

Application of Stokes' Law: a didactic experiment in Transport Phenomena

Aplicação da Lei de Stokes: um experimento didático em Fenômenos de Transporte

Aplicación de la Ley de Stokes: un experimento didáctico en Fenómenos de Transporte

Article Info:

Article history: Received 2019-05-03 / Accepted 2022-04-16/ Available online 2022-04-16

doi: 10.18540/jcecv18iss5pp14140-01e



Antonio Marcos de Oliveira Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9334-0394>

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

E-mail: antonio.siqueira@ufv.br

Abderrahmane Khechekhouche

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7278-2625>

Faculty of Technology, University of El Oued, Algeria

E-mail: abder03@hotmail.com

Júlio Cesar Costa Campos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9488-8164>

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

E-mail: julio.campos@ufv.br

Gabriel Siqueira Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2462-9263>

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, MG, Brasil

E-mail: gabrielsiqueira25@outlook.com

Marlons Lino da Cruz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2641-2567>

Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

E-mail: marlons.cruz@ufv.br

Abstract

This work aimed to contribute to studies on the elaboration and implementation of proposals for didactic activity based on an investigative experiment. The work describes an experiment for academic purposes to determine the specific mass and dynamic viscosity of a fluid using the Stokes Method, a simple and low-cost experimental procedure that enables the teaching/learning process of different concepts in the area of Fluid Mechanics, applied to the field of Engineering. The values obtained for specific mass - $(899.60 \pm 18.00) \text{ kg/m}^3$, $(996.00 \pm 19.93) \text{ kg/m}^3$, and $(1,298.00 \pm 25.97) \text{ kg/m}^3$ - and dynamic viscosity - $(0.080 \pm 0.001) \text{ Pa.s}$, $(0.649 \pm 0.007) \text{ Pa.s}$, and $(0.885 \pm 0.015) \text{ Pa.s}$ - respectively for the fluids refined soy vegetable oil, detergent and glycerin were close to the values found in the literature and showed a low degree of propagated uncertainty. The development of this implementation was carried out with the support of the EES software and it is presented as a proposal for a didactic activity based on an investigative experiment in Fluid Mechanics.

Keywords: Research. Experimentation. Viscosity. Stokes method. Propagation of Uncertainties.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo contribuir com estudos sobre a elaboração e a implementação de propostas de atividade didática baseada em experimento de cunho investigativo. O trabalho descreve um experimento com fins acadêmicos para a determinação da massa específica e da viscosidade dinâmica de um fluido por meio do Método de Stokes, um procedimento experimental simples e de baixo custo e que possibilita o processo de ensino/aprendizagem de conceitos diversos da área de Mecânica dos Fluidos, aplicada ao campo da Engenharia. Os valores obtidos de massa específica - $(899,60 \pm 18,00) \text{ kg/m}^3$, $(996,00 \pm 19,93) \text{ kg/m}^3$ e $(1.298,00 \pm 25,97) \text{ kg/m}^3$ - e da viscosidade dinâmica - $(0,080 \pm 0,001) \text{ Pa.s}$, $(0,649 \pm 0,007) \text{ Pa.s}$ e $(0,885 \pm 0,015) \text{ Pa.s}$, respectivamente para os fluidos óleo vegetal refinado de soja, detergente e glicerina foram próximos dos valores encontrados na literatura e apresentaram baixo grau de incerteza propagada. O desenvolvimento desta implementação foi realizado com apoio do software EES e apresenta-se como uma proposta de atividade didática baseada em experimento de cunho investigativo em Mecânica dos Fluidos.

Palavras-Chave: Investigação. Experimentação. Viscosidade. Método de Stokes. Propagação de Incertezas.

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo contribuir a los estudios sobre la elaboración e implementación de propuestas de actividad didáctica a partir de un experimento investigativo. El trabajo describe un experimento con fines académicos para determinar la masa específica y la viscosidad dinámica de un fluido utilizando el Método de Stokes, un procedimiento experimental sencillo y de bajo costo que posibilita el proceso de enseñanza/aprendizaje de diferentes conceptos del área de Mecánica de Fluidos, aplicada al campo de la Ingeniería. Los valores obtenidos de masa específica - $(899,60 \pm 18,00) \text{ kg/m}^3$, $(996,00 \pm 19,93) \text{ kg/m}^3$, y $(1.298,00 \pm 25,97) \text{ kg/m}^3$ - y viscosidad dinámica - $(0,080 \pm 0,001) \text{ Pa.s}$, $(0,649 \pm 0,007) \text{ Pa.s}$, y $(0,885 \pm 0,015) \text{ Pa.s}$ - respectivamente para los fluidos aceite vegetal de soya refinado, detergente y glicerina se acercaron a los valores encontrados en la literatura y mostraron un bajo grado de incertidumbre propagada. El desarrollo de esta implementación se realizó con el apoyo del software EES y se presenta como una propuesta de actividad didáctica basada en un experimento investigativo en Mecánica de Fluidos.

Palabras clave: Investigación. Experimentación. viscosidad. Método Stokes. Propagación de Incertidumbres.

Introdução

Segundo Brunetti (2008), viscosidade é a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento. Em outras palavras, é a propriedade associada à resistência que um fluido oferece à deformação por cisalhamento, tipo de tensão gerado por forças aplicadas em sentidos opostos, porém, em direções semelhantes no material analisado. Para Vertchenko e Vertchenko (2017), a propriedade física viscosidade “está associada a uma espécie de atrito interno que causa fricção entre as camadas do fluido que se movimentam com velocidades diferentes e é explicada, ao nível microscópico, como devendo-se a transferência de momento linear entre as partículas que compõem o fluido”.

Conforme Streeter et al. (1998) pode-se dizer que a viscosidade corresponde ao atrito interno nos fluidos devido às interações intermoleculares, sendo geralmente em função da temperatura. É comum sua percepção estar relacionada à resistência ao despejamento. A viscosidade descreve a resistência interna do material para fluir e deve ser entendida como a medida do atrito do fluido. Desta forma, quando se diz “a água é fina”, significa que este material tem uma baixa viscosidade, enquanto óleo vegetal é “grosso”, com uma alta viscosidade. Muitos fluidos, como a água ou a maioria dos gases, comportam-se segundo a Lei de Newton e por isso são conhecidos como fluidos newtonianos. Os fluidos não newtonianos têm um comportamento mais complexo e não linear.

A viscosidade de um fluido está relacionada a sua capacidade de fluir, ou seja, ao atrito, e à capacidade de resistir a uma deformação, isto é, o grau de resistência quando é aplicada sobre ele uma força cisalhante. A ela podem ser atribuídos alguns fenômenos, tais como o arrasto de atrito (Pritchard e Mitchell, 2019; Welty et al., 2007). Essa propriedade é fundamental nos cálculos de diversos projetos, como, por exemplo, dimensionamento de bombas e tubulações. Um conhecimento a cerca desse assunto é muito importante para o uso em formulação e preparação de emulsões, cremes, géis e soluções no geral, e no processamento de alimentos (Canciam, 2010).

Vertchenko e Vertchenko (2017) destacam que a “viscosidade de fluidos tem enorme importância nas mais diversas áreas, desde a engenharia, caracterizando fluidos lubrificantes de máquinas, dentre muitos exemplos, até a medicina, relacionando-se à secreção de muco do organismo, à circulação sanguínea, à distribuição de partículas de fármacos por meio desta, etc.”

A viscosidade pode ser dinâmica (ou absoluta), cujo símbolo é μ , ou cinemática (ν), que é a relação entre a viscosidade dinâmica (μ) e a massa específica do fluido (ρ), e que é utilizada com frequência nas indústrias (Pritchard e Mitchell, 2019; Coelho, 2013; Welty et al., 2007). Ela é medida através de um aparelho chamado viscosímetro, que pode ser de diferentes tipos, como por exemplo, Viscosímetro de Michael, de Saybott, etc.

