

Modelagem reológica de polpas de frutas: manga (*mangifera indica*), goiaba (*psidiumguajava*) e taperebá (*spondiasmombin*)

Rheological modeling of fruit pulps: mango (*mangifera indica*), guava (*psidiumguajava*) and taperebá (*spondiasmombin*)

Wenderson Gomes dos Santos^{1*}, Lincoln Raydison Ferreira Alcantara¹, Josiel Lobato ferreira², Dilson Nazareno Pereira Cardoso², Emerson Cardoso Rodrigues², Romero Moreira Oliveira²

RESUMO

O comportamento reológico de polpa de frutas permite a obtenção de importantes informações sobre seu escoamento em distintas condições e nas diversas etapas do processo. Assim, neste trabalho se verificou o comportamento reológico de polpas de goiaba, manga e taperebá. Os ensaios foram realizados em um viscosímetro de cilindros coaxiais Haake, modelo VT 550, com copo SV e sensor (Spindler) tipo SV₁, em temperatura ambiente. O tempo de experimento foi de 180 segundos a uma faixa de taxa de cisalhamento de 0 a 600 s⁻¹. Foram feitas comparações nas curvas de fluxo e viscosidade aparente das três amostras de polpa de frutas fornecidos por uma empresa da área de alimentos do polo industrial de Manaus. Os resultados, mostraram que as polpas em geral apresentaram comportamento de fluido não-Newtonianos, apresentando também correlações entre as tensões de cisalhamentos e as viscosidades aparentes das três amostras, em relação aos seus constituintes particulados de fibras solúveis e insolúveis. Na modelagem foi possível identificar o caráter pseudoplástico de todas as polpas e verificar que os modelos não newtonianos, empregados neste estudo, podem predizer os dados experimentais com efetividade, apresentando valores para R² superiores a 0,958.

Palavras-chave: Modelos reológicos; Reologia de alimentos; Modelos não newtonianos.

ABSTRACT

The rheological behavior of fruit pulp allows obtaining important information about its flow under different conditions and at different stages of the process. Thus, in this work, the rheological behavior of guava, mango and taperebá pulps was verified. The tests were performed in a Haake coaxial cylinder viscometer, model VT 550, with SV cup and SV₁ type sensor (Spindler), at room temperature. The experiment time was 180 seconds at a shear rate range from 0 to 600 s⁻¹. Comparisons were made in the flow curves and apparent viscosity of the three samples of fruit pulp supplied by a food company in the industrial center of Manaus. The results showed that the pulps in general presented non-Newtonian fluid behavior, also showing correlations between the shear stresses and the apparent viscosities of the three samples, in relation to their particulate constituents of soluble and insoluble fibers. In the modeling, it was possible to identify the pseudoplastic character of all pulps and to verify that the non-Newtonian models, used in this study, can effectively predict the experimental data, presenting values for R² greater than 0.958.

Keywords: Rheological models; food rheology; Non-newtonian models.

¹ Universidade Federal do Amazonas

*E-mail: wenderson@ufam.edu.br

² Universidade Federal do Pará

INTRODUÇÃO

As frutas tropicais, principalmente as da região amazônica apresentam enorme visibilidade na indústria de alimentos, em grande parte, pelos atributos conferidos ao sabor, aroma e possibilidades de utilização doméstica e agroindustrial de suas polpas. A polpa é uma das partes mais manipuladas do fruto, muito empregado, no preparo de geleias, compotas, doces, cremes entre diversos outros produtos na indústria de alimentos e de cosméticos. O consumo de sucos processados vem aumentando a cada dia, motivado pela falta de tempo da população em preparar suco das frutas in natura, pela praticidade que tais produtos oferecem e pela substituição ao consumo de bebidas carbonatadas devido ao seu valor nutritivo e preocupação com o consumo de alimentos mais saudáveis (MATSUURA, 2002; COSTA *et al*, 2020).

