

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

ANÁLISE DO FATOR DE ATRITO NO ESCOAMENTO DO ÓLEO DA AMÊNDOA DA MACAÚBA (*ACROCOMIA ACULETA*)

Daiane Antunes Pinheiro¹ – daianeengquimica@gmail.com

Shara Katerine Moreira Jorge Leal² – sharaengquim@hotmail.com

Rosilanny Soares Carvalho³ – rosilannysoares@hotmail.com

Vitor Soares⁴ – vitorsoaresengqui@gmail.com

¹ Instituto Federal do Norte de Minas Gerais- Montes Claros, MG, Brasil

² Universidade Federal do Rio de Janeiro- Rio de Janeiro-RJ-Brasil

³ Universidade Federal de São Carlos- São Carlos- SP-Brasil

⁴ Instituto Federal do Norte de Minas Gerais- Montes Claros, MG, Brasil

Resumo. Neste trabalho os ensaios foram realizados na temperatura de 27 °C utilizando-se óleo da amêndoa da Macaúba (*Acrocomia Aculeata*); por meio dos resultados experimentais foi possível quantificar o fator de atrito no escoamento de um fluido viscoso em tubulação de plástico usando os modelos de Bingham e Newton, nota-se a diminuição do fator de atrito de Fanning (f) com o aumento de Número de Reynolds (Re), logo, o regime de escoamento é caracterizado como laminar, além de se observar o efeito dos parâmetros reológicos no escoamento do óleo.

Palavras-chave: Laminar, Reynolds, Tubulação.

1. INTRODUÇÃO

Na busca de novas matérias primas com intuito de utilizá-las nas indústrias de cosméticos é possível usufruir da biodiversidade vegetal do cerrado, uma vez que várias pesquisas com plantas de frutos oleaginosas têm sido realizadas a procura de compostos com notável atividade antioxidante, devido suas propriedades redutoras para a inibição de radicais livres, além disso os metabólitos secundários comparando com antioxidantes sintéticos possuem baixa toxicidade, logo, o interesse por estes tem aumentado (CALLEGARI, 2015).

De acordo com Rieger (1987) e Klingman (1964) no óleo de amêndoa de Macaúba predominam os ácidos graxos saturados que são bastante semelhantes aos apresentados no estrato córneo da epiderme humana, especialmente os ácidos, palmítico, oleico e linoleico, o que possibilita seguir mais uma tendência cosmética que é o uso de produtos que favorecem a compatibilidade formulação-pele.

Para que um óleo seja utilizado como matéria prima para formulação de cosméticos estes devem ser caracterizados quanto ao comportamento reológico, já que os dados obtidos são utilizados no dimensionamento de tubulações, bombas, filtros, agitadores, pasteurizadores, resfriadores, congeladores entre outros equipamentos utilizados durante a produção do cosmético.

O escoamento de fluido promove a perda de energia mecânica através do atrito que acompanha as tensões de cisalhamento causadas pelo deslocamento do fluido. Portanto, os cálculos para determinar o fator de atrito viscoso tornam-se necessário, tendo em vista que é parte do projeto de tubulações.

Com base no exposto, o conhecimento acerca do escoamento do óleo é de grande importância para a consecução das etapas de projetos de equipamentos e de processos ou mesmo para a especificação de produtos, visto que representa matéria prima para a formulação de cosméticos e uma alternativa para o desenvolvimento econômico do cerrado (BROCK et. al., 2008).

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

De acordo com Fellows (2006), a reologia estuda o comportamento deformacional e do fluxo da matéria submetido a tensões, sob determinadas condições termodinâmicas, ao longo de um intervalo de tempo.

Um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importando quão pequeno seja o seu valor (FOX et. al., 2011). A viscosidade é uma propriedade que é manifestada no escoamento de um fluido e pode ser caracterizada como a resistência ao escoamento, devido à interações moleculares da substância. Para a determinação da viscosidade de um fluido, aplica-se um balanço de forças ao longo do duto, igualando a força de pressão à força de atrito na parede do tubo, conforme equação 1:

$$\tau = \frac{R\Delta P}{2L} \quad (1)$$

Onde R é o raio do duto (m), ΔP diferença de pressão piezométrica (Pa), L Comprimento da seção reta (m) e τ tensão de cisalhamento (Pa).