As equações fundamentais para a determinação da viscosidade de líquidos baseiam-se na Teoria do Estado Ativado de Eyring (Ribeiro et al., 2005), que considera que o líquido é formado por moléculas intercaladas por vacâncias, e essas moléculas, mesmo com o líquido em repouso, movem-se a fim de ocuparem as vacâncias adjacentes a elas, de modo que a viscosidade está relacionada com a força que tende a se opor esse movimento, sendo uma medida de fricção interna do fluido.

Como referência aos valores de viscosidade, podem ser utilizadas medidas experimentais de outras fontes prévias ou mesmo correlações obtidas através da modelagem de viscosidade em função da temperatura. Nesses casos, os modelos tradicionalmente usados são os modelos de Guzman e de Vogel, conforme Reid et al. (1988).

Conforme Brock et al. (2008) e Geris et al. (2007), Moura et al. (2000) o conhecimento de propriedades reológicas como a viscosidade e a condutividade térmica é fator importante no dimensionamento e no projeto de equipamentos e processos, típicos da indústria química, envolvendo a transferência de calor e transferência de massa, com destaque para as áreas de refrigeração, tratamento térmico e armazenamento de produtos alimentícios. Brock et al. (2008), a partir de medidas de viscosidade dos óleos vegetais, utilizando um viscosímetro do tipo Brookfield, acoplado a um banho termostatizado, obtiveram uma equação representativa, seguindo o modelo de Vogel:

$$\ln(\mu) = A + \frac{B}{C+T} \quad (01)$$

Onde os parâmetros de ajustes correspondem a $A = 0,6814$; $B = 464,91$ e $C = 83,9882$ e a temperatura T dada em Kelvin, para um desvio médio absoluto igual a 3,1%.

Por sua vez, Canciam (2010) destaca ainda que “quanto maior a viscosidade, maior será a barreira potencial que uma molécula terá que vencer a fim de “saltar” para uma vacância adjacente. Essa barreira potencial é conhecida como energia de ativação”. Canciam (2010) em sua investigação dos parâmetros reológicos para óleos vegetais refinados, propôs uma correlação do tipo Arrhenius (Gratão et al., 2004; Mafart e Béliard, 1994) para determinação do efeito da temperatura sobre a viscosidade para o óleo de soja, na forma:

$$\ln(\mu) = \ln(\mu_0) + \left(\frac{Ea}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) \quad (02)$$

Onde R é a constante universal dos gases ideais (8,314 kJ.mol⁻¹.K⁻¹); Ea é a energia de ativação, que corresponde a 25,6213 kJ/mol e o parâmetro de ajuste, μ_0 é igual a 1,5932·10⁻⁶ Pa.s, com a temperatura absoluta (T), para um coeficiente de correlação (R²) igual a 0,9999.

Especificamente no campo da indústria de biodiesel, Almeida et al. (2011) esclarecem que as propriedades fluidodinâmicas de um óleo combustível como a viscosidade e a massa específica são importantes no que diz respeito ao funcionamento de motores de injeção por compressão (motores diesel). Os referidos autores destacam que a viscosidade afeta a atomização do combustível no momento de sua injeção na câmara de combustão e, em última análise, a formação de depósitos no motor. Conforme enfatizado por Almeida et al. (2011) a “alta viscosidade é a principal propriedade combustível que justifica a razão do abandono relativamente generalizado do emprego de óleos vegetais puros como combustíveis alternativos ao diesel fóssil”.

Por sua vez, na indústria do aço, no tratamento térmico de tempera, os óleos vegetais tem sido investigados na formulação de meios de resfriamento, no entanto, devido a sua instabilidade de oxidação e faixa estrita de viscosidade os resultados não tem sido promissores (Farah, 2002).

Como referência de valores para viscosidade da glicerina, como função da temperatura baseada na literatura, Trejo et al. (2011), com base nos trabalhos prévios de Chen e Pearlstein (1987) e a partir do ajuste aos dados experimentais da glicerina pura no intervalo de temperatura absoluta de 193,15 a 433,15 K, a correlação:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(\frac{A}{T^3} + BT + \frac{C}{T}\right) \quad (03)$$

Onde os seguintes valores para os seus parâmetros são dados como: $\ln(\mu_0/\text{mPa}\cdot\text{s}) = 25,8709$, $A = 3,0942 \cdot 10^8 \text{ K}^3$, $B = -0,0327 \text{ K}^{-1}$ e $C = -6.291,03 \text{ K}$.


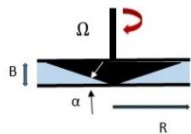
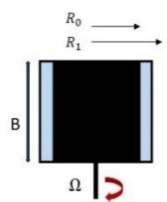
Este artigo descreve um experimento com fins acadêmicos para a determinação da massa específica e da viscosidade dinâmica de um fluido (óleo vegetal de soja, querosene e detergente de marca comercial), por meio do Método de Stokes, um procedimento experimental simples e de baixo custo que, no entanto, possibilita o entendimento de conceitos diversos de Fenômenos de Transporte, mais especificamente da área de Mecânica dos Fluidos, aplicada ao campo da Engenharia. Trata-se de uma experiência didática como aquela proposta por Vaz et al. (2012), voltada para a graduação em Engenharia e com foco nas incertezas associadas a cada medida e/ou determinação (Andrade et al. 2017 e Silva et al., 2017). Este trabalho tem como objetivo contribuir com estudos sobre a elaboração e a implementação de propostas de atividade didática baseada em experimento de cunho investigativo (Cortés Gracia & Gándara Gómez, 2007).

Viscosímetros

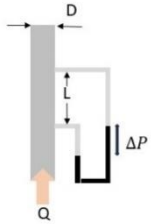
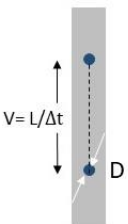
Para aferir a viscosidade de fluidos newtonianos geralmente são utilizados instrumentos denominados viscosímetros. Essa aparelhagem pode ser dividida em duas categorias ou testes: o primário e o secundário. O Teste primário é caracterizado por instrumentos que realizam uma medida direta da tensão e da taxa de deformação do fluido. Nestes, destacam-se o viscosímetro de disco, de cone-disco, de cilindro rotativo. Os viscosímetros do Teste secundário, por sua vez, inferem a razão entre a tensão aplicada e a taxa de deformação por meios indiretos, não as medindo. Nesse Teste, incluem-se o viscosímetro capilar e o viscosímetro de Stokes. Esses dispositivos supracitados são descritos no Quadro 1.

Quadro 1: Tipos de viscosímetros

TESTE PRIMÁRIO

Viscosímetro de disco		<ul style="list-style-type: none"> • Menor volume de amostra de fluido requerido • Melhores para análises em temperaturas diferentes do ambiente 	$\mu = \frac{T 2B}{\pi \Omega R^4}$ <p><i>T = Torque oriundo da deformação do fluido</i> <i>Ω = Rotação aplicada</i></p>
Viscosímetro de cone-disco		<ul style="list-style-type: none"> • Menor volume de amostra de fluido requerido • Melhores para análises em temperaturas diferentes do ambiente 	$\mu = \frac{T \alpha}{2\pi \Omega R^3}$
Viscosímetro de cilindro rotativo		<ul style="list-style-type: none"> • Válido tanto para fluidos newtonianos tanto para fluidos com comportamento tensão versus deformação não linear 	$\mu = \frac{T B}{4\pi \Omega} \frac{R_1^2 - R_0^2}{R_1^2 - R_0^2}$

TESTE SECUNDÁRIO

Viscosímetro capilar		<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo • Apenas para fluidos Newtoniano 	$\mu = \frac{\pi \Delta P D^4}{128 L Q}$ <p><i>Q = vazão volumétrica</i> <i>ΔP = diferença de pressão</i></p>
Viscosímetro de Stokes		<ul style="list-style-type: none"> • Menor custo • Maiores volumes de amostra de líquidos são requeridos • Só é efetivo para líquidos translúcidos • Apenas para fluidos Newtoniano 	$\mu = \frac{1 g D^2 (\rho_{esfera} - \rho_{fluido})}{8 V}$

O Quadro 1 apresenta um estudo comparativo dos tipos de viscosímetros. Embora todos apresentem algumas características comuns, e inclusive possam ser utilizados em uma mesma área, os mais simples, como o de Ostwald e o de Stokes são geralmente usados em menor escala, por exemplo em experimentos laboratoriais e estudos menores. Já os mais modernos são aplicados em processos industriais, e hoje inclusive se utiliza muito sistemas online que diminuem a fonte de erros que é o analista, uma vez que o sistema eletrônico é mais preciso.

