



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HELISSON BRUNO ALBANO DA SILVA

BANCADA EXPERIMENTAL: VISCOSÍMETRO BASEADO NA
LEI DE STOKES

MOSSORÓ / RN
2021

HELISSON BRUNO ALBANO DA SILVA

BANCADA EXPERIMENTAL: VISCOSÍMETRO BASEADO NA LEI DE STOKES

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 19 / 11 / 2021

FERNANDA ALVES RIBEIRO
Data: 2021.11.24 17:51:
57-03'00'
00880308494 Foxit Reader Versão:
10.1.0
Prof^a. Dr^a. Fernanda Alves Ribeiro
Presidente e Orientadora

REGINA CELIA DE OLIVEIRA BRASIL
DELGADO:87774151400
Assinado de forma digital por
REGINA CELIA DE OLIVEIRA BRASIL
DELGADO:87774151400
Dados: 2021.11.24 18:47:56 -03'00'
Prof^a Dr^a Regina Celia de O. Brasil Delgado
Coorientadora e Membro

VICTOR WAGNER FREIRE DE AZEVEDO
Assinado de forma digital por
VICTOR WAGNER FREIRE DE
AZEVEDO:06133279427
Dados: 2021.11.25 07:40:57
-03'00'
Prof. Dr.Victor Wagner Freire de Azevedo
Membro

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586b Silva, Helisson Bruno Albano da.
BANCADA EXPERIMENTAL: VISCOSÍMETRO BASEADO NA
LEI DE STOKES / Helisson Bruno Albano da Silva. -
2021.
32 f. : il.

Orientadora: Fernanda Alves Ribeiro.
Coorientadora: Regina Celia de Oliveira Brasil
Delgado.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2021.

1. Bancada Experimental. 2. Lei de Stokes. 3.
Viscosidade. 4. Temperatura. I. Ribeiro, Fernanda
Alves , orient. II. Delgado, Regina Celia de
Oliveira Brasil , co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Resumo

A base para o desenvolvimento desse projeto compreende o estudo de viscosidade, a qual pode ser definida como a resistência que um fluido tem no escoamento. O conhecimento desta propriedade é usado em muitos ramos da engenharia, como na aplicação de lubrificantes, no escoamento em canais e condutos, no projeto de máquinas hidráulicas, entre outras diversas finalidades. Essas aplicações necessitam de pesquisas prévias para garantirem seus resultados na prática. Nesta vertente, este trabalho teve como objetivo principal a construção de uma bancada experimental para análise da viscosidade em diferentes temperaturas (25 °C, 40 °C e 60 °C), a fim de promover um elemento facilitador de aprendizagem. Para tanto, a bancada foi produzida com base na Lei de Stokes e foram realizados ensaios com glicerina, observando-se as devidas normas e padrões de análise, bem como as curvas de calibração necessárias para confiabilidade do experimento. Por fim, constata-se que a bancada obteve êxito na análise do fluido e, tornou-se um instrumento atrativo pelo seu baixo custo de produção.

Palavras-chave: Bancada Experimental; Lei de Stokes; Viscosidade; Temperatura.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferença entre sólido e fluido devido uma força de cisalhamento.	10
Figura 2. Comportamento do fluido quando a placa superior move a velocidade constante. ..	11
Figura 3. Forças agindo sobre um corpo imerso em um fluido.	13
Figura 4. Viscosímetros de disco (esquerda), Cone-disco (centro) e Cilindro rotativo (direita).	17
Figura 5. Capilar (esquerda) e Stokes (direita).	17
Figura 6. Etapas realizadas na execução do trabalho.	19
Figura 7. (a) Recipiente, (b) Resistência e (c) Dispositivo Elétrico.	20
Figura 8. (a) Proveta, (b) Glicerina e (c) Esferas.	20
Figura 9. Representação da bancada finalizada.	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Representação do custo.....	23
Tabela 2. Dados das esferas.....	23
Tabela 3. Dados da Glicerina.	23
Tabela 4. Experimento a 25°C.....	24
Tabela 5. Experimento a 40°C.....	24
Tabela 6. Experimento a 60°C.....	24
Tabela 7. Erro do experimento x equipamentos.	26
Tabela 8. Erro do experimento x literatura.....	26

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Sobreposição das curvas.....	25
Gráfico 2. Viscosidade x Temperatura.	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. Objetivos	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1. Viscosidade	10
2.2. Lei de Stokes	13
2.3. Viscosímetros	16
3. METODOLOGIA.....	18
3.1. Classificação do Projeto de Desenvolvimento da Bancada.....	18
3.2. Materiais e Métodos	19
3.2.1 Materiais	19
3.2.2 Métodos	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
5. CONCLUSÃO	27
6. REFERÊNCIAS.....	28
ANEXO 1 – ROTEIRO DA PRÁTICA	29

1. INTRODUÇÃO

Em física, a mecânica é uma área da engenharia fascinante e uma das mais antigas, nela se que estuda os corpos móveis e imóveis que se encontram sob a influência de alguma força presente. Dentro da área geral da mecânica, se encontra a categoria da Mecânica dos Fluidos, segundo Fox et al, (2012) a Mecânica dos Fluidos é uma subcategoria que direciona seus esforços para o estudo dos fluidos tanto em repouso quanto em movimento.

Dentro do estudo da Mecânica dos Fluidos, situa-se uma subdivisão nesta ciência, esta categoria mais delimitada é chamada de hidrodinâmica e, se dedica ao “estudo do movimento dos fluidos que são praticamente incompressíveis” (ÇENGEL; CIMBALA, 2007). Vale salientar que o campo da hidrodinâmica pode ser dividido em outras duas subdivisões, a saber: a hidráulica e a aerodinâmica. A primeira se dedica ao estudo das tubulações e canais; a segunda categoria “trata do escoamento de gases sobre corpos tais como aeronaves, foguetes e automóveis em velocidades altas e baixas.” (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

A base para que tudo isso ocorresse nasceu com grandes cientistas ao longo dos anos. E a partir das pesquisas realizadas por estes pesquisadores surgem as primeiras raízes para o que entende-se hoje como Mecânica Clássica. Cabe enfatizar que a mesma trata de um conjunto de três matérias, são elas: a estática que visa a causa do movimento; a cinemática que se propõe ao estudo do movimento sem se importar com as causas, e a dinâmica que objetiva o movimento considerando as causas.