Para se caracterizar um fluido desconhecido a equação 2 é usada para o cálculo da taxa de deformação do fluido (γ), por melhor se adaptar aos dados experimentais com relação a taxa de cisalhamento é a de Rabinowitsch:

$$\gamma = \left(\frac{3+b}{4}\right) \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2)$$

Em que:

$$b = \frac{d \ln\left(\frac{4Q}{\pi R^3}\right)}{d \ln\left(\frac{R\Delta P}{2L}\right)} \quad (3)$$

Sendo: Q Vazão volumétrica (m^3/s).

A equação 3 apresenta o fator de correção para o cálculo da taxa de deformação na parede para qualquer fluido não newtoniano, sendo obtido por meio de um gráfico bi logarítmico em que o coeficiente angular representa o número b.

Ao se testar um fluido em diversas alíquotas de altura, obviamente, haverá uma gama de diferenças de pressões piezométricas e vazões. Ao se construir um gráfico de tensão na parede versus gradiente de velocidades, obtém-se uma curva reológica do fluido.

Os fluidos são classificados quanto à dependência entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento a qual o fluido está sujeito, portanto, devido a existência ou não de uma relação entre a viscosidade e a taxa de deformação ocorre a divisão dos fluidos viscosos em duas classes: fluidos newtonianos e fluidos não newtonianos.

Para fluidos newtonianos a viscosidade (μ) depende somente do material, de sua temperatura e pressão, sendo que a taxa de deformação é o gradiente de velocidade na direção perpendicular à força de cisalhamento (τ_{rz}) é conhecida como equação da Lei de Newton, de acordo com a equação 4.

$$\tau_{rz} = -\mu \frac{dv_z}{dr} \quad (4)$$

Para os fluidos em que há necessidade de uma tensão limite de escoamento mínima (τ_0) para que o fluido escoar são classificados como Plástico de Bingham, já que abaixo deste valor o fluido se comporta como sólido, as condições apresentadas nas equações 5 e 6.

$$\tau = -\mu_{pl}\gamma + \tau_0 \quad (5)$$

$$\mu_a = \mu_{pl} + \frac{\tau_0}{\gamma} \quad (6)$$

Onde μ_{pl} é a viscosidade plástica (kg.m.s^{-1}) e μ_a viscosidade aparente (kg.m.s^{-1}).

O perfil de velocidade de um fluido a escoar em um tubo cilíndrico não possui sempre a mesma configuração, já que há duas regiões distintas, região de entrada e região completamente desenvolvida, sendo que é nesta última que incide o presente trabalho. Conforme Polizelli (2003) para o fluido de Bingham considera-se o perfil de velocidade a equação 7, já para fluido newtoniano usa-se a equação 8.

$$v(r) = \frac{\Delta P}{4\Delta L \mu_{pl}} \left(R^2 - \left(\frac{2\tau_0}{\Delta P/\Delta L} \right)^2 \right) - \frac{\tau_0}{\mu_{pl}} \left(R - \frac{2\tau_0}{\Delta P/\Delta L} \right) \quad (7)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

Em que ΔL é o comprimento da seção reta (m) e A área perpendicular do duto (m^2).

As equações do fator de atrito (f) dependem do modelo reológico e do regime de escoamento do fluido, sendo assim observa-se que as equações para escoamento turbulento de fluidos newtonianos são usadas para correlacionar ao fator de atrito de fluidos não newtonianos, por meio das várias definições de viscosidades para cada tipo de fluido, já para regime laminar o fator de atrito gerado é determinado pela velocidade do escoamento do fluido. Cabe salientar que existem outras equações para o cálculo do fator de atrito, no entanto, as mostradas neste trabalho são as mais usadas (GOTSCHLICH,2012), (BICALHO,2015).