Na indústria de alimentos, o processamento de polpas de frutas é realizado controlando fatores como a temperatura e as propriedades físicas do produto, com a finalidade de evitar a degradação dos micros e macro nutrientes. Um dos métodos mais empregados para a análise e caracterização das frutas é baseado no seu comportamento reológico (EVANGELISTA; VIEITES, 2006).

A crescente necessidade e procura dos parâmetros reológicos, para os diversos fluidos manipulados nas indústrias de processamento está ligada também a grande importância econômica que estes fluidos e equipamentos processadores representam atualmente (BEZERRA; QUEIROZ; GASPARETTO, 2001). O conhecimento do comportamento reológico de sucos, concentrados ou não, é útil não só para o controle de qualidade do produto, mas principalmente no projeto de tubulações e bombas, sistemas de agitação e mistura esterilização, estocagem, concentração, resfriamento e outros (VASQUES, 2003).

Conforme aplica-se uma tensão de cisalhamento sobre o fluido, as partículas sólidas começam a ordenar-se na mesma direção do fluxo de escoamento, fazendo com que haja uma queda na viscosidade aparente e redução da resistência do fluido a tensão aplicada (MELO *et al*, 2020). Esse é um atributo dado a um comportamento comum para polpas de frutas, pois a maior parte destas representa-se na forma de sólidos dispersos em meios líquidos. O decréscimo da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação pode ser explicado pela mudança estrutural da amostra devido às forças hidrodinâmicas geradas e o maior alinhamento das moléculas na direção da tensão aplicada

(ALPARSLAN; HAYTA, 2002).

Sabe-se que quanto menor a viscosidade de um fluido, menor é a perda de carga durante o escoamento, o que resulta em um menor gasto de energia. Logo esse trabalho tem como objetivo a avaliação do comportamento reológico da polpa industrializada das polpas de goiaba, manga e taperebá oriundos de uma indústria do polo industrial de Manaus, na busca de melhorias em seu processamento, pois do ponto de vista industrial, a diminuição da viscosidade aparente facilita o escoamento da polpa e a troca de calor durante o processamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

OBTENÇÃO E TRATAMENTO DAS AMOSTRAS

Neste trabalho foram utilizadas polpas de manga, goiaba e taperebá pasteurizadas e congeladas, fornecidas por uma indústria de polpas de frutas localizada em Manaus/AM, estando embaladas em sacos plásticos de polietileno com capacidade de 250mL e dentro do prazo de validade. As amostras foram encaminhadas sobre refrigeração para as determinações analíticas no laboratório de reologia e reometria (REOLAB) da Universidade Federal do Pará.

PREPARO DAS AMOSTRAS E OBTENÇÃO DOS DADOS REOLÓGICOS

As amostras foram descongeladas em banho térmico modelo Thermo Fisher Haake DC50-k35 e em seguida separados em triplicatas em diferentes frascos e identificadas conforme a sequência de obtenção no experimento.

Para a determinação da viscosidade dinâmica, utilizou-se um viscosímetro rotacional (HAAKE Viscotester modelo VT 550), ver figura 1. O equipamento possui diferentes modelos de spindles, que possuem variação geométrica conforme a viscosidade de cada fluido. Para essa pesquisa foi utilizado a configuração cilindros coaxiais copo SV e cilindros SV₁, as amostras foram inseridas no viscosímetro, na qual foi programada uma temperatura constante de 28°C. Para a obtenção das curvas de fluxo reológicas e obtenção dos modelos reológicos de fluidos não newtonianos das polpas, utilizou-se a metodologia das curvas de fluxo, isto é: Curva ascendente - Rampa de aumento de taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) de 0 a 600 s⁻¹ em 180 s. Os valores de tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade aparente foram ajustados a modelos reológicos independentes

do tempo de Bingham, Herschel-Bulkley, Ostwald-de-Waele (Lei da Potência), Casson, Carreau Yasuda e Newton, sendo utilizado para isso o próprio software computacional do equipamento (ThermoScientific™ HAAKE™ RheoWin™. O ajuste dos modelos aos dados experimentais foi determinado pelo valor do coeficiente de determinação (R^2).