Existem muitos outros tipos e classificações, mas como os mais comuns estão englobados nesses quatro tipos, fez-se a comparação entre eles. Outros viscosímetros também encontrados são o Ubbelohde, Couette e Saybolt. Em relação aos viscosímetros primários, os mais conhecidos são os de disco, cone-disco e cilindro rotativo.

Viscosímetro de Stokes

O princípio operacional do viscosímetro de Stokes é baseado na determinação da velocidade de queda livre de uma esfera através do fluido do qual se deseja obter a viscosidade. A movimentação de um corpo ao longo de um fluido é determinada por diversos fatores como a massa específica, o tamanho e o formato do corpo; as propriedades do fluido e a resultante das forças atuantes. Um caso característico é o movimento de objetos esféricos por um fluido. Nesses casos, o fenômeno é descrito pela Lei de Stokes, responsável por estudar a força a qual esses objetos esféricos estão submetidos ao passar por um fluido viscoso em regime laminar.

A Lei de Stokes afirma que o movimento de um corpo no meio viscoso é influenciado pela ação de uma força viscosa, F_v , proporcional a uma velocidade v . A lei é válida para escoamentos em regime laminar, ou seja, aquele em que as partículas se deslocam em lâminas individualizadas, sem troca de massa entre elas e o número de Reynolds é menor do que 1 (Brunetti, 2008). O viscosímetro de Stokes permite calcular a viscosidade absoluta a partir da velocidade de descida de uma esfera em um fluido contido em um tubo vertical. A partir dessa medida, pode-se calcular o número de Reynolds, classificando o escoamento e verificando a aplicabilidade da Lei de Stokes.

O viscosímetro de Stokes baseia-se em uma esfera inserida em um fluido que se encontra parado dentro de um recipiente, no qual dois pontos de referência são marcados. Quando a esfera é solta dentro deste fluido, marca-se o tempo que a mesma demora para percorrer até a próxima marcação de referência. A viscosidade dinâmica de um fluido pode ser obtida a partir desse método. Quando a esfera é solta, parte do repouso e à medida que se desloca no fluido adquire velocidade, até que chegue a uma velocidade constante, em que a soma resultante das forças na esfera será nula. Portanto, o tempo que a esfera gasta para percorrer essa distância conhecida permite o cálculo da velocidade. A lei de Stokes, conforme mencionado, relaciona as forças viscosas com a velocidade. Essa relação é mostrada na equação 1:

$$F_v = 6\pi\mu Rv \quad (04)$$

na qual μ é a viscosidade (Pa.s), R é o raio da esfera (m) e v é o módulo da velocidade de queda da esfera (m/s). Essa velocidade aumenta de uma maneira não-uniforme com o passar do tempo, até atingir um valor limite, que ocorre quando a força resultante (soma algébrica da força peso com a força viscosa e o empuxo) sobre a esfera é nula (Figura 1). A partir desse momento, a esfera descreve um movimento retilíneo, e sua velocidade é constante. a uma distância equivalente a 50 diâmetros do ponto de lançamento da esfera, ela atinge a velocidade terminal, isto é, dV/dt é nulo (Sousa, 2017).

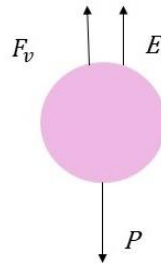


Figura 1 - Resultante das forças atuantes em uma esfera escoando em um fluido.

Portanto, para a v igual a uma constante pode-se escrever que:

$$F_v + E = P \quad (05)$$

Sendo as forças peso e empuxo, respectivamente, definidas como:

$$P = mg = \rho_e \frac{4}{3} \pi R^3 g \quad (06)$$

$$E = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_f g \quad (07)$$

Onde ρ_f é a massa específica do fluido, m é a massa da esfera e ρ_e é a densidade da esfera. Substituindo as definições dadas pelas equações 04, 06 e 07, pode-se escrever a equação (05) da seguinte forma:

$$6\pi\mu v_L R + \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_f g = mg \quad (08)$$

Que pode ser reorganizada em termos da velocidade limite, como:

$$v_L = \frac{2R^2(\rho_e - \rho_f)g}{9\mu} \quad (09)$$

E em termos da viscosidade tem-se a seguinte relação:

$$\mu = \frac{2R^2(\rho_e - \rho_f)g}{9v_L} \quad (10)$$

Evidentemente a validade da solução apresentada pela equação 10 (Lei de Stokes) é restrita a escoamentos com ausência de inércia, correspondendo a regimes com número de Reynolds inferiores à unidade (Sousa, 2017), mais especificamente a Re menores que 0,5, conforme Liao (2002) e Berker (1963). Para Sandoval et al. (2008) a “enganosa simplicidade” do Método de Stokes, limita a sua aplicabilidade apenas para números de Reynolds menores que 0,5, concordando com os estudos prévios de Liao (2002) e Berker (1963), desde que seja incluída uma correção da velocidade terminal devido ao efeito do diâmetro finito do tubo de escoamento, uma vez que a “proximidade da esfera com a parede do tubo aumenta o gradiente de velocidade no fluido em torno da esfera, aumentando, conseqüentemente, a força viscosa e tornando necessário corrigir a sua expressão” (Vertchenko e Vertchenko, 2017). Tal correção pode ser realizada por meio de um fator adimensional k , chamado fator de Ladenburg (1907) (Vertchenko e Vertchenko, 2017), que depende da relação entre os diâmetros da esfera e do tubo de escoamento:

$$k = \left(1 + \frac{2,1R}{A}\right) \quad (11)$$

Ou pela expressão adaptada desenvolvida por Faxen (1922):

$$k = \left(1 - \frac{2,104R}{A} - 2,09 \left(\frac{R}{A}\right)^3 - 1,095 \left(\frac{R}{A}\right)^5\right)^{-1} \quad (12)$$

onde R é o raio da esfera e A é o raio do tubo.

Essa correção implica a velocidade que a esfera teria se o diâmetro do tubo fosse infinito (Vertchenko e Vertchenko, 2017).

A correção de Ladenburg pode ser reescrita em função do raio da esfera, raio do tubo e da sua altura, de modo que a força viscosa e a velocidade de limite ficam definidas por:

$$F'_v = kF_v = K6\pi\mu R \quad (13)$$

$$v'_L = kv_L = \frac{2K(\rho_e - \rho_f)gR^2}{9\mu} \quad (14)$$

Sendo que k é dado por:

$$k = \left(1 + \frac{2,4R}{A}\right) \left(1 + \frac{3,3R}{B}\right) \quad (15)$$

e é chamado fator de correção para paredes finitas ou simplesmente de Fator de correção de Ladenburg, sendo que R é o raio da esfera; A é o raio do tubo, e B é a distância total percorrida pelo fluido após lançamento no tubo. A adoção do Fator de correção de Ladenburg estende a aplicabilidade do Método de Stokes para Reynolds em torno de 30. O ajuste apresenta resultados satisfatórios desde que $R \ll B$ e $R/A < 0,2$ (Sandoval et al., 2009).

Uma série de outros trabalhos foram realizados e apresentam propostas para o fator de correção, como aqueles desenvolvidos por Francis (1933), Haberman e Sayre (1958), Bohlin (1960), Kawata et al. (1963) e outros tantos discutidos por Foued e Vamegh (2021).

Materiais e Métodos

Para a realização dos experimentos foram utilizados três cronômetros digitais, três fluidos (detergente, glicerina, óleo vegetal de soja de marca comercial), água destilada, três provetas de 25 mL, três buretas de marcas, modelos e capacidades distintos, uma balança semianalítica da marca GEHARA modelo BK4000, um termômetro, réguas graduadas de 30 cm, trena, um marcador para retroprojektor e 10 esferas de vidro de 4,4 mm de diâmetro.