Tabela 1- Correlações para fator de atrito

| Modelo | Laminar | Turbulento |
|---------|--|---|
| Bingham | $f = \frac{16}{\frac{d\Delta P}{\mu_{PL}(1+\frac{\tau_0 d}{6\mu_{PL}v})}} \quad (9)$ | $\frac{1}{\sqrt{f}} = 4,53 \log_{10} \left(1 - \frac{4L\tau_0}{d\Delta P} \right) + 4,53 \log_{10} \left(\frac{\rho v d}{\mu_{pi}} \sqrt{f} \right) - 2,3 \quad (10)$ |
| Newton | $f = \frac{16\mu}{\rho v d} \quad (11)$ | $f = \frac{0,316}{\left(\frac{\rho v d}{\mu} \right)^{0,25}} \quad (12)$ |

Sendo d o diâmetro do duto, μ viscosidade (N.s/m²) e ρ densidade do fluido (kg/m³).

Para os fluidos é possível quantificar o fator de Fanning experimental por meio da equação:

$$f = \frac{d\Delta P}{2L\rho v^2} \quad (13)$$

Conforme Darby (2001a), para os fluidos não newtonianos a rugosidade da tubulação não causa influência no valor do fator de atrito, tendo em vista que a maioria dos escoamentos de fluidos não newtonianos se encontra em uma faixa do número de Reynolds generalizado baixa, em que a camada-limite tende a engrossar-se mais para fluidos não newtonianos que para fluidos newtonianos, logo, assumem-se as tubulações de materiais lisos.

No escoamento laminar de fluidos newtonianos, o perfil de velocidade é parabólico quando o escoamento é completamente desenvolvido, já para os fluidos não newtonianos à proporção que o índice de comportamento diminui, o perfil começa a se tornar mais plano até ser totalmente plano quando $n=0$, assim sendo, não há diferenças para o regime laminar e turbulento.

3. METODOLOGIA

Inicialmente, efetuou-se a validação do aparato experimental, usando água destilada, haja vista que a mesma se comporta como fluido newtoniano. Na Figura 1 têm-se o reograma da água.

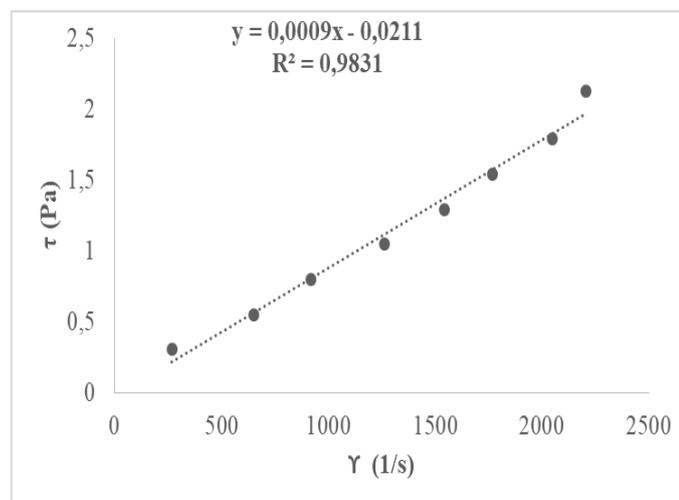


Figura 1- Reograma água destilada

O coeficiente angular da equação de reta é o valor da viscosidade do fluido cujo valor foi de $(9 \pm 0,5) 10^{-4}$ (N s/m²). Este valor foi comparado com o trabalho de Incropera (2007) e este determinou uma viscosidade de $(8,966 \times 10^{-4}) \frac{N \cdot s}{m^2}$, o que sugere que o método do tubo capilar se mostra adequado para determinação da viscosidade, visto que o erro experimental foi de 3,78% .

Por meio Equação de Hagen-Poiseuille (equação 14) a fim de se determinar o raio do duto com o uso de água destilada, nas condições de temperaturas e pressões praticadas no laboratório, encontrando um valor de $(2,6 \pm 0,3) \times 10^{-3}$ m.

$$D = \left(\frac{128 \mu L Q}{\pi \Delta P} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

A Figura 2 representa a curva obtida para o fator de atrito experimental e teórico para água nota-se então a boa concordância entre os dados experimentais e preditos, já que o erro experimental em todas as diferentes cotas foi inferior a 8%. Observa-se a caracterização do regime de escoamento para água como sendo laminar, logo, os resultados indicam que a unidade experimental fornece dados coerentes com os resultados descritos na literatura para escoamento laminar.

