

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**BRUNA CAMILA SCHWAB**

**PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DE VISCOSIDADE EM ÓLEOS LUBRIFICANTES**

**GUARAPUAVA**

**2023**

**BRUNA CAMILA SCHWAB**

**PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DE VISCOSIDADE EM ÓLEOS LUBRIFICANTES**

***Prototype for Viscosity Analysis in Lubricating Oils***

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rigatti.

**GUARAPUAVA**

**2023**



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**BRUNA CAMILA SCHWAB**

**PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DE VISCOSIDADE EM ÓLEO LUBRIFICANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 08 de dezembro de 2023

---

Luiz Fernando Rigatti  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Aldo Przybysz  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Hilson Henrique Daum  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**GUARAPUAVA**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Fernando Rigatti, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Agradeço ao projeto de extensão 4print da UTFPR pelas impressões 3D. A Anton Paar pelo empréstimo do reômetro e a professora Dr. Laura Silvestro por conduzir o ensaio das amostras.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, professores e colegas.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

Na área da lubrificação a propriedade denominada de viscosidade é de extrema importância para seleção de óleos lubrificantes adequados de acordo com a utilização. Dessa forma, o presente trabalho busca desenvolver um protótipo para análise de viscosidade em óleos lubrificantes, destinado a fornecer suporte aos estudos dos alunos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) em Guarapuava. O dispositivo proposto adota um modelo rotativo de placas paralelas, fabricado através da técnica de impressão 3D. Já a determinação da viscosidade ocorre por meio de uma equação que integra variáveis medidas por um dinamômetro, encoder e Arduino. A fim de validar os resultados obtidos pelo dispositivo, foram realizados testes em um reômetro comercial utilizando os óleos multiviscosos e monoviscosos 5W30, 15W40, 20W50, SAE 68 e SAE 90. Os testes envolvem uma comparação entre os resultados do protótipo e do reômetro comercial. A comparação revelou que o protótipo é capaz de diferenciar as características viscosas nos óleos testados. Portanto, pode ser empregado em estudos de maneira analítica e comparativa para análises de viscosidade em óleos lubrificantes.

Palavras-chave: protótipo; viscosidade; óleo lubrificante.

## ABSTRACT

In the lubrication field, the property known as viscosity is of utmost importance for selecting suitable lubricating oils based on their application. Thus, this present study aims to develop a prototype for viscosity analysis in lubricating oils, intended to provide support for the studies of students at the Federal Technological University of Paraná (UTFPR) in Guarapuava. The proposed device adopts a rotating model of parallel plates, manufactured through the 3D printing technique. The determination of viscosity is carried out through an equation that integrates variables measured by a dynamometer, encoder, and Arduino. To validate the results obtained by the device, tests were conducted on a commercial rheometer using multi-viscosity and mono-viscosity oils such as 5W30, 15W40, 20W50, SAE 68, and SAE 90. These tests involve a comparison between the results of the prototype and the commercial rheometer. The comparison revealed that the prototype is capable of differentiating the viscous characteristics in the tested oils. Therefore, it can be employed in analytical and comparative studies for viscosity analysis in lubricating oils.

Keywords: prototype; viscosity; lubricating oil.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pirâmide de aprendizagem.....	17
Figura 2 - Lei do escoamento de fluido viscoso entre placas paralelas .....	20
Figura 3 - Comportamento linear de um fluido newtoniano .....	22
Figura 4 - Variação da tensão de cisalhamento com a taxa de deformação para fluidos newtonianos e não newtonianos.....	23
Figura 5 – Copo Ford .....	26
Figura 6 – Viscosímetro de Ostwald.....	27
Figura 7 – Viscosímetro de Saybolt.....	28
Figura 8 – Viscosímetro Rotacional de Cilindros Concêntricos .....	29
Figura 9 – Viscosímetro Cone Placa e Placas Paralelas.....	29
Figura 10 – Base de dois cilindros concêntricos de um viscosímetro rotacional .....	30
Figura 11 - Representação 2D.....	33
Figura 12 - Representação 3D .....	33
Figura 13 - Arduino .....	34
Figura 14 – Disco para leitura da rotação pelo encoder .....	35
Figura 15 - Encoder.....	35
Figura 16 – Fluxograma de desenvolvimento do protótipo .....	38
Figura 17 - Representação CAD do protótipo.....	40
Figura 18 - Vista explodida do protótipo .....	41
Figura 19 - Impressão 3D base fixa .....	42
Figura 20 - Impressão 3D Base rotativa .....	43
Figura 21 – Impressão 3D Disco .....	43
Figura 22 - Conexão entre Arduino e Encoder .....	44
Figura 23 – Reômetro Anton Paar.....	45
Figura 24 - Protótipo .....	46
Figura 25 - Estufa .....	47
Figura 26 – Aquecimento dos óleos .....	47
Figura 27 – Leitura da temperatura.....	48
Figura 28 – Efeito da força centrífuga .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados reômetro para o óleo 5W30.....	49
Tabela 2 - Resultados reômetro para o óleo 15W40.....	49
Tabela 3 - Resultados reômetro para o óleo 20W50.....	50
Tabela 4 - Resultados reômetro para o óleo SAE 68.....	50
Tabela 5 - Resultados reômetro para o óleo SAE 90.....	51
Tabela 6 - Resultados protótipo para o óleo 15W40 .....	51
Tabela 7 - Resultados protótipo para o óleo 20W50 .....	51
Tabela 8 - Resultados protótipo para o óleo SAE 90 .....	52
Tabela 9 - Comparação das viscosidades médias entre reômetro e protótipo	52