Figura 1 – Viscosímetro rotacional modelo Haaeke VT550



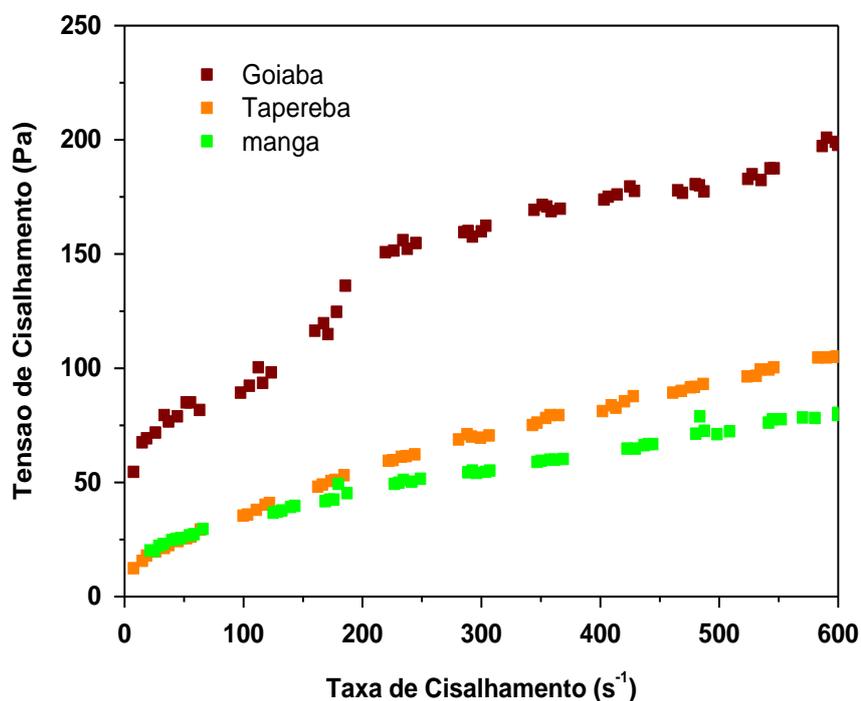
Fonte: Autores (2022)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 representa os dados do comportamento reológico, relacionando a tensão de cisalhamento *versus* taxa de cisalhamento, das polpas de frutas industrializadas (manga, goiaba e taperebá). Através das análises reológicas é possível verificar a natureza e o comportamento pseudoplástico das amostras e a redução da viscosidade durante o processo de cisalhamento da amostra.

Verificou-se o incremento da tensão de cisalhamento à medida que a taxa de cisalhamento aumentava, este comportamento pode ser explicado devido as polpas de frutas em sua maioria serem sistemas bifásicos e apresentarem características de um fluido pseudoplástico, possuindo uma resistência inicial devido as interações intermoleculares que conferem ao material um comportamento semelhante ao de sólidos, necessitando de uma tensão residual para que se inicie o fluxo de escoamento. Essa característica é fortemente influenciada pelas complexas interações entre os açúcares solúveis, substâncias pécicas e sólidos suspensos (Feitosa 2018).

Figura 2 – Curvas de fluxo tensão de cisalhamento \times taxa de cisalhamento da polpa de frutas.