Um dos ramos que foi sendo aprimorado ao longo dos anos é o da viscosidade, ela é uma propriedade muito importante nos fluidos. Ter um fluido com a viscosidade ideal naquela determinada aplicação, impacta diretamente no seu resultado. Por exemplo, em óleos lubrificantes, eles são utilizados para reduzir o atrito entre as peças mecânicas, então é necessário saber a viscosidade certa para que o óleo se mantenha entre as duas peças, pois se ele não tiver viscosidade suficiente, não vai conseguir se manter e vai escoar facilmente. Tendo isso em vista, é de extrema necessidade mensurar com precisão a viscosidade dos fluidos, sendo este o objetivo da bancada experimental em questão.

Com base na importância da consideração da viscosidade nos diferentes processos, se faz necessário o projeto de uma bancada de baixo custo que possibilite a análise da influência da temperatura na viscosidade do fluido.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver e executar o projeto de uma bancada experimental que possibilite verificar a viscosidade de diferentes líquidos; bem como a influência que a variação de temperatura causa nesse processo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Selecionar o modelo ideal, e de baixo custo, de experimento para análise de viscosidade de diferentes líquidos;
- Criar uma bancada experimental para verificação de viscosidade em diversas temperaturas;
- Desenvolver o projeto de banho térmico para promover a variação da temperatura;
- Elaborar a curva de calibração e roteiro de procedimento experimental para uso da bancada;

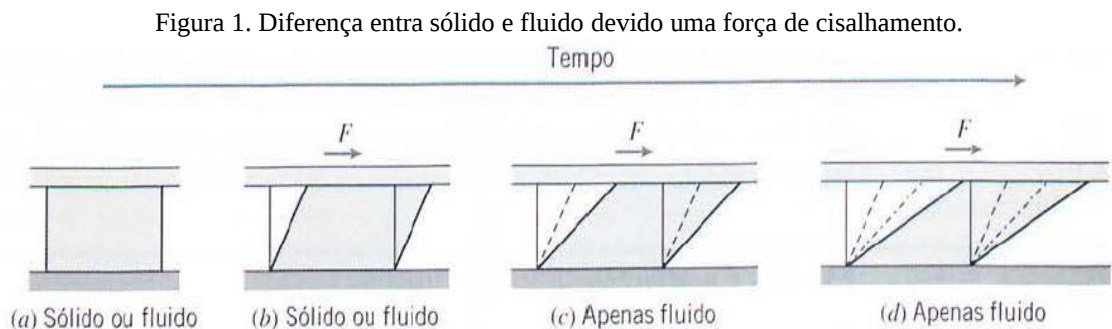
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Viscosidade

Isaac Newton teve grande influência na determinação da viscosidade. De acordo com Eliomar Ferreira (2005), Isaac Newton utilizou:

Utilizou o modelo de duas placas de área A , separadas por uma distância h , movimentadas através da aplicação de uma força F [...] De acordo com esse modelo, a força requerida por unidade de área (F/A) para manter uma diferença de velocidade entre as placas (dv/dx) é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade através do líquido. Assim, o coeficiente de proporcionalidade é igual à viscosidade (μ). A força por unidade de área é conhecida como tensão de cisalhamento (s) e o gradiente de velocidade é conhecido como taxa de cisalhamento.

Essa prática foi realizada com um sólido e, posteriormente, com um líquido. A placa inferior foi fixada e a placa superior foi solicitada uma força tangencial na direção do plano da placa. Como mostra na Figura 1.



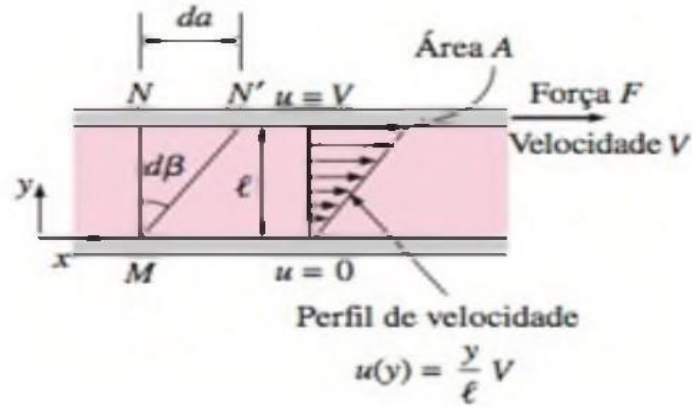
Fonte: FOX et al (2012)

Assim é feito em um sólido e se obtém o resultado, “que em um sólido, solicitado por uma força tangencial constante, deforma-se angularmente, mas atinge uma nova configuração de equilíbrio estático” (BRUNETTI, 2013).

Quando se faz a mesma experiência para um fluido, a primeira coisa a observar são os pontos correspondentes com a placar superior, que deve estar em movimento. O fluido nesses pontos continua em correspondência, ou seja, “se a placa superior adquire uma velocidade $\vec{v}$, os pontos do fluido em contato com ela terão a mesma velocidade $\vec{v}$, e os pontos do fluido em contato com a placa fixa ficarão parados juntos dela” (BRUNETTI, 2013). Essa observação procede ao princípio de aderência, o qual fala que os pontos de um fluido, em contato com uma superfície sólida, aderem aos pontos dela, com os quais estão em contato.

Notou-se que, a partir de um momento, a placa superior atinge uma velocidade constante V , devido a forças internas que surgem de acordo com o princípio de aderência citado acima. A Figura 2 mostra esse comportamento referente a um escoamento laminar.

Figura 2. Comportamento do fluido quando a placa superior move a velocidade constante.



Fonte: ÇENGEL; CIMBALA (2007).

Como demonstrado na Figura 2, entre as placas tem camadas de fluidos que irão se adaptar e assim variar a sua velocidade entre a velocidade constante da placa móvel até a velocidade nula da placa fixa. Nesse sentido, “irá se formar um diagrama de velocidades, onde cada camada de fluido desliza sobre a adjacente com uma velocidade relativa” (BRUNETTI, 2013). Tal deslizamento faz com que surjam tensões de cisalhamentos, e o produto dessas tensões com a área da placa resulta em uma força tangencial interna, força essa causadora do equilíbrio da força externa.