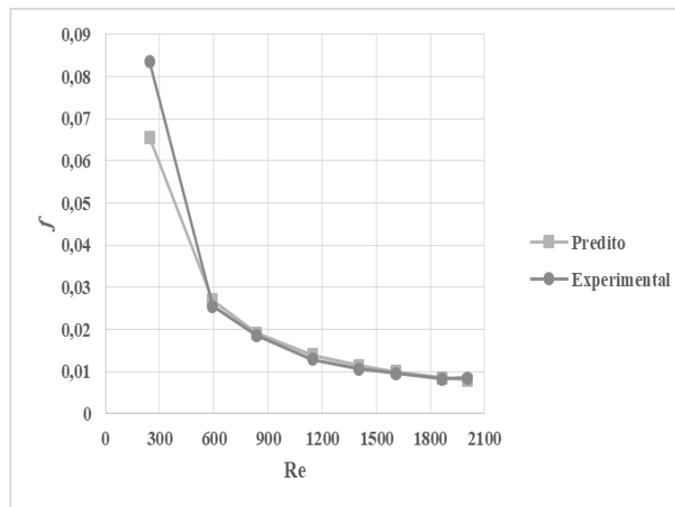


Figura 2 - Curva de calibração

Tal sistema consiste basicamente de mangueira de plástico de 81 cm, um bquer de armazenagem do fluido sendo suportado por uma haste metálica em uma altura de 69 cm e outro bquer para coletar o fluido escoado.

Após o sistema atingir o regime permanente a vazão mássica do fluido é determinada por técnica gravimétrica, em quintuplicata de cada ponto. Já a temperatura é determinada no bquer de armazenamento com um termômetro comum e com o auxílio de um picnômetro é estabelecida a densidade do fluido.

Para obtenção de dados experimentais, o óleo de amêndoa de Macaúba foi ensaiado em um aparato experimental de um viscosímetro capilar a 27 °C para obtenção de curva da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação conforme metodologia proposta por Gonçalves (2017). Após a obtenção experimental os dados foram ajustados aos modelos matemático de Bingham e Newton o que permite a estimativa do fator de atrito para as condições experimentais de escoamento, considerando-se somente a perda de carga distribuída , que consiste na perda ocorrida ao longo do comprimento da tubulação, devendo-se ao efeito causado pela viscosidade do fluido em escoamento e da rugosidade das paredes da mangueira, causando variação no perfil de velocidades.

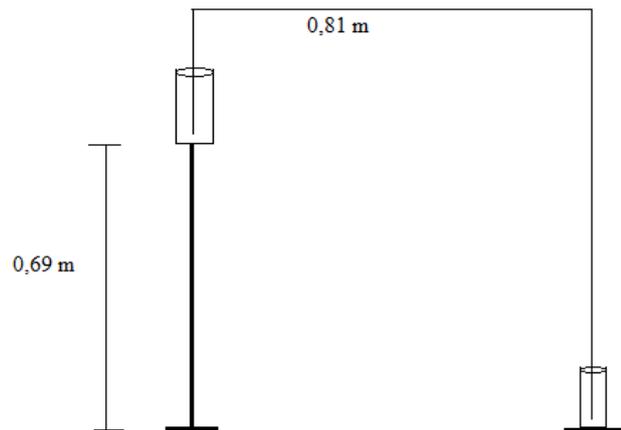


Figura 3 - Esquema viscosímetro capilar

3.1. Análise estatística

Os dados da tensão de cisalhamento e taxa de deformação foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, por meio de um programa de análise de dados do software Excel 2013.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 representa o reograma do óleo da amêndoa de Macaúba ajustado ao modelo de Bingham usando-se o fator de correção determinado pela Figura 5, já a Figura 6 apresenta o reograma ajustado ao modelo de Newton.