Fonte: Autores (2022)

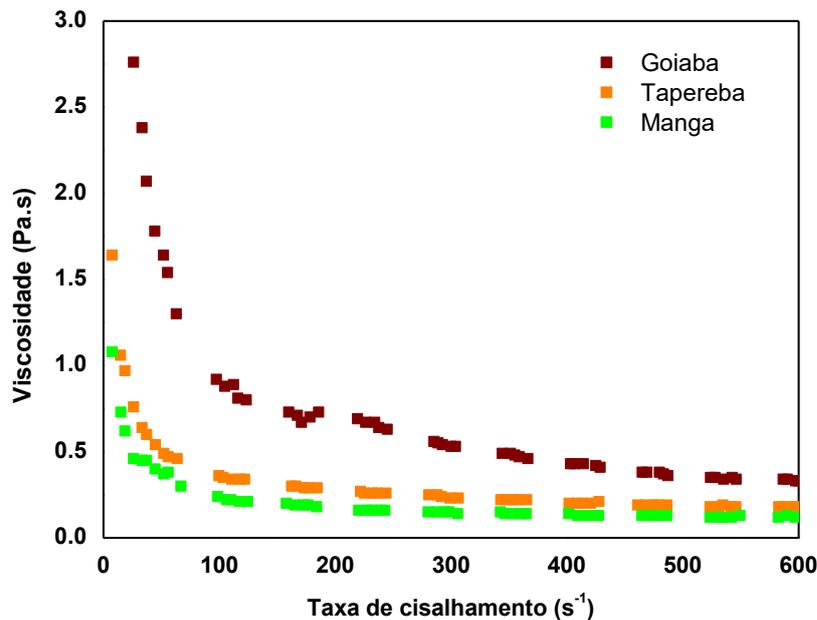
Ainda na figura 02, observa-se que as curvas não apresentaram uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, sendo assim um atributo dado a fluidos não newtonianos. Comportamento semelhante foram encontrados em Melo *et al* (2020) e Guimarães e Mascigrande (2011) que estudaram a reologia das polpas de cupuaçu e açaí, respectivamente.

Comparando-se as curvas tensão *versus* taxa, verifica-se que o experimento com a polpa de goiaba possui tensão de deformação superior ao experimento com polpa de taperebá, que por sua vez é maior em relação ao experimento com polpa de manga, quando se tem a taxa de cisalhamento constante. Nota-se que a taxa de cisalhamento da polpa de goiaba, sofre uma ascensão elevada conforme o aumento da taxa de cisalhamento, atingindo uma tensão de 200 Pa a uma taxa de $600 s^{-1}$, comportamento esse que difere das polpas de manga e taperebá, pois apresentam uma taxa de crescimento da tensão de cisalhamento reduzido, atingindo valores de 80 e 105 Pa, respectivamente à uma taxa de cisalhamento de $600 s^{-1}$.

Os resultados do estudo reológico da viscosidade aparente *versus* taxa de deformação estão representados na Figura 3. Observa-se um decréscimo da viscosidade

aparente, com o aumento da taxa de deformação, demonstrando que as polpas têm comportamento pseudoplástico. Isso se deve pela ordenação das partículas sólidas na mesma direção do fluxo de escoamento, quando se aplica uma tensão de cisalhamento, fazendo com que haja uma queda na viscosidade aparente e redução da resistência do fluido a tensão aplicada (FERREIRA *et al*, 2008).

Figura 3 – Curvas de fluxo viscosidade aparente x taxa de cisalhamento da polpa das frutas.



Fonte: Autores (2022)

Como observado na Figura 3, a viscosidade aparente para a polpa de goiaba apresentou as maiores viscosidades experimentais em relação às demais, devido ao fato que há maior concentração de fibras provenientes da polpa e provavelmente em razão da quantidade de sólidos totais, fatores que proporcionam uma maior resistência ao escoamento do sistema. Pode-se notar que o conteúdo de fibras que compõe cada amostra influencia diretamente no comportamento reológico das polpas, ou seja, quanto maior a quantidade de fibras, maiores serão os valores de tensão de cisalhamento e viscosidade aparente.