A tensão de cisalhamento (τ) que age sobre o fluido é:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde A , é a área de contato entre o fluido e a placa e F é a força exercida na placa. O perfil de velocidade e o gradiente de velocidade em um escoamento laminar varia linearmente entre 0 e V .

$$u(y) = \frac{y}{l} V \quad \text{e} \quad \frac{du}{dy} = \frac{V}{l} \quad (2)$$

Tem-se então que durante um intervalo de tempo infinitesimal dt , as partículas ao longo da reta vertical MN , como demonstrado na Figura 2, giram em um ângulo infinitesimal $d\beta$ enquanto a placa superior se desloca a distância infinitesimal $da = V dt$.

$$d\beta \approx tg\beta = \frac{da}{l} = \frac{vdt}{l} = \frac{du}{dy} dt \quad (3)$$

Rearranjando, a taxa de deformação, ficará assim:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (4)$$

Em conformidade com Çengel e Cimbala (2007) conclui-se então que a taxa que um elemento do fluido se deforma é semelhante ao gradiente de velocidade e, além disso, experimentalmente a maioria dos fluidos tem essa taxa de deformação diretamente proporcional à tensão de cisalhamento. Esses fluidos com proporcionalidade entre taxa e tensão são chamados de fluidos newtonianos, conforme expresso na Equação 5, podendo citar como exemplos: água, gasolina e o ar. Já os fluidos não newtonianos, não possuem proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, são exemplos de fluidos não newtonianos o sangue e plásticos líquidos.

$$\tau \propto \frac{d\beta}{dt} \quad \text{ou} \quad \tau \propto \frac{du}{dy} \quad (5)$$

De acordo com a Lei de Viscosidade de Newton, é estabelecido que na viscosidade existe uma proporcionalidade, como exposto na Equação 6. Deste modo, frisamos que tal fato atenta para a necessidade de uma constante, “onde a constante de proporcionalidade é denominada coeficiente de viscosidade ou viscosidade dinâmica (ou absoluta) do fluido” (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (6)$$

Como a viscosidade é uma propriedade de cada fluido, essa leva em consideração as condições de cada fluido, como por exemplo as interações moleculares. Se o fluido for composto por elementos com eletronegatividade maiores, este terá ligações mais fortes, e sendo assim precisará de uma tensão cisalhante mais forte para romper. Portanto, quanto mais forte essa ligação molecular, mais próximas as moléculas ficam, e mais difícil será o escoamento de fluido, o que o torna mais viscoso.

É notável que a viscosidade possua um valor diferente para cada fluido, mas esse valor também pode variar em um mesmo fluido se suas condições variarem, como por exemplo, variar a pressão e principalmente a temperatura. Em relação aos gases e líquidos, nesses aspectos, se comportam inversamente, “para gases, a viscosidade aumenta com a temperatura,

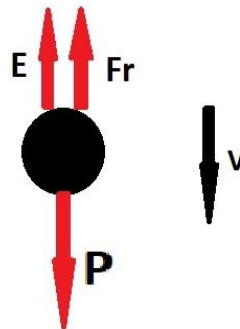
enquanto, para líquidos, a viscosidade diminui com o aumento de temperatura” (FOX et al, 2012).

Nota-se também que a viscosidade é uma grandeza observável apenas quando o fluido está em movimento, não é possível observá-la quando o fluido está em repouso. Pode-se dizer então que “viscosidade dinâmica é a propriedade dos fluidos que permite equilibrar, dinamicamente, forças tangenciais externas quando os fluidos estão em movimento” (BRUNETTI, 2013). De uma forma mais prática, pode-se dizer que a viscosidade é a propriedade que identifica a maior ou menor dificuldade de o fluido escoar.

2.2. Lei de Stokes

A lei de Stokes é referente a forças de fricção que partículas sofrem ao se moverem em um fluido. Essa lei descreve a velocidade de uma partícula esférica pequena dentro de um ambiente viscoso. Tem-se que as forças agindo em um corpo caindo em um fluido são: força peso devido à gravidade, a força de empuxo devido ao fluido deslocado pela imersão do corpo, e a força de fricção provocado pelo atrito entre o corpo e o meio viscoso. A Figura 3 realiza a demonstração das forças atuantes.

Figura 3. Forças agindo sobre um corpo imerso em um fluido.



Fonte: Autoria própria (2020).

Fazendo uma análise vetorial ao largar a esfera no meio viscoso, devido ao seu deslocamento para baixo é subentendido que a força peso é maior que a soma das demais forças, logo:

$$P > E + Fr \quad (7)$$

Onde:

P - Força peso;

E - Força empuxo;

Fr - Força de fricção.

A força peso é conhecida como o produto entre a massa da esfera e a aceleração da gravidade, e a força de empuxo também é conhecida como o produto entre a massa de fluido deslocado devido a submersão da esfera e a aceleração da gravidade. Já a força de fricção (Fr) é devido a interação entre a esfera e o fluido, então ela está relacionada diretamente com o diâmetro da esfera, pois é subentendido que quando o diâmetro da esfera mudar, a intensidade desta força também mudará, também está relacionada diretamente com a velocidade que esta esfera se movimenta, e por fim, claramente percebe-se que também tem relação com a viscosidade dinâmica do fluido, pois com diferentes tipos de viscosidade o movimento da esfera é distinto.

Assim como veremos abaixo na seguinte expressão.

$$Fr \propto d V \eta$$

Stokes fez diversos testes experimentais com fluidos diferentes e com esferas de distintos tamanhos e, conseguiu assim descobrir uma constante de proporcionalidade. Essa constante vale 3π , assim então, a força de fricção é exposta na seguinte equação:

$$Fr = 3\pi d V \eta \quad (8)$$

Onde:

d - Diâmetro da esfera;

V - Velocidade da esfera;

η - Viscosidade do fluido.

Observando o experimento, é visto que ao longo da trajetória o diâmetro da esfera não varia e a viscosidade do fluido também não vai variar. O único parâmetro capaz de variar é a velocidade. Portanto, agora a análise será no movimento da esfera, pois ao abandonar a esfera em um ponto superior, ela irá cair em um movimento acelerado, sendo assim a sua velocidade vai aumentando, conseqüentemente, a força de fricção também aumenta. Essa força aumenta até chegar ao ponto que somada com o empuxo se iguale a força peso.

Quando isto ocorre, chega-se em um ponto que é denominado de “equilíbrio dinâmico”. A esfera continua o movimento com a velocidade constante, porém, de acordo com a segunda lei de newton, com a força resultante nula. Stokes analisou isso e determinou uma região, afirmando que isto ocorreria com a velocidade média desse local.

Compreende-se que a força peso é:

$$P = mg \quad (9)$$

$$m = \rho_e V_e \quad (10)$$

Onde:

m - Massa da esfera;

g - Aceleração da gravidade;

ρ_e - Densidade da esfera;

V_e - Volume da esfera.