Na primeira etapa do procedimento experimental foram aferidas as temperaturas da água e dos fluidos (detergente, glicerina e óleo vegetal). Foi pesada a proveta vazia e com água para determinação do volume verdadeiro da vidraria, sendo o cálculo realizado com o valor da massa específica da água à temperatura de trabalho. Posteriormente, pesou-se a proveta com o fluido e, em seguida, as 10 esferas, para que se pudesse calcular a massa específica desses. Para o cálculo da massa específica da esfera, utilizou-se a equação, relacionando a densidade da esfera com a massa e o volume.

$$\rho_{esf} = \frac{m_{esf}}{\frac{4}{3}\pi R_{esf}^3} \quad (16)$$

onde m_{esf} é a média da massa de 10 esferas e R_{esf} é o raio médio da mesma. Como o raio foi dado ($0,440 \pm 0,005$ cm) e a massa total das 10 esferas foi medida e encontrada como ($0,89 \pm 0,01$) mg, obteve-se a massa específica da esfera igual a ($1.995,42 \pm 137,94$) kg/m³. A informação acerca do raio médio das esferas foi obtida de experimento prévio, com a utilização de paquímetro analógico (resolução de 0,01 cm e incerteza de $\pm 0,005$ cm).

Numa segunda etapa, para determinação da velocidade da esfera no fluido, completou-se o volume da bureta com o fluido em questão, e, com auxílio de uma régua delimitou-se a distância considerada para o cálculo da velocidade limite das esferas no escoamento (para tal, foram realizados procedimentos prévios qualitativos com a esfera e o fluido). Depositou-se cada esfera, (dez no total) no centro da bureta e foi verificado o tempo de traslado de cada uma entre o início e fim da marcação por meio de sensores cronômetros para efetuar a média do tempo gasto. Os dados coletados foram registrados para a determinação da velocidade terminal corrigida, viscosidade dinâmica, número de Reynolds, entre outras grandezas físicas.

Identificou-se as incertezas associadas aos instrumentos e vidrarias usados, anotando-se as menores leituras, fundo de escala e as incertezas associadas a cada instrumento/vidraria, quando disponíveis. Os valores de viscosidade determinados neste trabalho referem-se a valores médios, obtidos por triplicata de leitura dos instrumentos e medidas em vidraria e balança.

As incertezas propagadas foram determinadas por meio da Metodologia de Kline e McClintock (Pritchard e Mitchell, 2019; GUM, 2008; Donatelli e Konrath, 2005; Chui et al., 2001), como desenvolvido por Andrade et al. (2017) e Silva et al. (2017). Ressalta-se que o desvio padrão nas repetições foi considerado pouco significativo, a frente das incertezas propagadas, de modo que foram negligenciadas na incerteza combinada. Entende-se aqui incerteza como “um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem com razoabilidade ser atribuídos ao mensurando, conforme definido em GUM (2008). E como ressalta Cabral (2004) “incerteza” é, por definição, uma estimativa que quantifica a confiabilidade do resultado obtido. Considerando estes conceitos e em busca da qualificação dos resultados obtidos e apresentados, neste trabalho, aplica-se a Metodologia de Kline e McClintock por meio de implementação no software Engineering Equation Solver - EES (Dash, 2014; Siqueira et al., 2018; e Klein e Nellis, 2012).

Importante ainda destacar que como a viscosidade depende fortemente da temperatura, monitorou-se a temperatura dos fluidos envolvidos ao longo do período de coleta de dados e considerou-se nos cálculos o valor médio.

Montagem e funcionamento do aparato simulando o viscosímetro de Stokes

O viscosímetro de Stokes foi representado por um aparato improvisado com a bureta, acoplada ao suporte por meio de garras de modo a ficar na posição vertical. Em seguida, o fluido foi adicionado à bureta até sua marca inicial. Assim, as esferas de vidro são lançadas dentro da bureta com o auxílio de uma pinça metálica, com cuidado para que não entrem em contato com a parede do tubo. Dessa forma, espera-se para que elas percorram uma certa distância e, assim, atinjam uma velocidade constante para que, então, cronometre-se o tempo que elas demoram para percorrer um comprimento previamente demarcado na bureta. A espera de um intervalo de tempo para que as esferas atinjam uma velocidade constante é necessária porque, quando a esfera é liberada, a sua velocidade de queda vai aumentando e, conseqüentemente, a força de arraste também aumenta, até que, em um certo momento, a força de arraste somada com o empuxo causado pelo fluido se iguala à força peso da esfera. Quando essa situação acontece, o somatório das forças resultantes na esfera é nulo, com isso,

a aceleração da mesma também é nula, fazendo com que ela se mova com velocidade constante, também chamada de velocidade limite. Vale pontuar que, para minimizar os erros do experimento, foram realizadas 10 réplicas do experimento para cada fluido, ou seja, fossem lançadas 10 esferas de vidro no viscosímetro construído.

Cálculos e Resultados

Determinação/especificação das incertezas dos instrumentos usados

A Tabela 1 mostra as incertezas associadas aos instrumentos e vidrarias usados. Considerando-se que o termômetro utilizado possui resolução de 1°C. A limitação devido à resolução é uma avaliação de incerteza tipo B (Pritchard e Mitchell, 2019; GUM, 2008; Donatelli e Konrath, 2005; Chui et al., 2001), pois esta introduz uma componente adicional de erro devido ao truncamento numérico na leitura da temperatura. O máximo erro de truncamento corresponde à metade do valor da resolução (0,5°C no caso). De maneira similar, a incerteza para a vidraria corresponde a $\pm 0,05$ mL (conforme bem colocado por Chui et al., 2001). Para a régua/trena, as incertezas são da ordem de $\pm 0,05$ cm. Já para a leitura de tempo, como o cronômetro é digital, e não se dispõe de informações adicionais nos manuais do fabricante, considerou a incerteza igual a menor leitura possível. Finalmente para as medições de massa, a incerteza foi atribuída aquela informada no manual do fabricante da balança.

Tabela 1 – Incerteza dos instrumentos e vidrarias.

Instrumento/ Medida	Termômetro (°C)	Proveta e bureta (mL)	Régua/ Trena (cm)	Cronômetro (s)	Balança (g)
Resolução/Menor leitura	1	0,1	0,1		0,01
Incerteza	$\pm 0,5$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01^*$

*informação extraída do Manual do equipamento, com 95% de confiança.

Determinação da massa específica da água

Aferiu-se a temperatura da água, sendo encontrado $(23,0 \pm 0,5)$ °C. Segundo Perry et al. (2018), valor da massa específica da água, nesta temperatura é $997,56 \text{ kg/m}^3$. A temperatura da água foi a mesma para todos os experimentos tratados.

Determinação da massa específica do fluido

Aferiu-se a temperatura do óleo, sendo encontrado $(23,0 \pm 0,5)$ °C. Na sequência, calculou-se a massa específica do fluido, usando a proveta e uma balança. Os valores de massa específica determinados para os três fluidos investigados foram bem próximos dos valores encontrados na literatura, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Determinação da massa específica do fluido.

Fluido (-)	Massa do fluido, (g)	Volume de fluido na proveta (ml)	Massa específica do Fluido, (kg/m^3)	Densidade Relativa do Fluido, (-)
Óleo de soja	$22,49 \pm 0,01$	$25,0 \pm 0,5$	$899,60 \pm 18,00$	$0,902 \pm 0,018$
Glicerina	$32,45 \pm 0,01$	$25,0 \pm 0,5$	$1.298,00 \pm 25,97$	$1,302 \pm 0,026$
Detergente	$24,90 \pm 0,01$	$25,0 \pm 0,5$	$996,00 \pm 19,93$	$0,999 \pm 0,020$

Óleo Vegetal de Soja:

As características de identidade para óleos vegetais refinados, definidos pela Instrução Normativa Nº 49, de 22 de dezembro de 2006, fixa a faixa de densidade relativa à 20°C de 0,919 a 0,929. Para o óleo de soja analisado, a densidade relativa foi determinada igual a $(0,902 \pm 0,020)$ a temperatura de 25°C (Tabela 2). Considerando a faixa de incerteza propagada, a densidade da amostra analisada apresentou densidades dentro da faixa aceitável para ao óleo de soja comercial, conforme a referida Norma (Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade dos Óleos Vegetais Refinados), de modo a indicar que não existem quantidades significativas de água ou impurezas que alterem a densidade do óleo. O valor encontrado está coerente com os resultados experimentais, como aqueles de Brock et al. (2008).