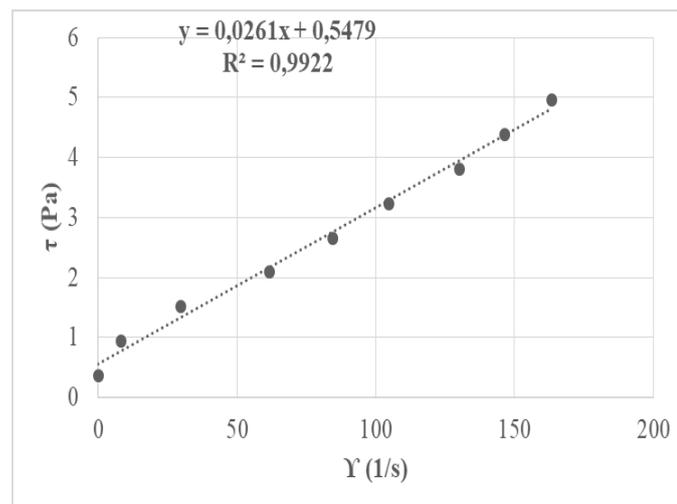


Figura 4 - Reograma ajustado ao modelo de Bingham

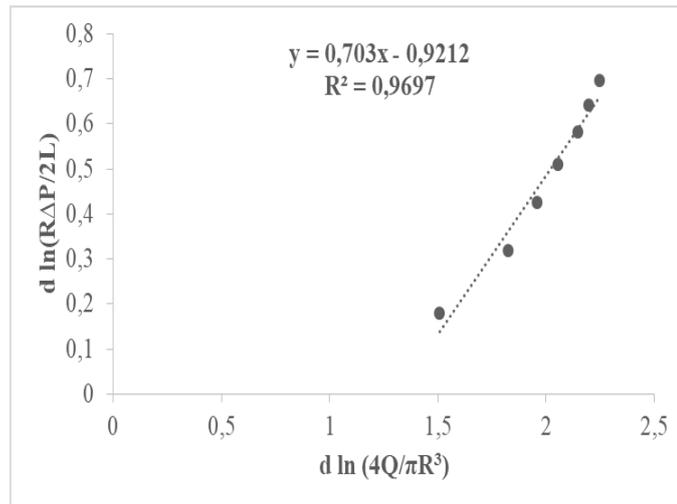


Figura 5 - Fator de correção b

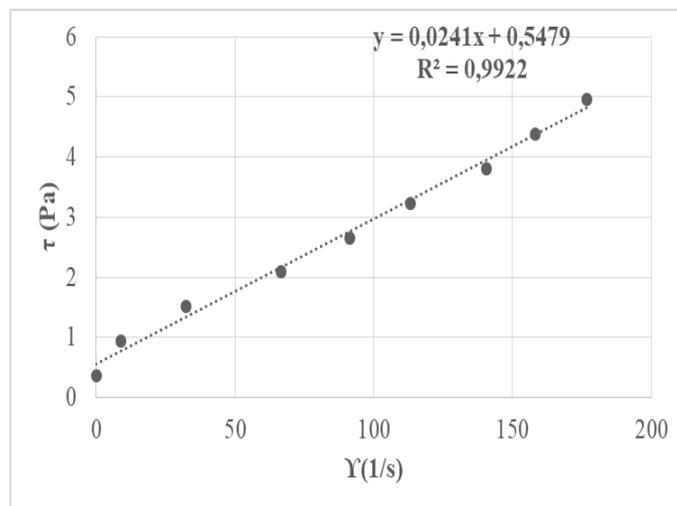


Figura 6- Reograma ajustado ao modelo newtoniano

As condições do fluxo são apresentadas na Tabela 2 e na Tabela 3 têm-se as características reológicas do óleo de amêndoa de Macaúba.