Explicitado o exposto acima, salientamos neste a força de empuxo, esta é representada da seguinte maneira:

$$E = m_f g \quad (11)$$

$$m_f = \rho_f V_f \quad (12)$$

Onde:

m_f - Massa do fluido deslocado;

ρ_f - Densidade do fluido;

V_f - Volume do fluido deslocado.

No entanto quando a esfera é completamente submersa no fluido, o volume do fluido deslocado é justamente o mesmo volume da esfera, sendo assim, $V_e = V_f = V$.

$$V = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (13)$$

Considerando então a velocidade média da trajetória da esfera ($V = V_m$), e as expressões desenvolvidas, enfatizamos que a Eq. 7 se transforma em:

$$\rho_e V g = \rho_f V g + 3\pi d V_m \eta \quad (14)$$

Substituindo o volume e isolando a viscosidade teremos assim a lei de Stokes, também conhecida como lei da viscosidade:

$$\eta = \frac{g d^2}{18 V_m} (\rho_e - \rho_f) \quad (15)$$

Porém foi preciso realizar uma correção nessa velocidade, devido as dimensões transversais do meio em que a esfera percorre não serem infinitas e, as paredes do tubo influenciarem quando a esfera se desloca afetando a força viscosa. Portanto é preciso introduzir a correção de Ladenburg, assim a velocidade corrigida é expressa por:

$$V_{corr} = \left[1 + 2,4 * \left(\frac{r}{R} \right) \right] V_m \quad (16)$$

Onde:

r - Raio da esfera;

R - Raio da proveta;

V_m - Velocidade média (L/t).

A Equação 15 é a viscosidade dinâmica, já para obter a viscosidade cinemática basta dividir a viscosidade dinâmica pela densidade do fluido:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (17)$$

2.3. Viscosímetros

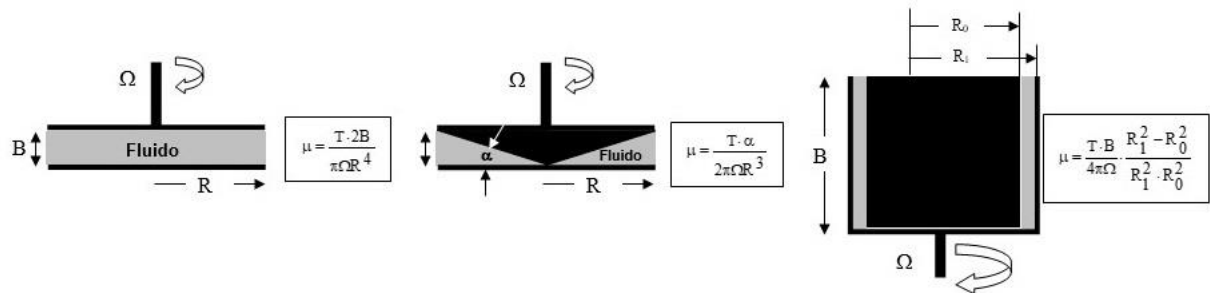
Viscosímetros são equipamentos utilizados para determinar a viscosidade de líquidos, e eles podem ser representados em dois grupos. Conforme Jasiel Junior e José Ferreira (2008):

Os viscosímetros são classificados em dois grupos: primários e secundários. Os do grupo primário medem diretamente os valores das tensões de cisalhamento do fluido e a sua respectiva taxa de deformação. Os do grupo secundário inferem indiretamente, a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação do fluido.

No primeiro grupo estão os instrumentos que realizam medição direta da tensão e da taxa de deformação, e no segundo grupo estão os instrumentos que induzem uma razão entre a tensão aplicada e a taxa de deformação por meios indiretos.

No primeiro grupo tem instrumentos que podem conceber diversos arranjos, dentre eles estão o de cilindro rotativo, o de disco e o de cone-disco. Como esses instrumentos realizam medidas diretamente, podem ser aplicados a fluidos newtonianos e a fluidos não-lineares ou fluidos visco-elásticos. A Figura 4 expõe a representação dos viscosímetros.

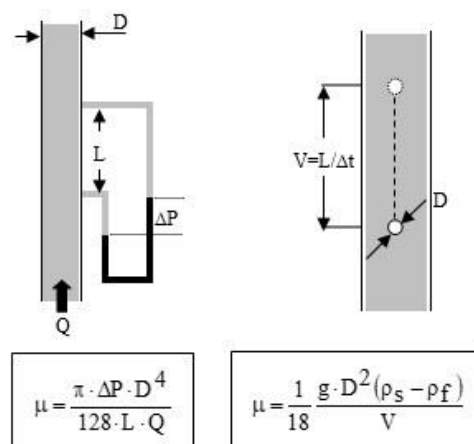
Figura 4. Viscosímetros de disco (esquerda), Cone-disco (centro) e Cilindro rotativo (direita).



Fonte: UNICAMP (2021).

No segundo grupo pode ser citado o viscosímetro capilar, onde a viscosidade é obtida por meio de um gradiente de pressão. Outro viscosímetro que pode ser destacado é o de Stokes, Segundo Erika Sousa (2017) “o princípio operacional do viscosímetro de Stokes baseia-se na determinação da velocidade de queda livre de uma esfera através do fluido do qual se deseja obter a viscosidade”. Dito isto, vale salientar a diferença desse grupo em relação ao primeiro, é que esses viscosímetros se aplicam só a fluidos newtonianos. A Figura 5 trata dos viscosímetros do segundo grupo:

Figura 5. Capilar (esquerda) e Stokes (direita).



Fonte: UNICAMP (2021).

Outras vertentes que podem ser citadas como diferenças entre esses viscosímetros é que os de disco e cone-disco necessitam de um volume menor de amostra e tem uma faixa de operação maior, já no caso do de Stokes necessita de um volume maior, em compensação, o custo desse viscosímetro é o menor.

3. METODOLOGIA

3.1. Classificação do Projeto de Desenvolvimento da Bancada

Tem-se várias formas de classificar e executar um projeto, mas nesse trabalho se optou por demonstrar as mais clássicas, a saber: Natureza, abordagem, objetivos e procedimentos. A nossa classificação segue a sequência informada, dito isto, se faz necessário especificar cada etapa da classificação do projeto de desenvolvimento da bancada experimental.