Verifica-se para o experimento com polpa de goiaba, três fases de estudo na curva viscosidade aparente versus taxa de cisalhamento. A primeira fase do gráfico, região onde se tem as maiores resistências ao escoamento, corresponde a um decréscimo acentuado

até a taxa de 100 s^{-1} e uma viscosidade no valor de $0,91 \text{ Pa.s}$, a segunda faixa apresenta um caráter linear decrescente de 100 s^{-1} até 460 s^{-1} , a partir desse valor, a faixa se comporta com um caráter constante, e os estudos demonstram uma viscosidade aparente na faixa de $0,36 \text{ Pa.s}$. Para as curvas realizadas com taperebá e manga, foi possível analisar apenas duas faixas de comportamento. A primeira, observando-se a figura, uma faixa até 100 s^{-1} e a partir desse valor, a viscosidade aparente tende a permanecer constante. Na polpa de taperebá, a segunda faixa apresentou um valor de $0,18 \text{ Pa.s}$ e para o experimento com a polpa de manga, aproximadamente $0,11 \text{ Pa.s}$. Bezerra *et al* (2013) e Silva *et al* (2021) citam que do ponto de vista industrial, a diminuição da viscosidade aparente facilita escoamento da polpa e a troca de calor durante o processamento. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor será a perda de carga durante o escoamento.

MODELAGEM REOLÓGICA

A modelagem reológica das polpas de goiaba, taperebá e manga, realizadas em triplicata em relação aos modelos de Bingham, Herschel-Bulkley, Ostwald, Casson, Carreau-Yasuda e Newton. Os resultados dessas modelagens estão mostrados na Tabela 1.

Através da modelagem reológica foi possível confirmar o comportamento não newtoniano de todas as polpas de frutas estudadas. Verifica-se que o coeficiente de determinação (R^2) para o modelo de Newton foi de 0.295, 0.402 e 0.060 para as polpas de goiaba, taperebá e manga, respectivamente, mostrando os menores valores para esse índice entre todos os modelos estudados.

Para a polpa de goiaba, os modelos que apresentaram os melhores ajustes foram o de Herschel-Bulkley, Carreau-Yasuda e Ostwald de Weale com coeficientes de determinação de 0,984, 0,984 e 0,973, respectivamente, condizentes com os encontrados na literatura para polpas de frutas. Brasileiro *et al* (2022) realizaram estudo da modelagem reológica da polpa de macaíba e verificaram que os modelos de Herschel-Bulkley, Ostwald, Casson representaram satisfatoriamente os dados experimentais ($R^2 > 0,98$) nas temperaturas de 25 e 30°C. Enquanto Guida *et al* (2017) através da modelagem reológica da polpa juçara, verificaram que o modelo da lei da potência foi eficaz na representação dos dados reológicos tanto da polpa inatura ($R^2 = 0,964$) quanto da diluída ($R^2 = 0,998$) à 35°C.

Tabela 1 – Curvas de fluxo viscosidade aparente \times taxa de cisalhamento da polpa das frutas.

Parâmetros	Goiaba		Taperebá		Manga	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Bingham						
τ_0 (Pa)	35,044	3,179	25,387	13,605	16,710	6,117
η_p (Pa.s)	0,178	0,048	0,149	0,013	0,101	0,001
R^2	0,919	0,038	0,985	0,011	0,990	0,004
Herchel-Bulckley						
τ_0 (Pa)	8,777	10,560	1,963	1,370	8,135	2,533
K	27,637	21,723	3,707	4,066	0,779	0,455
n	0,334	0,081	0,588	0,156	0,710	0,078
R^2	0,984	0,009	0,999	0,001	0,995	0,001
Ostwald de Weale						
K	22,306	14,658	3,901	3,770	2,197	1,461
n	0,349	0,068	0,566	0,135	0,568	0,085
R^2	0,973	0,005	0,998	0,001	0,993	0,002
Casson						
τ_0 (Pa)	50,213	26,389	35,017	34,682	8,066	4,299
n	0,500	0,000	0,500	0,000	0,500	0,000
η_p (Pa.s)	0,243	0,246	0,086	0,025	0,203	0,244
R^2	0,958	0,023	0,995	0,004	0,995	0,002
Carreau-Yasuda						
η_0 (Pa)	16,575	18,500	3,839	1,716	3,879	3,196
η_∞ (Pa.s)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
λ	1,160	1,512	0,757	0,609	2,672	0,967
n	0,345	0,089	0,493	0,142	0,568	0,075
a	2,000	0,000	2,000	0,000	2,000	0,000
R^2	0,984	0,011	0,998	0,000	0,993	0,001
Newton						
η (Pa.s)	0,360	0,153	0,535	0,001	0,605	0,184
R^2	0,295	0,267	0,402	0,427	0,060	0,067

