth (1971) e Ibarz *et al* (2003) a maioria dos alimentos fluidos apresenta comportamento pseudoplástico, sendo a diminuição da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação explicada pelo fato de que sob o efeito de maiores tensões moléculas de cadeia longa tendem a se desembaraçar diminuindo a resistência intermolecular ao escoamento.

4. CONCLUSÕES

Observou-se que o aumento da temperatura, de 15 a 40°C, não provocou alterações significativas na viscosidade aparente da polpa de Marolo filtrada. Em todas as temperaturas analisadas, a polpa de Marolo filtrada apresentou comportamento não-Newtoniano, com característica pseudo-plástica e sem presença de tensão residual. Os modelos que melhor representaram o comportamento reológico foram os modelos de Herschel-Bulckey e Ostwald-de-Waele, apresentando parâmetros similares de índice de consistência e Índice de fluxo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG e a PROPE-UFSJ pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

-ALMEIDA, S. P.; PROENÇA, C. E. B.; SANO, S. M.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado: espécies vegetais úteis**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Brasil (EMBRAPA), Brasil, 1998, p. 48-335.

-FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Disponível em: <<http://apps.fao.org/cgibin/nph-db.pl?subset=agriculture>> Acesso em : 20. abril. 2014.

- HOLDSWORTH, S. D. Applicability of rheological models to the interpretation of low and processing behavior of fluid products. **Journal of Texture Studies**, v.2, n.4, p. 393-418, 1971.
- IBARZ, A.; Barbosa-Cànovas, G. V. Unit operations in food engineering. **Boca Raton: CRC Press**, 2003. 889 p.
- IBARZ, A.; GONÇALVES, C.; EXPLUGAS, S. Rheology of Clarified Passion Fruit Juices. **Fruit Processing**, v.6, n.8, p.330-333, 1996.
- PELEGRINE, D. H.; Silva, F. C.; Gasparetto, C. A. (2002). Rheological Behavior of Pineapple and Mango Pulps. *LWT - Food Science and Technology*, 35, 645-648.
- SILVA, D. B.; SILVA, J. A.; JUNQUEIRA, N. T. V.; ANDRADE, L. R. M. 2001. Frutas nativas dos cerrados. Brasília: EMBRAPA-CPAC, 179 p.
- SILVA, F. C.; Guimarães, D. H. P.; Gasparetto, C. A. (2005). Rheology of acerola juice: effects of concentration and temperature. *Ciência Tecnologia Alimentos* 25, 121-126.
- SIMON, C.W. A importância da fruticultura no contexto do agribusiness. *In: ENFRUTE, IV*, 2001, Fraiburgo. **Anais do IV Encontro Nacional sobre Fruticultura de Clima Temperado**, Fraiburgo, 2001.