Glicerina:

Com relação a glicerina, os resultados mostram que a amostra analisada apresenta densidade relativamente mais alta que o valor esperado (na faixa de 1,250 a 1,270), com ordem de cerca de 3,33% de variação, acima da incerteza propagada correspondente a determinação da propriedade, em torno de 2%. Conforme bem colocado por Medeiros et al. (2015), indicando que, provavelmente, a amostra possui “ésteres, ácidos graxos e umidade que são menos densos que $1,26\text{g/cm}^3$ ”.

Detergente:

Os detergentes são saneantes, conforme estabelece a Lei Nº 6.360 de 23 de setembro de 1976 “VII - Saneantes Domissanitários: substâncias ou preparações destinadas à higienização, desinfecção ou desinfestação domiciliar, em ambientes coletivos e/ou públicos, em lugares de uso comum e no tratamento da água, compreendendo: a) inseticidas ... b) raticidas ... c) desinfetantes ...; d) detergentes - destinados a dissolver gorduras e à higiene de recipientes e vasilhas, e a aplicações de uso doméstico.” Finalmente, com relação ao detergente analisado: verifica-se que o valor encontrado para a massa específica – $(996,00 \pm 19,93) \text{ kg/m}^3$, apresenta uma incerteza propagada de 2%. O valor da massa específica está levemente abaixo dos valores de referência para detergentes comerciais ($> 1,026$).

Determinação da viscosidade do fluido

Na etapa de determinação das viscosidades dos fluidos, as medidas das vidrarias (bureta) são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Medidas da bureta para determinação da Correção de Ladenburg.

Experimento com o Fluido (-)	Raio da bureta, A (cm)	Altura total da bureta, B (cm)
Óleo de soja	$0,73 \pm 0,05$	$50,00 \pm 0,05$
Glicerina	$0,77 \pm 0,05$	$55,40 \pm 0,05$
Detergente	$0,77 \pm 0,05$	$55,40 \pm 0,05$

Considerando-se a especificidade de cada fluido, as distâncias percorridas pelas esferas no viscosímetro de Stokes foram distintas e estão listadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Distâncias percorridas pela esfera para o cálculo da velocidade no viscosímetro de Stokes.

Experimento com o Fluido (-)	Distância percorrida, (cm)
Óleo de soja	30,00 ± 0,05
Glicerina	27,10 ± 0,05
Detergente	22,29 ± 0,05

Os valores para 10 medidas experimentais de tempo para a determinação da viscosidade pelo Método de Stokes para cada um dos três fluidos investigados estão resumidos na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 – Valores dos tempos coletados e a viscosidade determinada.

1.10	1 TEMPO _{OLEO} [s]	2 TEMPO _{DET} [-]	3 TEMPO _{GLIC} [s]	4 MI _{OLEO} [Pa.s]	5 MI _{DET} [Pa.s]	6 MI _{GLIC} [Pa.s]
Run 1	3.31±0.01	21.15±0.01	44.92±0.01	0.077±0.007	0.620±0.065	0.770±0.123
Run 2	3.38±0.01	22.10±0.01	55.73±0.01	0.079±0.007	0.648±0.068	0.955±0.153
Run 3	3.38±0.01	22.38±0.01	52.67±0.01	0.079±0.007	0.656±0.069	0.903±0.145
Run 4	3.22±0.01	21.98±0.01	57.39±0.01	0.075±0.007	0.644±0.067	0.984±0.158
Run 5	3.31±0.01	22.58±0.01	48.63±0.01	0.077±0.007	0.662±0.069	0.833±0.134
Run 6	3.47±0.01	22.20±0.01	56.21±0.01	0.081±0.008	0.651±0.068	0.963±0.154
Run 7	3.60±0.01	21.58±0.01	52.50±0.01	0.084±0.008	0.633±0.066	0.900±0.144
Run 8	3.50±0.01	22.18±0.01	55.68±0.01	0.081±0.008	0.650±0.068	0.954±0.153
Run 9	3.50±0.01	22.55±0.01	40.48±0.01	0.081±0.008	0.661±0.069	0.694±0.111
Run 10	3.53±0.01	22.55±0.01	52.98±0.01	0.082±0.008	0.661±0.069	0.908±0.146

Tabela 6 – Valores Médios para a Viscosidade Dinâmica obtidos experimentalmente,

Experimento com o Fluido (-)	R/A, (-)	R/B, (-)	Re _D , (-)	Viscosidade Dinâmica, (Pa.s)
Óleo de soja	0,30	4,40 · 10 ⁻³	7,056 ± 0,974	0,080 ± 0,001
Glicerina	0,29	3,97 · 10 ⁻³	0,054 ± 0,011	0,885 ± 0,015
Detergente	0,29	3,97 · 10 ⁻³	0,110 ± 0,016	0,649 ± 0,007

Na Tabela 5 estão apresentados os valores obtidos para a viscosidade em cada uma das coletas realizadas. A partir destes valores, foram retirados os valores médios que estão disponibilizados na Tabela 6. Os valores obtidos para a viscosidade foram satisfatórios comparando-os com valores conhecidos experimentalmente ou mesmos calculados por meio de correções como função da temperatura. Os dados da Tabela 6 mostram que a aplicabilidade da Lei de Stokes no experimento é válida, para as razões R/A e R/B e número de Reynolds apresentados.

Óleo Vegetal de Soja:

As características de identidade para óleos vegetais refinados, definidos pela Instrução Normativa N° 49, de 22 de dezembro de 2006, não fazem nenhuma menção a faixa de viscosidade dinâmica ou viscosidade cinemática para óleo vegetal refinado de soja. Neste estudo a viscosidade dinâmica encontrada, a temperatura de (23,0 ± 0,5)°C, foi de (0,080 ± 0,001) Pa.s. O valor encontrado está coerente com os resultados experimentais, como aqueles de Brock et al. (2008). Foram encontrados desvios médios absolutos percentuais da ordem de 50% e 18%, respectivamente, com relação a

correlação proposta por Canciam (2008) e aquela desenvolvida por Brock et al. (2008). Tais divergências podem ser devidas ao fato de o óleo analisado estar sendo reutilizado em experimentos no laboratório e ao longo do tempo a tendência é sua degradação, com efeito normal correspondendo a um aumento da viscosidade.

Glicerina:

Neste estudo a viscosidade dinâmica encontrada, a temperatura de $(23,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, foi de $(0,885 \pm 0,015)$ Pa.s. O resultado obtido está coerente com os dados experimentais, conforme dados disponíveis em Pritchard e Mitchell (2019) e com os valores experimentais em Vertchenko e Vertchenko, 2017 e Lide, 2006), que indicaram o valor 0,951 Pa.s, a temperatura de 23°C .

Detergente:

A viscosidade encontrada para esse fluido foi de $(0,649 \pm 0,007)$ Pa.s a temperatura de $(23,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. A Resolução Normativa nº 1/78 da ANVISA estabelece que o produto detergente deve ter no mínimo 0,1 Pa.s (100 cP) de viscosidade. A literatura mostra que há grande variação entre diferentes marcas de detergentes, como comprovaram Coringa et al. (2007). Estes autores avaliaram a qualidade físico-química de 9 marcas de detergentes domésticos adquiridos no comércio local e encontraram valores para a viscosidade dinâmica de (110 a 386) cP, a temperatura ambiente, usando viscosímetro tipo Copo Ford nº4. Independentemente desta faixa, a amostra analisada atende este quesito da Norma brasileira. Cabe destacar ainda que o detergente utilizado no presente estudo é detergente industrial (para aplicações não domésticas) de alta viscosidade que foi diluído.