Tabela 2 - Condições do fluxo

| Altura (m) | Vazão (Kg/s) | Re |
|------------|--------------|-----------------|
| 0,69 | 0,0027 | $9,59 \pm 0,37$ |
| 0,61 | 0,0024 | $8,21 \pm 0,15$ |
| 0,53 | 0,0022 | $6,82 \pm 0,12$ |
| 0,45 | 0,0017 | $5,45 \pm 0,6$ |
| 0,37 | 0,0014 | $4,10 \pm 0,3$ |
| 0,29 | 0,0010 | $2,76 \pm 0,26$ |
| 0,21 | 0,0005 | $1,49 \pm 0,12$ |

Tabela 3 - Características reológicas

| | Densidade (ρ) | Viscosidade (μ) | Viscosidade plástica (μ_{pl}) | Tensão inicial (τ_0) |
|---------|--|---|---|---|
| Bingham | 924±4 | 0,0285 | 0,0261 ± 0,0008 | 0,5479 ± 0,0863 |
| Newton | 924±4 | 0,0241± 0,0012 | ----- | ----- |

De acordo com o modelo de Bingham é necessário que o fluido apresente uma tensão inicial de escoamento para que ocorra o movimento do fluido. Nesse sentido, para o escoamento do óleo é necessário fornecer uma tensão inicial de 0,5479 Pa para que se inicie o deslocamento, já que em nível molecular o óleo possui uma estrutura tridimensional rígida tendo essa estrutura quebrada quando se alcançar valores de tensão superiores a 0,5479 Pa, obtido por meio da regressão linear dos dados experimentais ajustados a equação 5.

A viscosidade do óleo de amêndoa de Macaúba determinada pela equação 6 foi de 0,0285(kg/ m s) se aproximando da viscosidade plástica de 0,0260 (kg/ m) resultante das forças de atrito internas do escoamento do óleo. De acordo com SOUZA (2013), o óleo da amêndoa da macaúba apresenta diferentes viscosidades as quais são dependentes do estágio de maturação do fruto. A viscosidade do modelo de Bingham foi semelhante a encontrada por Souza (2013) em fruto colhido na cidade de Moreira Sales, Paraná, 0,0299 (kg/ m s) na temperatura de 25°C. Já para o modelo newtoniano há somente o parâmetro da viscosidade absoluta calculada por meio da equação resultando em 0,0241 Pa.

A densidade, a velocidade média e a diferença de pressão piezométrica do escoamento do óleo, além das dimensões do tubo, foram utilizados nas equações 9 e 11 para o cálculo dos fatores de Fanning. Estes resultados foram correlacionados com o Número de Reynolds (Re) calculado com os parâmetros encontrados neste trabalho.

A Figura 7 ilustra a relação entre os fatores de atrito de Fanning calculado pelas equações 9 e 11, com o número de Reynolds, observa-se que a equação da velocidade teórica para plástico de Bingham usada foi a equação 7 em que é necessário determinar o limite entre a região mais próxima à parede do tubo e a região central onde o fluido se move em velocidade máxima (Bird *et al.*, 1960).

Assim, a Figura 7 apresenta os fatores de Fanning experimental e teórico, por meio da literatura sabe-se que o f deve ser compreendido entre 0 e 1, observa-se então um limite crítico para a velocidade, já que f para modelo newtoniano nas cotas mais baixas apresenta valor acima de 1. O método capilar não aborda os efeitos de entrada e saída e o efeito de parede, portanto não é adequado para quantificar o fator de Fanning em velocidades muito baixas conforme visto na Figura 7, uma vez que há discrepância entre os valores para Bingham, Newton e Experimental na cota de 21 cm.

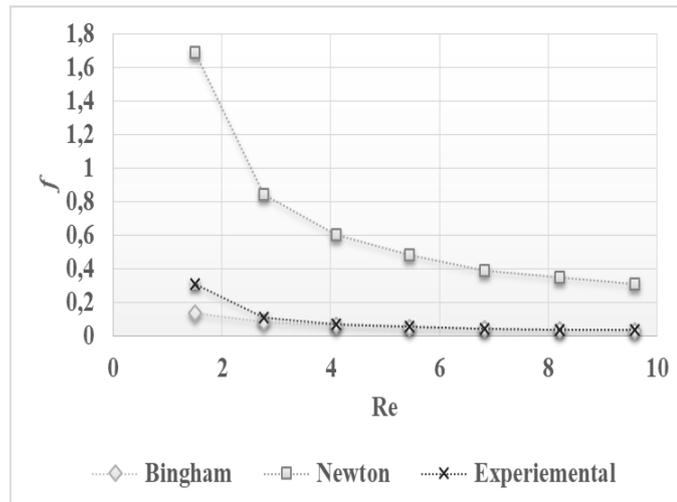


Figura 7- Comparação do fator de atrito experimental

Através da Figura 7 é possível perceber a influência do parâmetro reológico (τ_0) que causa uma diminuição no fator de atrito para todos os Números de Reynolds (Re), tendo em vista que os dados experimentais se adequam melhor ao modelo de Bingham em comparação com o modelo de Newton.