Começando então no ponto de vista da natureza, essa bancada tem natureza aplicada, que segundo Prodanov e Freitas (2013) a pesquisa aplicada tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática coordenados à solução de problemas específicos. No nosso trabalho foi aplicado a lei de Stokes para determinar a viscosidades de óleos estabelecidos.

Do ponto de vista da abordagem, esta bancada experimental é classificada como quantitativa, em conformidade com Silva e Menezes (2005) considera-se que tudo pode ser quantificável, aquilo que pode ser traduzido em números, requer o auxílio de técnicas estatísticas. Este projeto de bancada se baseia em fórmulas matemáticas desenvolvidas para a análise de fluidos.

Prosseguindo na classificação em relação agora aos seus objetivos, salientamos então que esse projeto de bancada é classificado como explicativo. Explicativo pois “a maioria das pesquisas explicativas utiliza o método experimental, que possibilita a manipulação e o controle das variáveis” (PRODANOV; FREITAS, 2013). Por esse viés, reforçamos que nossa pesquisa se enquadra dentro deste método, por também se propor a identificar e explicar os fatores com que o fenômeno ocorre.

Por fim, lançamos olhares à classificação do ponto de vista dos procedimentos técnicos, nesse viés, ressaltamos que este se trata de um estudo experimental. Gil (2002) afirma que pesquisas experimentais constituem o delineamento mais prestigiado no ramo científico. Pois “consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

3.2. Materiais e Métodos

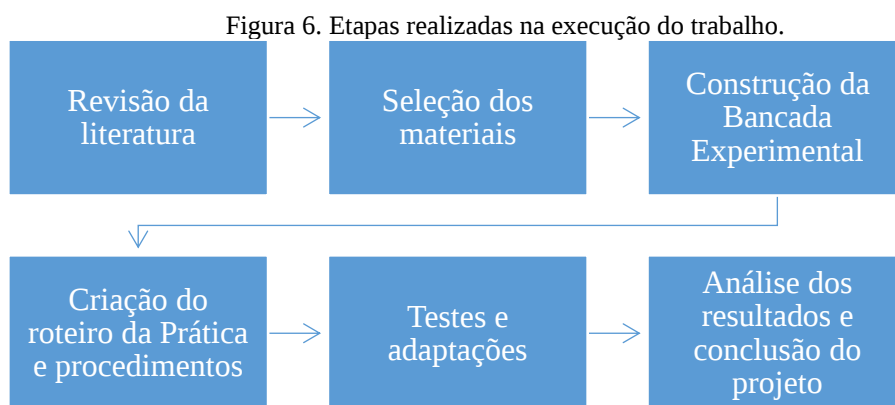
3.2.1 Materiais

Os materiais que foram utilizados para a execução desse projeto da bancada são:

- Provetas de 500 mililitros;
- Glicerina;
- Esferas;
- Um recipiente contendo água para o banho térmico;
- Resistência elétrica para aquecer a água do banho térmico;
- Termômetro;
- Régua;
- Cronômetro;
- Balança.

3.2.2 Métodos

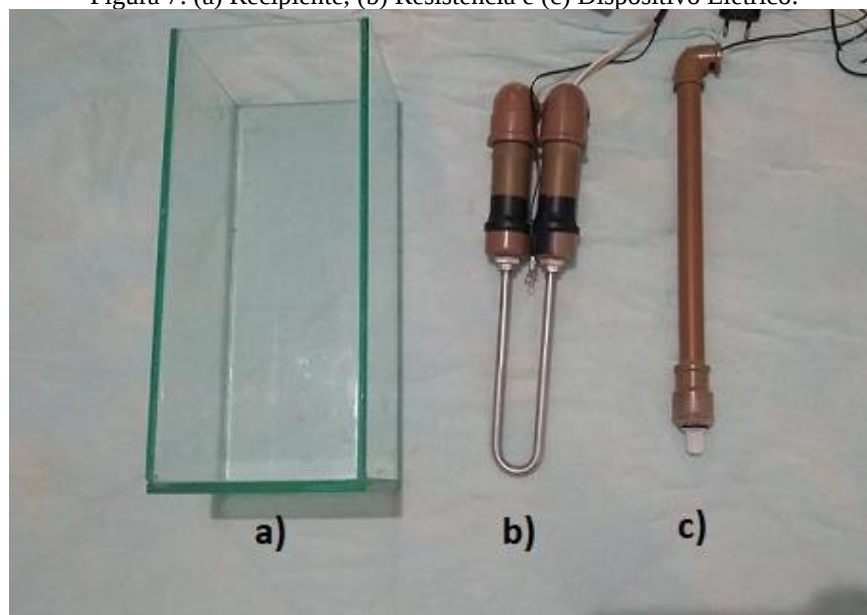
O trabalho foi desenvolvido conforme demonstrado na Figura 6.



Fonte: Autoria própria (2020).

O trabalho iniciou com revisão da literatura. Foi fabricado um recipiente de vidro com espessura de 6 mm, suas dimensões são de 15 cm de largura, 15 cm de comprimento e 35 cm de altura. Dentro desse recipiente é colocado água e a resistência elétrica responsável pela mudança de temperatura, e uma proveta com o fluido que terá a viscosidade analisada. É também colocado dentro do recipiente um dispositivo elétrico responsável por ficar agitando a água e assim estabelecer uma temperatura uniforme no banho térmico. A Figura 7 mostra esses materiais.