Análise da Propagação de Incertezas

Deve-se observar que os resultados de viscosidade dinâmica para os três fluidos apresentam baixa incerteza propagada. Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentados os resultados da Análise de Propagação de Incertezas, calculadas via software EES. Os resultados indicam que, para os três fluidos analisados, a grandeza Raio da Esfera (R) foi a que mais impactou na determinação da incerteza da viscosidade, com contribuição de 83,41%, 86,03% e 83,41%, respectivamente para o óleo, o detergente e a glicerina. O que evidencia a necessidade de se tomar medidas do raio da esfera, usando um instrumento, que possibilite uma incerteza menor. Como as leituras atuais foram realizadas com um paquímetro, sugere-se em outras oportunidades, a utilização de um micrometro para a determinação do diâmetro das esferas, o que garantiria, no mínimo, a inclusão de mais uma casa decimal as leituras tipicamente obtidas a partir de paquímetro. As medidas das massas das esferas, bem como a incerteza nas medições de volume também contribuem para a determinação da incerteza nos resultados. Os resultados da análise de propagação de incertezas mostram que o sensor de temperatura não afeta significativamente os resultados obtidos.

Variable	Value	Partial Derivative	Contribution (%)
RAIO_CILINDRO_OLEO	0.73±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial RAIO_{CILINDRO_OLEO} = 0$	0.00 %
RAIO_ESFERA	0.2200±0.0050 [cm]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial RAIO_{ESFERA} = -2.7461$	88.96 %
TEMPO_DET	22.55±0.01 [-]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial TEMPO_{DET} = -0.00$	0.00 %
TEMPO_GLIC	52.98±0.01 [s]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial TEMPO_{GLIC} = 0.00$	0.00 %
TEMPO_OLEO	3.53±0.01 [s]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial TEMPO_{OLEO} = 0.00$	0.00 %
VOL	25±0.5	$\partial MI_{oleo,M} / \partial VOL = 0.006352$	4.76 %
MI_oleo,M	0.080±0.001 [Pa.s]		
DIST_DET	22.29±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial DIST_{DET} = 0$	0.00 %
DIST_GLIC	27.1±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial DIST_{GLIC} = 0$	0.00 %
DIST_OLEO	30±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial DIST_{OLEO} = -0.0002738$	0.03 %
H_CILINDRO_DET	55.4±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial H_{CILINDRO_DET} = 0$	0.00 %
H_CILINDRO_GLIC	55.4±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial H_{CILINDRO_GLIC} = 0$	0.00 %
H_CILINDRO_OLEO	50±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial H_{CILINDRO_OLEO} = 0$	0.00 %
M_ESFERAS	0.91±0.01	$\partial MI_{oleo,M} / \partial M_{ESFERAS} = 0.01615$	4.35 %
M_F_DET	24.9000±0.0100	$\partial MI_{oleo,M} / \partial M_{F_DET} = -0.0000$	0.00 %
M_F_GLIC	32.450±0.010 [Pa.s]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial M_{F_GLIC} = 0.000$	0.00 %
M_F_OLEO	22.4900±0.0100	$\partial MI_{oleo,M} / \partial M_{F_OLEO} = -0.0003$	0.00 %
RAIO_CILINDRO_DET	0.77±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial RAIO_{CILINDRO_DET} = 0$	0.00 %
RAIO_CILINDRO_GLIC	0.77±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial RAIO_{CILINDRO_GLIC} = 0$	0.00 %
RAIO_CILINDRO_OLEO	0.73±0.05	$\partial MI_{oleo,M} / \partial RAIO_{CILINDRO_OLEO} = 0.004725$	9.32 %
RAIO_ESFERA	0.2200±0.0050 [cm]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial RAIO_{ESFERA} = -0.1414$	83.41 %
TEMPO_DET	22.55±0.01 [-]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial TEMPO_{DET} = -0.00$	0.00 %
TEMPO_GLIC	52.98±0.01 [s]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial TEMPO_{GLIC} = 0.00$	0.00 %
TEMPO_OLEO	3.53±0.01 [s]	$\partial MI_{oleo,M} / \partial TEMPO_{OLEO} = 0.00$	0.09 %
VOL	25±0.5	$\partial MI_{oleo,M} / \partial VOL = 0.0002592$	2.80 %

Figura 2 – Análise de Propagação de Incertezas, via software EES: óleo.

Variable	Value	Partial Derivative	Contribution (%)
MI_det,M	0.649±0.007 [Pa.s]		
DIST_DET	22.29±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial DIST_{DET} = -0.002966$	0.05 %
DIST_GLIC	27.1±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial DIST_{GLIC} = 0$	0.00 %
DIST_OLEO	30±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial DIST_{OLEO} = 0$	0.00 %
H_CILINDRO_DET	55.4±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial H_{CILINDRO_DET} = 0$	0.00 %
H_CILINDRO_GLIC	55.4±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial H_{CILINDRO_GLIC} = 0$	0.00 %
H_CILINDRO_OLEO	50±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial H_{CILINDRO_OLEO} = 0$	0.00 %
M_ESFERAS	0.91±0.01	$\partial MI_{det,M} / \partial M_{ESFERAS} = 0.1419$	4.21 %
M_F_DET	24.9000±0.0100	$\partial MI_{det,M} / \partial M_{F_DET} = -0.0025$	0.00 %
M_F_GLIC	32.450±0.010 [Pa.s]	$\partial MI_{det,M} / \partial M_{F_GLIC} = 0.000$	0.00 %
M_F_OLEO	22.4900±0.0100	$\partial MI_{det,M} / \partial M_{F_OLEO} = 0.0000$	0.00 %
RAIO_CILINDRO_DET	0.77±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial RAIO_{CILINDRO_DET} = 0.03493$	6.38 %
RAIO_CILINDRO_GLIC	0.77±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial RAIO_{CILINDRO_GLIC} = 0$	0.00 %
RAIO_CILINDRO_OLEO	0.73±0.05	$\partial MI_{det,M} / \partial RAIO_{CILINDRO_OLEO} = 0$	0.00 %
RAIO_ESFERA	0.2200±0.0050 [cm]	$\partial MI_{det,M} / \partial RAIO_{ESFERA} = -1.2826$	86.03 %
TEMPO_DET	22.55±0.01 [-]	$\partial MI_{det,M} / \partial TEMPO_{DET} = 0.00$	0.00 %
TEMPO_GLIC	52.98±0.01 [s]	$\partial MI_{det,M} / \partial TEMPO_{GLIC} = 0.00$	0.00 %
TEMPO_OLEO	3.53±0.01 [s]	$\partial MI_{det,M} / \partial TEMPO_{OLEO} = 0.00$	0.00 %
VOL	25±0.5	$\partial MI_{det,M} / \partial VOL = 0.002522$	3.33 %

Figura 3 – Análise de Propagação de Incertezas, via software EES: detergente.