Fonte: Autores (2022)

Enquanto para as polpas de taperebá e de manga, todos os modelos não newtonianos tiveram bons ajustes aos dados experimentais. Destaca-se nesse estudo o modelo Carreau-Yasuda, ainda pouco empregado para polpas de frutas, que apresentou excelente coeficiente de determinação ($R^2 > 0,98$). Feitosa (2018) constatou que os modelos de Sisko e Lei da Potência foram eficientes na modelagem reológica da polpa

integral de mutua ($R^2 > 0,99$) enquanto para a polpa diluída os modelos que tiveram os melhores ajustes foram os de Herschel-Bulkley, Mizrahi-Berk, Casson e Ostwald-de-Waele ($R^2 > 0,98$).

A partir das modelagens foi possível obter os parâmetros reológicos que otimizam a relação da variável dependente com a independente. Foi possível constatar também o comportamento pseudoplástico de todas as polpas de frutas, através do índice de comportamento menor que 1. Comportamento diferente foi encontrado para o estudo com polpa de abacate, caracterizado como dilatante (O. YALÇIN et al., 2022). Assim, tudo isso pode ser uma premissa para projetar adequadamente os equipamentos industriais e dessa maneira garantir a melhor qualidade do produto com os menores custos de processo.

CONCLUSÕES

Através das observações dos resultados, podemos notar que as amostras de polpa de frutas de goiaba, taperebá e manga, apresentaram comportamento não-newtoniano/pseudoplástico. As análises reológicas mostraram que a polpa de goiaba apresentou maiores tensões e viscosidades aparentes em relação às amostras de polpa de taperebá e manga.

Verificou-se que, nos primeiros instantes do ensaio, todas as amostras de polpa apresentaram maiores tensões e viscosidades aparentes devido à maior concentração de fibras provenientes da polpa e provavelmente em razão da quantidade de sólidos totais, proporcionando assim uma maior resistência ao escoamento, no entanto, ao decorrer do tempo, a viscosidade aparente diminuiu com o aumento da taxa de cisalhamento, comportamento do sistema esperado para as polpas de frutas em geral.

Através da modelagem foi possível identificar o caráter pseudoplástico de todas as polpas e verificar que os modelos não newtonianos podem prever os dados experimentais com efetividade, apresentando valores para R^2 superiores a 0,958.