Por meio da Figura 7 observa-se o decréscimo do Fator de Fanning (f), muito utilizado na engenharia química e na indústria de alimentos, com o aumento do número de Reynolds demonstrando que o escoamento do fluido é laminar.

5. CONCLUSÃO

Para a tubulação de plástico estudada, verifica-se que os dados experimentais se adequam melhor ao modelo de fluido de Bingham. O método experimental de avaliação de regime de escoamento apesar de ser suscetível à falhas por ser um arranjo experimental, pode-se verificar o regime de escoamento do óleo sendo laminar.

REFERÊNCIAS

- BICALHO, Isabele Cristina et al. Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna. 2015.
- BIRD, R.B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N. *Transport Phenomena*. JohnWiley & Sons, Inc, New York London, p. 780, 1960.
- BROCK, Josiane et al. Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. *Ciência e tecnologia de alimentos*, v. 28, n. 3, p. 564-570, 2008.
- CALLEGARI, Fabricio Costa. Desenvolvimento e avaliação físico-química e microbiológica de cosméticos para a pele humana contendo óleos de Macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.). 2015.
- DARBY, R. *Chemical engineering fluid mechanics*. 2nd. ed. New York: Marcel Dekker, 2001.
- FELLOWS, Peter J. Propriedades dos alimentos e teoria do processamento in *Tecnologia do processamento de alimentos – princípios e práticas*. 2ªed. Porto Alegre: Artmed, p. 25-74, 2006.
- FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- GONÇALVES, J.C. *Prática experimental: Determinação da Viscosidade*. Montes Claros, setembro de 2017.
- GOTSCHLICH, Maria Fernanda Lozier et al. Escoamento de fluidos não newtonianos: revisão da literatura e análise de correlações para o fator de atrito e coeficientes de perda localizada. 2012.
- INCROPERA, P. F.; DEWITT, D. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 6ta. Edição. Editora LTC: de Janeiro, 2008.

- KLIGMAN, A. M. Biology of the Stratum Corneum. In *Epidermis*. Nova Iorque: Editora Academic Press. Ed. 1. p. 421-446, 1964.
- POLIZELLI, Marcos Alexandre. Coeficientes de perda de carga em válvulas e acessórios no escoamento de fluídos não-newtonianos puramente viscosos e viscoelásticos. 2003.
- RABINOWITSCH, B.A., Physik. Chem. Ser- A, 145, 1, 1929.
- RIEGER, M. Skin lipids and their importance to cosmetic science. *Cosmet.Toiletries*, v. 102, p.45-49, 1987.
- SOUZA, Gredson Keiff et al. Avaliação da Viscosidade do Óleo da Amêndoa de Macaúba em Diferentes Estágios de Maturação. *BBR-Biochemistry and Biotechnology Reports*, v. 2, n. 3esp, p. 301-304, 2013.

APPENDIX A

ANALYSIS OF THE FACTOR OF ATTRACTION IN MACAÚBA ALMOND OIL (*ACROCOMIA ACULEATA*)

Abstract. *In this work the tests were carried out at a temperature of 27 °C using Macaúba almond oil (Acrocomia Aculeata); by means of the experimental results it was possible to quantify the friction factor in the flow of a viscous fluid in plastic pipe using the Bingham and Newton models, it is possible to observe the decrease of the friction factor of Fanning (f) with the increase of Number of Reynolds (Re), therefore, the flow regime is characterized as laminar, in addition to observing the effect of the rheological parameters on the oil flow.*

Keywords: *Laminar, Reynolds, Tubing.*