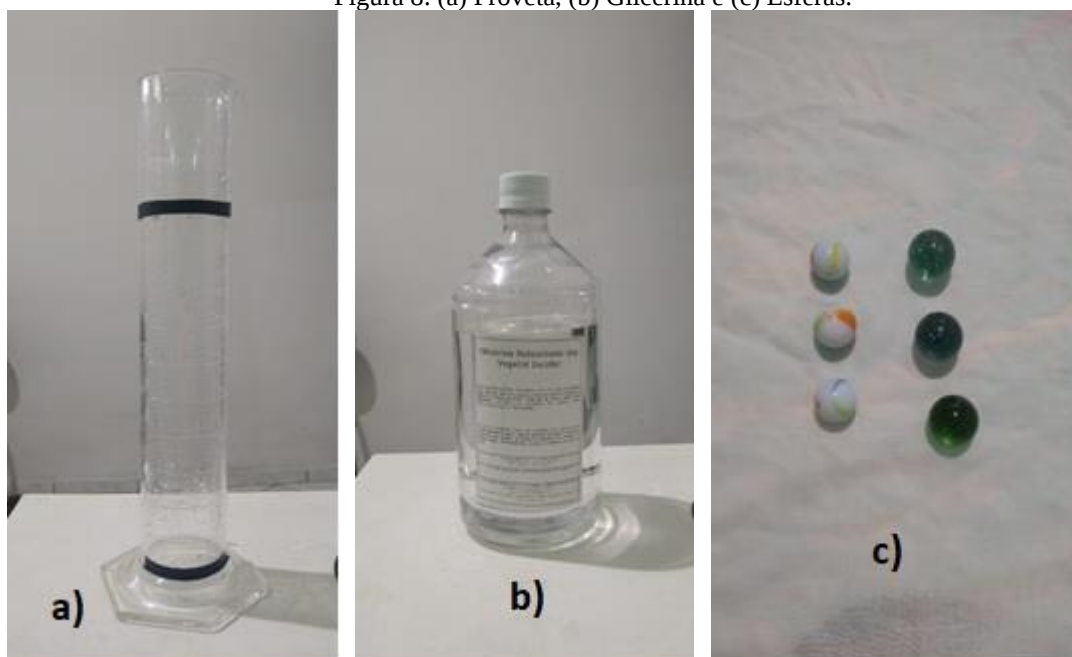
Figura 7. (a) Recipiente, (b) Resistência e (c) Dispositivo Elétrico.



Fonte: Autoria própria (2021).

Como é mostrado na Figura 7, implementou-se na resistência e no dispositivo elétrico canos de PVC que serve como suporte. Na proveta foram colocadas duas marcações e mediu-se a distância entre elas. A medição do tempo que uma esfera leva para percorrer esta distância é feita com o auxílio de um cronômetro, sendo possível assim determinar a sua velocidade. A Figura 8 mostra as marcações na proveta, o fluído que serviu de análise (glicerina) e as esferas utilizadas são bolas de gude.

Figura 8. (a) Proveta, (b) Glicerina e (c) Esferas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Um roteiro foi criado para o desenvolvimento da aula prática (Anexo 1). Para realização do experimento a proveta deve estar totalmente preenchida com a amostra a ser analisada. Após a estabilização da temperatura de análise, a esfera é colocada dentro da proveta e o tempo que ela leva para percorrer a distância entre as marcações é medido. Esse procedimento é repetido para as demais temperaturas. As temperaturas utilizadas foram de 25°C, 40°C e 60°C.

Foram utilizados também acessórios para a confecção da bancada como, cola, madeira para suporte, controlador de temperatura, fios e fitas. Para a realização de análises com temperaturas maiores que a do ambiente, é programado no controlador a temperatura desejada e ele faz a função de ligar a resistência e desligar quando chegar na temperatura, já em temperaturas menores foi utilizado gelo na água do banho térmico.

Foi confeccionado um dispositivo para lança a esfera de madeira e cano PVC. A esfera é colocada no orifício e com o movimento da alavanca é jogada para dentro do tudo, onde percorre até cair dentro da proveta. A Figura 9 demonstra esquematicamente a bancada experimental pronta.

Figura 9. Representação da bancada finalizada.



Fonte: Autoria própria (2021).

A bancada permanecerá no laboratório de mecânica dos fluidos localizado no prédio de engenharias da UFERSA, campus Mossoró, para ser utilizada na análise de diversos fluidos e em aulas práticas, assim facilitar a aprendizagem dos discentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 informa o custo para confeccionar a bancada.

Tabela 1. Representação do custo.

Custo de confecção da bancada			
Recipiente	R\$	66,00	
Resistência	R\$	42,90	
Acessórios	R\$	69,90	
Glicerina	R\$	50,00	
Total	R\$	228,80	

Fonte: Autoria própria (2021).

Com base nos valores da massa e diâmetro das esferas, foi calculado o volume e a densidade das mesmas, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Dados das esferas.

Tipo	Massa (kg)	Diâmetro (m)	Volume (m ³)	ρ (kg/m ³)
1	0,005	0,0161	2,18512E-06	2288,20
2	0,008	0,0185	3,31523E-06	2413,10

Fonte: Autoria própria (2021).

Para obter os dados do fluido em análise foram utilizados equipamentos, a densidade da glicerina foi analisada em um densímetro de bancada da marca Rudolph Research Analytical, no Laboratório de Petrofísica da UFERSA e seu valor obtido foi $\rho = 1258 \text{ kg/m}^3$. Já a viscosidade foi analisada em um viscosímetro de acordo com a norma ASTM D445-2021 no Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, os valores estão presentes na tabela 3.

Tabela 3. Dados da Glicerina.

Temperatura (°C)	ν (m ² /s)
25	6,61E-04
40	1,96E-04
60	4,47E-05

Fonte: Autoria própria (2021).

A distância (L) entre as marcações que a esfera percorreu é de 0,25m. Com base na média do tempo obtido para os três lançamentos da esfera foi possível determinar a velocidade média, dividindo a massa da esfera pela média do tempo,

Os resultados obtidos com base nos experimentos realizados nas três temperaturas podem ser observados nas Tabelas 4, 5 e 6. O diâmetro (D) da proveta é 0,05m e o valor da gravidade (g) igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

Tabela 4. Experimento a 25°C.

Temperatura 25°C							
Esfera	t (s)	t_{med} (s)	Distância (m)	Velocidade (m/s)	V_{corr} (m/s)	η (Pa.s)	ν (m ² /s)
1	2,41	2,383	0,250	0,1049	0,1860	0,7826	6,22E-04
	2,36						
	2,38						
2	1,73	1,727	0,250	0,1448	0,2734	0,7882	6,27E-04
	1,74						
	1,71						

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 5. Experimento a 40°C.

Temperatura 40°C							
Esfera	t (s)	t_{med} (s)	Distância (m)	Velocidade (m/s)	V_{corr} (m/s)	η (Pa.s)	ν (m ² /s)
1	0,83	0,830	0,250	0,3012	0,5340	0,2726	2,17E-04
	0,84						
	0,82						
2	0,71	0,703	0,250	0,3555	0,6711	0,3211	2,55E-04
	0,69						
	0,71						

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 6. Experimento a 60°C.