Uncertainty Results		Solution	
$M_{glic,M} = 0.886 \pm 0.015$ [Pa.s]			
$DIST_{DET} = 22.29 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial DIST_{DET} = 0$		0.00 %
$DIST_{GLIC} = 27.1 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial DIST_{GLIC} = -0.003351$		0.01 %
$DIST_{OLEO} = 30 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial DIST_{OLEO} = 0$		0.00 %
$H_{CILINDRO,DET} = 55.4 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial H_{CILINDRO,DET} = 0$		0.00 %
$H_{CILINDRO,GLIC} = 55.4 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial H_{CILINDRO,GLIC} = 0$		0.00 %
$H_{CILINDRO,OLEO} = 50 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial H_{CILINDRO,OLEO} = 0$		0.00 %
$M_{ESFERAS} = 0.91 \pm 0.01$	$\partial M_{glic,M} / \partial M_{ESFERAS} = 0.2743$		3.55 %
$M_{F,DET} = 24.9000 \pm 0.0100$	$\partial M_{glic,M} / \partial M_{F,DET} = 0.0000$		0.00 %
$M_{F,GLIC} = 32.450 \pm 0.010$ [Pa.s]	$\partial M_{glic,M} / \partial M_{F,GLIC} = -0.005$		0.00 %
$M_{F,OLEO} = 22.4900 \pm 0.0100$	$\partial M_{glic,M} / \partial M_{F,OLEO} = 0.0000$		0.00 %
$RAIO_{CILINDRO,DET} = 0.77 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial RAIO_{CILINDRO,DET} = 0$		0.00 %
$RAIO_{CILINDRO,GLIC} = 0.77 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial RAIO_{CILINDRO,GLIC} = 0.04799$		2.72 %
$RAIO_{CILINDRO,OLEO} = 0.73 \pm 0.05$	$\partial M_{glic,M} / \partial RAIO_{CILINDRO,OLEO} = 0$		0.00 %
$RAIO_{ESFERA} = 0.2200 \pm 0.0050$ [cm]	$\partial M_{glic,M} / \partial RAIO_{ESFERA} = -2.7461$		88.96 %
$TEMPO_{DET} = 22.55 \pm 0.01$ [-]	$\partial M_{glic,M} / \partial TEMPO_{DET} = -0.00$		0.00 %
$TEMPO_{GLIC} = 52.98 \pm 0.01$ [s]	$\partial M_{glic,M} / \partial TEMPO_{GLIC} = 0.00$		0.00 %
$TEMPO_{OLEO} = 3.53 \pm 0.01$ [s]	$\partial M_{glic,M} / \partial TEMPO_{OLEO} = 0.00$		0.00 %
$VOL = 25 \pm 0.5$	$\partial M_{glic,M} / \partial VOL = 0.006352$		4.76 %

Figura 4 – Análise de Propagação de Incertezas, via software EES: glicerina.

Por fim, os resultados obtidos permitem uma relação direta com os comportamentos observados na prática, e confirmando os resultados esperados. A diferença observada entre as viscosidades dos fluidos está diretamente relacionada com as interações intermoleculares das moléculas que os constituem. Fluidos mais viscosos apresentam interações intermoleculares mais fortes, portanto implicando maior resistência ao escoamento. Neste trabalho, pelos resultados de viscosidade dinâmica obtidos, confirma-se que o fluido mais viscoso é a glicerina e o menos viscoso, o óleo, que por sua vez, oferece menor resistência ao escoamento da esfera no experimento, fazendo com que sua velocidade seja elevada, e, portanto, apresentando um número de Reynolds maior. A explicação para o comportamento apresentado encontra-se, justamente, nos tipos de interações intermoleculares presentes no fluido. Ligações de hidrogênio, por exemplo, são mais fortes, de modo que fluidos que apresentem moléculas que realizem essas interações tendem a ser mais viscosos. Caso as interações predominantes sejam do tipo forças de London ou de van der Waals, a viscosidade, e, conseqüentemente, a resistência ao escoamento é menor, pois essas interações são mais fracas. A imprecisão nas medições das dimensões da bureta e demais comprimentos ou distâncias, bem como na marcação dos tempos de percurso das esferas e as resoluções e incertezas associadas a balança e vidraria contribuem para a qualidade dos resultados obtidos quanto a incerteza propagada. A irregularidade no tamanho e na forma das esferas também devem ser levadas em consideração, pois interferem diretamente no tempo gasto para que a esfera percorra a coluna de fluido e conseqüentemente na determinação da viscosidade do fluido. Na determinação das massas específica, sugere-se a utilização de picnômetros e de uma balança analítica.

Conclusão

O presente estudo permitiu analisar o movimento de uma esfera através de três fluidos viscosos, a saber: detergente, óleo de soja e glicerina. Conhecendo-se as forças que atuam sobre a esfera e sabendo-se o tempo que as mesmas levam para percorrer uma determinada distância marcada em vidraria, calculou-se a velocidade média terminal da esfera. A partir dos dados coletados neste experimento (com base na Lei de Stokes) foi possível realizar o cálculo da viscosidade do fluido e do número de Reynolds correspondente ao escoamento da esfera. Verificou-se que quando abandonamos a esfera no fluido considerado, a mesma tende a adquirir um movimento uniforme e quando encontra a parte inferior da vidraria do viscosímetro, torna-se desacelerado, devido à perda de energia cinética do contato com a esfera com as moléculas do fluido e com as paredes da vidraria. Vale destacar também sobre a dependência das forças intermoleculares com a viscosidade do fluido.

Interações intermoleculares mais efetivas culminam em uma aproximação de moléculas mais efetivas, ou seja, a força que une as moléculas desse fluido é mais forte. Desse modo, a tendência de o fluido escoar é mais difícil. Assim, fluidos cujas moléculas experimentam forças intermoleculares mais fracas têm viscosidades menores, uma vez que a aproximação de moléculas é menor e o fluido tende a escoar mais facilmente. Tal constatação foi evidente na experimentação realizada.

O experimento de Stokes tem sua importância por representar a simplificação de um processo comumente utilizado pelas indústrias químicas para a determinação de uma propriedade termofísica importante para o campo da engenharia, a viscosidade do fluido e que permite ao engenheiro a capacidade de dimensionar equipamentos que por ventura, entrarão em contato com o fluido em questão, projetar e simular equipamentos e processos industriais, entre outras possibilidades.

Diante dos fatos apresentados, e apesar de se tratar de experimento simples, de fácil execução e de baixo custo e dos erros inerentes aos procedimentos experimentais, o método utilizado para determinação das viscosidades dos fluidos foi satisfatório, ao possibilitar o estudo de diversos conceitos pertinentes a área de Fenômenos de Transporte, bem como ao verificar que os valores calculados com os dados experimentais são coerentes e se aproximam dos valores encontrados na literatura científica.

O desenvolvimento desta implementação prática como uma ferramenta de apoio as disciplinas de Fenômenos de Transporte, mais especificamente, Mecânica dos Fluidos pode permitir ao estudante estabelecer e vivenciar conceitos básicos e fundamentais, bem como possibilitar ao estudante verificar, propor, analisar, discutir, investigar a adequação de material ao seu nível de ensino e à condições dos laboratórios de ensino de engenharia e a realidade do profissional de engenharia na indústria. Por fim, permitiria ao docente testar a potencialidade desta ferramenta enquanto instrumento de aquisição de conhecimentos acadêmicos (e de avaliação de conhecimentos previamente adquiridos em disciplinas como Física, Introdução a Engenharia, Programação de Computadores, Métodos Numéricos, Química Analítica, etc.) de forma a sugerir ajustes e alterações ao modelo construído.

Finalmente, este trabalho pode contribuir com estudos sobre a elaboração e a implementação de uma proposta de atividade didática baseada em experimento de cunho investigativo na área de Fenômenos de Transporte, pois conforme Cortés Gracia & Gándara Gómez (2007), a experimentação didática realizada contempla as principais características do processo de ensino por investigação, uma vez que possibilita ao docente e seus alunos, a seleção e a formulação de um problema; a formulação e a seleção de conjecturas ou hipóteses iniciais pertinentes ao tema proposto; o planejamento necessário para dar solução ao problema em análise; a execução do planejamento definido; a preparação e análise dos dados obtidos na experimentação; a expressão adequada e qualificada dos resultados; a conclusão do trabalho e, por fim, a comunicação para a formulação dos resultados da investigação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio por parte da Universidade Federal de Viçosa (UFV) - Brasil e da Faculty of Technology, University of El Oued - Argélia. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