REFERÊNCIAS

- ALPARSLAN, M.; HAYTA, M. Rheological and sensory properties of pekmez (grape molasses)/tahin(sesame paste) blends. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v.54, n.1, p.89-93, 2002.
- BEZERRA, J. R. M. V.; QUEIROZ, A. J. de M.; GASPARETTO, C. A. Reologia de polpa de manga e ajuste dos parâmetros reológicos em função da temperatura. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 3, n. 1, p.37-42, 2001.
- BEZERRA, C.V.; SILVA, L.H.M.; COSTA, R.D.S.; MATTIETTO, R.A.; RODRIGUEZ, A. M. C. Comportamento reológico de suco misto elaborado com frutas tropicais. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas v. 16, n. 2, abril/junho, 2013.
- BRASILEIRO, J. L. O; DE FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J.M.; FEITOSA, R. M. Modelling of rheological behaviour of macaíba pulp at different temperatures1. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.26, n.3, p.198-203, 2022
- COSTA, S. C. F.C.; ALVES, W. S.; ERAZO, R. L.; OLIVEIRA, R. M. SANTOS, W. G. Physico-chemical and microbiological characterization of pineapple pulp and concentrate on industrial and laboratory scale. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 3, p.16507-16521, mar. 2020.
- GUIMARÃES, D. H.P.; MASCIGRANDE, D. D. Polpas de juçara e açaí: diferenças reológicas em função da temperatura e teor de sólidos suspensos. **Revista brasileira de tecnologia aplicada nas ciências agrárias**, v.4, n.1, p.169–181, 2011.
- EVANGELISTA, R.M.; VIEITES, R.L. Avaliação da Qualidade de Polpa de Goiaba Congelada, Comercializada na Cidade de São Paulo. **Segurança Alimentar e Nutricional**, Campinas, 2006.
- FERREIRA, G. M., GUIMARÃES, M. J. O. C., & MAIA, M. C. A. Efeito da temperatura e taxa de cisalhamento nas propriedades de escoamento da polpa de cupuaçu (*T. grandiflorum* Schum) integral. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal-SP, V.30, n. 2, 385-389, 2008.
- FEITOSA, R. M.; DE FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; DE OLIVEIRA, E. N. A. Comportamento reológico da polpa de murta com maltodextrina. **Revista Engenharia na Agricultura** V.26, n.05, p.391-398, 2018
- GUIDA I. I. S.; VILLA-VÉLEZ, H. A.; SANTANA, A. A., SAMPAIO, D. R. M. Estudo reológico da polpa de juçara (*euterpe edulis* mart) em função da temperatura e teor de sólidos solúveis. **XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**. UFSCar – São Carlos – SP, 2017.
- MATSUURA, F.C.A.U.; ROLIM, R.B. Evaluation of the addition of acerola juice in pineapple juice in order to produce a blend with a high content of vitamin C. **Brazilian Journal of Fruticulture**, v. 24, n. 1, p. 138-141, 2002.

MELO, F. S.; OKANEKU, B. M.; CARDOSO, D. N. P.; SANTOS, W. G. Avaliação reológica da polpa e concentrado de cupuaçu (*Theobromagrandiflorum schum*) **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 45182-45192 jul. 2020.

O. YALÇINA; M. ÖZTÜRKB; Ö. GÖRGÜLÜERA. Investigation of Optical and Flow Properties of Avocados by Spectroscopy and Rheology Methods. **acta physica polonica a** n. 5 vol. 141. 2022.

SILVA, T. L. V.; SANTOS, W. G.; CARDOSO, D. N. P. comportamento reológico da polpa de acerola (*malphigiaemarginata d.c.*) industrializada. In: **Anais** da V Semana Acadêmica de Engenharia de Alimentos - UFAM: A Engenharia de Alimentos no fomento das pequenas e médias indústrias alimentícias da Região Norte. Anais. Manaus(AM) UFAM, 2021. Disponível em: <[https://www.even3.com.br/anais/semealiufam2021/424700-comportamento-reologico-da-polpa-de-acerola-\(malphigiaemarginata-dc\)-industrializada](https://www.even3.com.br/anais/semealiufam2021/424700-comportamento-reologico-da-polpa-de-acerola-(malphigiaemarginata-dc)-industrializada)>. acesso em: 02/09/2022.

VASQUES, C.T. **Reologia do suco de goiaba: Efeito da diluição e do tamanho de partícula**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.<https://www.portaldoagronegocio.com.br/agricultura/fruticultura/noticias/balano-das-exportaes-de-frutas-em-2012-10123>.

Recebido em: 21/08/2022

Aprovado em: 23/09/2022

Publicado em: 29/09/2022