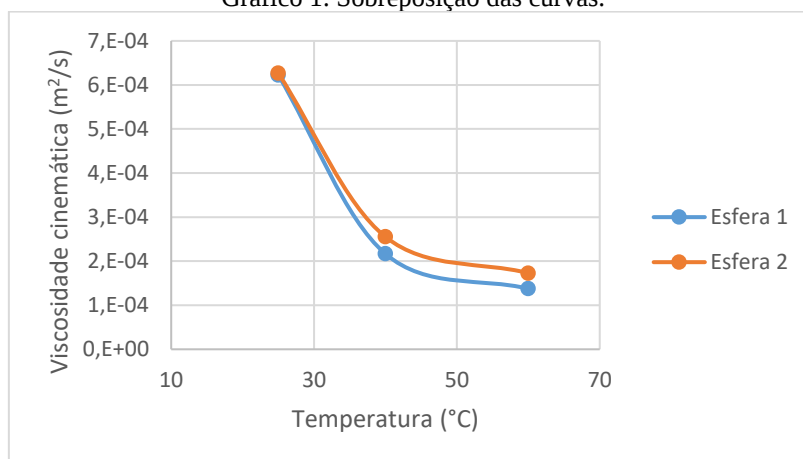
Temperatura 60°C							
Esfera	t (s)	t_{med} (s)	Distância (m)	Velocidade (m/s)	V_{corr} (m/s)	η (Pa.s)	ν (m ² /s)
1	0,51	0,527	0,250	0,4747	0,8415	0,1729	1,37E-04
	0,54						
	0,53						
2	0,48	0,477	0,250	0,5245	0,9902	0,2176	1,73E-04
	0,48						
	0,47						

Fonte: Autoria própria (2021).

Pode-se observar que a viscosidade vai diminuindo a medida que a temperatura vai aumentando, como era o esperando. E observa-se também que os valores de viscosidade das esferas do tipo 1 em relação ao tipo 2 estão bem próximas.

Com os valores obtidos foi traçado o gráfico seguinte. No Gráfico 1 pode ser observado o decréscimo que viscosidade sofre à medida que a temperatura vai aumentando. É posto nele a sobreposição dos dois tipos de esfera e observado que o comportamento das curvas é bem aproximado, validando ainda mais a precisão da bancada.

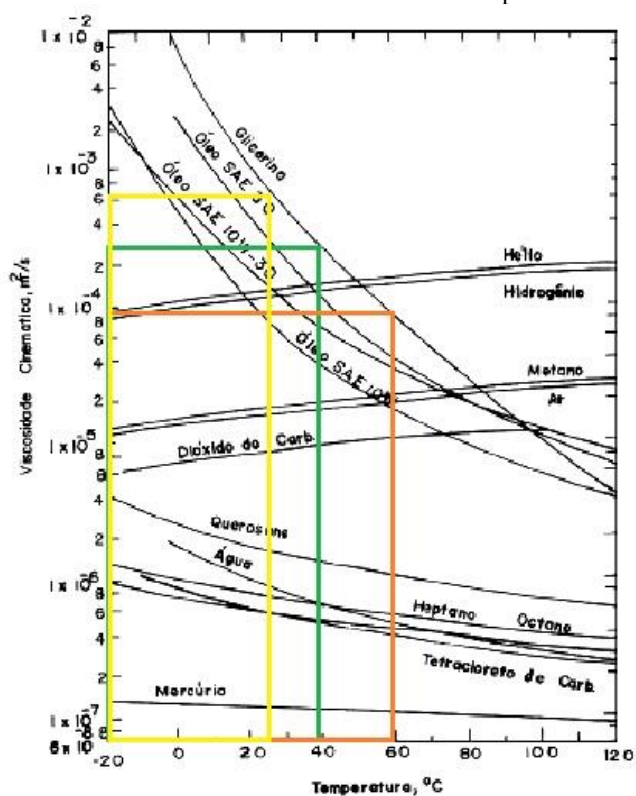
Gráfico 1. Sobreposição das curvas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Foi realizada uma análise e cálculo do erro, referente aos resultados obtidos na bancada em comparação com os resultados obtidos no viscosímetro e com dados da literatura. Os dados da literatura foram obtidos no Gráfico 2, que apresenta valores de viscosidade em função da variação de temperatura para diferentes fluidos (Fox et al., 2012).

Gráfico 2. Viscosidade x Temperatura.



Fonte: Adaptado de FOX et al (2012)

Para se determinar o erro do experimento foi utilizada a equação de erro relativo percentual, demonstrada na Equação 18:

$$Erro = \left(\frac{Valor\ experimental - Valor\ real}{Valor\ real} \right) * 100 \quad (18)$$

Os valores dos erros calculados estão demonstrados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Erro do experimento x equipamentos.

Erros relativos percentual									
Esferas	25°C			40°C			60°C		
	v _{equip} (m ² /s)	v _{prát} (m ² /s)	Erro	v _{equip} (m ² /s)	v _{prát} (m ² /s)	Erro	v _{equip} (m ² /s)	v _{prát} (m ² /s)	Erro
1	6,61E-04	6,22E-04	5,88%	1,96E-04	2,17E-04	10,76%	4,47E-05	1,37E-04	207,55%
2		6,27E-04	5,21%		2,55E-04	30,48%		1,73E-04	286,94%

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 8. Erro do experimento x literatura.

Erros relativos percentual									
Esferas	25°C			40°C			60°C		
	v _{equip} (m ² /s)	v _{prát} (m ² /s)	Erro	v _{equip} (m ² /s)	v _{prát} (m ² /s)	Erro	v _{equip} (m ² /s)	v _{prát} (m ² /s)	Erro
1	6,80E-04	6,22E-04	8,51%	2,80E-04	2,17E-04	22,62%	9,50E-05	1,37E-04	44,71%
2		6,27E-04	7,86%		2,55E-04	8,85%		1,73E-04	82,07%

Fonte: Autoria própria (2021).

Nota-se que, para a temperatura mais baixa (25°C), os valores de erro obtidos estão dentro do limite aceitável, que é considerável por volta de até 10%. Já em temperaturas maiores o erro é bastante elevado, isso é imposto pela dificuldade de se obter o tempo de queda esfera, pois como a viscosidade diminui bastante com o aumento da temperatura, a velocidade que a esfera tem de queda é muito rápido, assim o erro humano de visualizar e marcar o tempo maior.

5. CONCLUSÃO

A viscosidade é uma propriedade muito importante para os líquidos, e estimar o seu valor depende das condições que o fluido se encontra. É possível que se repita o mesmo experimento nas mesmas condições e apresente valores diferentes porque há forças moleculares interagindo entre si em grupos e o fenômeno da transferência de quantidade de movimento por colisões dessas moléculas é ofuscado.