- Almeida, J. K. P.; Nunes, G. P.; Teixeira, C. C. M.; Rodrigues, D. P.; Mello, J. R. (2011). Caracterizações Físico-Químicas de Óleos Vegetais Utilizados para Produção de Biodiesel com Metodologias Alternativas Simples. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte: ENEGEP.
- Andrade, A. C. A., Reis, H. F. A. F., Siqueira, A. M. de O., Madureira, M. F., Gouvea, N. A., Gonzaga, L. F., Menezes, T. L. de, & Freire, B. H. de F. (2017). Propagação de incertezas: um experimento acadêmico simples. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 3(3), 358–368. <https://doi.org/10.18540/jcecvl3iss3pp358-368>.
- Berker, R. (1963). *Handbuch der Physik* v. 8 Ed. SpringerVerlag, Berlin.
- Bohlin, X. (1960). On the drag on a rigid sphere moving in a viscous fluid inside a cylindrical tube. *Trans Roy. Inst. Teck.* 155, 1-63.
- Brock, J. et al. (2008). Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. *Ciência e tecnologia de alimentos: Campinas*, v.28, n.3, p.564-570, 2008.
- Brunetti, F. *Mecânica dos fluidos*. São Paulo: Pearson, 2008.
- Canciam, C. (2010). Efeito da temperatura na viscosidade de óleos vegetais refinados. 16. 7-12. 10.5212/Publ. Exatas.v.16i1.0001.
- Chen, Y. M. & Pearlstein, A. J. (1987). Viscosity-temperature correlation for glycerol-water solutions. *Ind. Engng Chem. Res.* 26, 1670–1672
- Chui, Queenie S. H., Zucchini, Ricardo R. e Lichtig, Jaim. (2001). Qualidade de medições em química analítica. Estudo de caso: determinação de cádmio por espectrofotometria de absorção atômica com chama. *Química Nova* [online]. 2001, v. 24, n. 3 [Acessado 13 Março 2022], pp. 374-380. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000300014>>. Epub 17 Jul 2001. ISSN 1678-7064. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000300014>.
- Coringa, E. A. O; Gomes, A. L; Pereira, S. C. (2007). Propriedades físico-químicas de detergentes lava-louças comercializados em Cuiabá-MT e suas relações. 2007. CEFET-MT, Cuiabá-MT, Brasil.
- Cortés Gracia, A. L., & Gándara Gómez, M. (2007). La construcción de problemas en el laboratorio durante la formación del profesorado: una experiencia didáctica. *Enseñanza de las Ciencias*, 25(3), 435-450.
- Dash, S. K. (2014). *Engineering Equation Solver: application to engineering and thermal engineering problems*, Oxford, U.K.: Alpha Science International Ltd.
- Donatelli, G. D. Konrath, A. C. (2005). Simulação de Monte Carlo na Avaliação de Incertezas de Medição. *Revista de Ciência & Tecnologia*, V. 13, n 25/26, p. 5-15. Jan./Dez.
- Farah, A. F. (2002). Caracterização de óleos vegetais como alternativa para meios de resfriamento utilizados no tratamento térmico de têmpera. 2002. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. doi:10.11606/T.88.2016.tde-20092016-113613. Acesso em: 2022-02-04.
- Faxen, H. (1922). Die Bewegung einer starren Kugel längs der Achse eines mit zäher Flüssigkeit gefüllten Rohres. *Arkiv för matematik, Astronomi och Fysic.* 17, 1-28.
- Foued, B., & Vamegh, R. (2021). Simulation of settling velocity and motion of particles in drilling operation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107971.
- Francis, A. W. (1933). Wall effect in falling ball method for viscosity. *Physics.* 4, 403-406.
- Geris, Regina et al. (2007). Biodiesel de soja: reação de transesterificação para aulas práticas de química orgânica. *Química Nova* [online]., v. 30, n. 5 [Acessado 4 Março 2022], pp. 1369-1373. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500053>>. Epub 28 Set 2007. ISSN 1678-7064. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500053>
- Graão, A.C.A.; Berto, M.I.; Silveira Júnior, V. (2004). Reologia do açúcar líquido invertido: influência da temperatura na viscosidade. *Ciência e Tecnologia de Alimentos: Campinas*, v.24, n.4, p.652-656.

- GUM (2008). Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. Rio de Janeiro: INMETRO, ABNT.
- Haberman W.L., Sayre, R.M., Motion of rigid and fluid spheres in stationary and moving liquids inside cylindrical tubes. David Taylor Model Basin report. 1143 (1958).
- Kawata, M., Kurase, K. and Yoshida, K. (1963). Realisation of a viscosity standard. Proceeding of the 5th international congress on Rheology. 1, 453-472.
- Klein, S. and Nellis, G. (2012). Mastering EES, Madison, WI: F-Chart Software.
- Ladenburg, R. (1907). Über die innere Reibung zaher Flüssigkeiten und ihre Abhängigkeit vom Druck. Ann. Phys. 327, 287–309. <https://doi.org/10.1002/andp.19073270206>
- Liao, S. J. (2002). An analytic approximation of the drag coefficient for the viscous flow past a sphere, International Journal of Non-Linear Mechanics 37 (2002) 1–18.
- Lide, R.D. (2006). Handbook of Chemistry and Physics. 87th Edition.
- Mafart, P.; Béliard, E. Ingeniería industrial alimentaria, volumen II: Técnicas de separación. Zaragoza: Editorial Acribia, 1994, 277 p.
- Medeiros, J. F. et al. (2015). Caracterização da glicerina proveniente da produção de biodiesel por rota etílica e metílica. Anais CONEPETRO... Campina Grande: Realize Editora, 2015. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/10266>>. Acesso em: 08/02/2022 21:12
- Moura, S.C.S.R. et al. (2000). Manual do Seminário Propriedades Termofísicas Aplicadas na Garantia da Qualidade dos Alimentos. Campinas: ITAL.
- Perry, R.H., Green, D.W. and Southard, M.Z. (2018) Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2272.
- Pritchard, Philip J., and John W. Mitchell. (2019). Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics. 10th ed., John Wiley & Sons.
- Reid, R. C.; Prausnitz, J. M.; Poling, B. E. (1988). The Properties of Gases & Liquids. 4 ed. New York, USA: McGraw-Hill.
- Ribeiro, L.D. et al. (2005). Cálculo de viscosidade de misturas não eletrolíticas. In: VI Congresso Brasileiro De Engenharia Química Em Iniciação Científica, 2005, Campinas. Disponível em: <<http://www.feq.unicamp.br/~cobeqic/ttd07.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2021.
- Sandoval, C., Caramy, J. y Salinas, J. (2009). La engañosa simplicidad del "método de Stokes" para medir viscosidades. Revista Brasileira de Ensino de Física [online]. 2009, v. 31, n. 4 [Accedido 13 Março 2022], pp. 4310-4322. Disponible en: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172009000400012>>. Epub 26 Abr 2010. ISSN 1806-9126. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172009000400012>.
- Silva, F. M. de C., Apolinario, M. da F., Siqueira, A. M. de O., Candian, A. L. M., Moreira, L. A. F., & Sarti, M. R. (2017). Experimento didático de Reynolds e conceitos básicos em mecânica dos fluidos. The Journal of Engineering and Exact Sciences, 3(3), 346–357. <https://doi.org/10.18540/jcecvl3iss3pp346-357>
- Siqueira, A., Krink, N., Pereira, F., Villela, F., Silva, G., Moura, A. (2018). One-Dimensional Mathematical Model for Solar Drying of Beds of Sludge. Journal of Applied Fluid Mechanics, 11(5), 1407-1419. doi: 10.29252/jafm.11.05.28823
- Sousa, E. K. de (2017). Modelo de experimento para determinar a viscosidade pelo método de stokes. Trabalho De Conclusão de Curso. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.
- Streeter, V. L., Wylie E. B. and Bedford, K. (1998). Fluid Mechanics, 9th ed., McGraw Hill Book Company, New York.
- Trejo González, J. A.; Longinotti, M. P.; Corti, H. R. (2011). The viscosity of glycerol-water mixtures including the supercooled region; American Chemical Society; Journal of Chemical and Engineering Data; 56; 4; 4-2011; 1397-1406.
- Vaz, E. L. S. et al. (2012). Uma experiência didática sobre viscosidade e densidade. Química Nova na Escola, v. 34, n. 3, p. 155-158, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/134959>>.
- Vertchenko, L. e Vertchenko, L. (2017). Determinação da viscosidade por meio da velocidade terminal: uso da força de arrasto com termo quadrático na velocidade. Revista Brasileira de

Ensino de Física [online]. 2017, v. 39, n. 4 [Acessado 3 Março 2022], e4304. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0041>>. Epub 29 Maio 2017. ISSN 1806-9126. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0041>.

Welty, J., Wicks, C.E., Wilson, R.E. and Rorrer, G.L. (2007). Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 5th Edition, John Wiley & Sons Ltd., New York.