Conclui-se que na bancada experimental confeccionada de acordo com o método de Stokes foi possível obter com maior precisão a viscosidade em temperaturas mais baixas, pois a influência das paredes do tubo e a velocidade da esfera é menor. Também foi observado que os resultados nas temperaturas maiores, onde nas curvas mostram que os valores estão mais distantes, se aproximam mais com os valores da literatura, tendo assim os erros menores.

O viscosímetro, além de ter baixo custo, servirá como prática experimental para facilitar o aprendizado de turmas futuras da disciplina Mecânica dos Fluidos, utilizando o método de Stokes das esferas para determinar a viscosidade de diversos fluidos.

6. REFERÊNCIAS

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson, 2008.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: AMGH,. 816 p. 2007.

CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 2018, Campina Grande. **Determinação da Viscosidade Cinemática por Método de Stokes Através de Estudo e Desenvolvimento de Viscosímetro Automatizado [...]**. [S. l.: s. n.], 2018.

FERREIRA, E. et al. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. **Rem: revista escola de minas**, v. 58, n. 1, p. 83-87, 2005.

FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânicas dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: [s. n.], 2002. 176 p.

MENDES JÚNIOR, Francisco Gevázio Pereira. **Análise de viscosidade do óleo SAE 20W50 pelo método de stokes**. 2018. Artigo (Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semiárido, [S. l.], 2018.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Rio Grande do Sul: [s. n.], 2013. 277 p.

SANTOS JÚNIOR, Jasiel Batista; FERREIRA, José Carlos. Construção e caracterização de um viscosímetro didático para utilização em aulas de mecânica dos fluídos. **Boletim Técnico da FATECSP BT/ 24**. 2008.

SILVA, Edna Lúcia; MENEZES, Eстера Muszkat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. rev. e atual. Florianópolis: [s. n.], 2005. 139 p.

SOUSA, Erika Katiúsia. **Modelo de experimento para determinar a viscosidade pelo Método de Stokes**. Mossoró: [s. n.], 2017. 46 p.

UNICAMP, FEM;. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em712/viscos.doc>> Acesso em: 10 Dez.2020.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH,. 880 p. 2011.

ANEXO 1 – ROTEIRO DA PRÁTICA

	UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO CENTRO DE ENGENHARIAS CURSO: ENGENHARIA MECÂNICA DISCIPLINA: MECÂNICA DOS FLUÍDOS		NOTA
EXPERIMENTO: DETERMINAR VISCOSIDADE PELO MÉTODO DE STOKES			
PROFESSOR:		TURMA:	DATA: / /
ALUNOS	1-		
	2-		
	3-		
	4-		

1- Introdução: A viscosidade é uma propriedade muito importante nos fluidos. Ter um fluido com a viscosidade ideal naquela determinada aplicação, impacta diretamente no seu resultado. Como por exemplo em óleos lubrificantes, eles são utilizados para reduzir o atrito entre as peças mecânicas, então é necessário saber a viscosidade certa para que o óleo se mantenha entre as duas peças, pois se ele não tiver viscosidade suficiente, não vai conseguir se manter e vai escoar facilmente. Viscosidade é a resistência que os fluídos exercem ao ser deformado quando a este se aplica um mínimo de esforço cortante. A viscosidade de um fluído depende de suas condições, e uma condição extremamente importante é a temperatura, pois em líquidos quanto mais alta a sua temperatura menor será a sua viscosidade.

2- Objetivo: Determinar a viscosidade do utilizando o método de Stokes das esferas, variando em três diferentes temperaturas e medindo a velocidade que os corpos esféricos de tamanhos diferentes percorrem o interior destes fluidos.

3- MATERIAL UTILIZADO:	• Provetas de 500ml;	• 01 recipiente;
	• Fluido para análise;	• Termômetros;
	• Esferas de tamanhos diferentes;	• 01 resistência elétrica;
	• Balança;	• Parquímetro;
	• 01 cronômetro	

4- Procedimento Experimental:

Serão realizadas medições de tempo de queda das esferas no fluido em analisado. O experimento será realizado para 3 temperaturas diferentes: 25°C, 40°C e 60°C, dividindo a turma em grupos. Cada grupo fará suas medições com uma média de 3 arremessos para cada tamanho de esferas.

Inicialmente as esferas serão pesadas numa balança de alta precisão e em seguida mede-se seus diâmetros com o parquímetro. O fluido será colocado na proveta de 500ml onde serão feitas marcações, na margem de 500 ml e no fundo, correspondentes ao tempo de abertura e fechamento do cronômetro, e medindo com a régua a distância entre as 2 marcações. Logo após, a temperatura serão medidas utilizando termômetros.

As esferas serão arremessadas e introduzida no fluido antes da marca dos 500 ml. Ao passar pela marca dos 500 ml o cronômetro será acionado e ao atingir o fundo da proveta será finalizado, com isso é anotados os tempos de queda de cada esfera. Para aumenta a temperatura do banho termico, basta aperto no botão SET do controlador e coloca a temperatura desejada, o controlador tem um sensor que identificar a temperatura que o banho se encontra, se tive inferior a programada ele liga a resistência para aquecer a água, se tive superior a programa ele desliga a resistência. Espere alguns minutos para que a temperatura se estabilize na desejada.

5- Dados

ESFERAS					FLUÍDOS	
Tamanho	Diâmetro (m)	Massa (kg)	Volume (m ³)	ρ (kg/m ³)	Tipo	ρ (kg/m ³)
1						
2						

Temperatura ____ °C							
Esfera	Distância L (m)	Tempo t(s)	t _{méd} (s)	Velocidade (m/s)	V _{corr} (m/s)	η (Pa.s)	ν (m ² /s)
1		t 1 (s) =					
		t 2 (s) =					
		t 3 (s) =					
2		t 1 (s) =					
		t 2 (s) =					
		t 3 (s) =					

6- Formulário

Média de tempos:	$t_{méd} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n t_k$
Volume da esfera:	$V = \frac{1}{6} \pi d^3$
Densidade:	$\rho = \frac{m}{V}$
Velocidade Média:	$V_{méd} = \frac{L}{t_{méd}}$
Velocidade Corrigida:	$V_{corr} = \left[1 + 2,4 * \left(\frac{d}{D} \right) \right] V_m$
Viscosidade Dinâmica:	$\eta = \frac{gd^2}{18V_{corr}} (\rho_s - \rho_f)$
Viscosidade Cinemática:	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$