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Desenho Assistido por Computador
CGS	Centímetro-Grama-Segundo
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
NBR	Normas Brasileiras
PLA	Biopolímero Ácido Polilático
RPM	Rotações Por Minuto
SI	Sistema Internacional
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\eta$	Viscosidade dinâmica
$\nu$	Viscosidade cinemática
$T$	Torque
$r$	Raio
$\epsilon$	Espessura da camada de óleo
$F$	Força viscosa
$\omega$	Rotação do motor em RPM

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema de pesquisa</b> .....	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>15</b>
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos .....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Aprendizagem experimental</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Lubrificação</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Relação entre viscosidade e temperatura</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Relação entre viscosidade e pressão</b> .....	<b>24</b>
<b>2.5</b>	<b>Relação entre viscosidade, temperatura e pressão</b> .....	<b>24</b>
<b>2.6</b>	<b>Medição da viscosidade</b> .....	<b>25</b>
2.6.1	Tipos de viscosímetros .....	25
<u>2.6.1.1</u>	<u>Copo Ford</u> .....	<u>25</u>
<u>2.6.1.2</u>	<u>Viscosímetro de Ostwald/Cannon-Fenske</u> .....	<u>26</u>
<u>2.6.1.3</u>	<u>Viscosímetro de Esfera ou viscosímetro de Stokes</u> .....	<u>27</u>
<u>2.6.1.4</u>	<u>Viscosímetro de Saybolt</u> .....	<u>27</u>
<u>2.6.1.5</u>	<u>Viscosímetro rotacional</u> .....	<u>28</u>
<b>2.7</b>	<b>Ferramentas para o desenvolvimento do dispositivo</b> .....	<b>32</b>
2.7.1	Desenho Assistido por Computador (CAD) .....	32
<b>2.8</b>	<b>Dispositivos auxiliares</b> .....	<b>33</b>
2.8.1	Arduino .....	33
2.8.2	Encoder .....	34
2.8.3	Dinamômetro .....	35
2.8.4	Impressão 3D .....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Sequência de fabricação do protótipo</b> .....	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Modelagem 3D</b> .....	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>Impressão 3D</b> .....	<b>42</b>
<b>3.5</b>	<b>Conexão eletrônica</b> .....	<b>44</b>
<b>3.6</b>	<b>Testes com reômetro</b> .....	<b>44</b>

<b>3.7</b>	<b>Testes com o viscosímetro proposto .....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Resultado dos testes com o reômetro .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados dos testes com o protótipo .....</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A lubrificação é uma área de estudo que se propõem como principal função a redução do atrito e por consequência a redução do desgaste entre superfícies que estão em movimento relativo entre si, formando uma película de fluido lubrificante entre elas. No entanto pode se dizer que as funções da lubrificação vão além.

Para Ribeiro (2012) os lubrificantes são substâncias que formam uma película protetora cuja função principal é reduzir o atrito e o desgaste, auxiliar no controle da temperatura e na vedação dos componentes, realizando também a limpeza, proteção contra corrosão e a atuação como transmissão de força e movimento.

A viscosidade do lubrificante é fundamental para esse processo porque determina a capacidade do fluido de formar uma película resistente à deformação e ao cisalhamento sob as condições de operação.

De acordo com Carreteiro e Belmiro (2006) a viscosidade é uma propriedade dos fluidos de grande importância, ela é definida como sendo a resistência que o fluido possui para escoar, ou seja, quando o fluido é submetido ao um esforço de cisalhamento as camadas adjacentes do fluido movem-se a diferentes velocidades, quanto menor for essa velocidade mais viscoso o fluido é e menor é a capacidade de escoar, o contrário também é válido, quando o fluido é menos viscoso a capacidade de escoar é maior.

Para Mang e Dresel (2007) a viscosidade pode sofrer variações de acordo com a temperatura e a pressão. A viscosidade de muitos lubrificantes diminui com a temperatura, tornando-o mais fácil de fluir e mantendo suas propriedades lubrificantes. Por outro lado, a viscosidade pode aumentar em temperaturas mais baixas, o que dificulta o fluxo adequado do lubrificante e compromete a eficiência da lubrificação. Em relação a pressão a viscosidade aumenta muito em relação ao aumento de pressão.

Para que se possa promover a lubrificação que garanta a redução do atrito e consequentemente do desgaste, aumento da vida útil dos componentes e a otimização do desempenho dos sistemas mecânicos a viscosidade ocupa um papel decisivo e precisa ser adequada ao funcionamento desde motores automotivos a máquinas industriais.

O estudo e a compreensão dessa propriedade são essenciais para o desenvolvimento de lubrificantes mais eficientes e para o avanço contínuo das técnicas de lubrificação. Portanto, a viscosidade tem um papel decisório na escolha do lubrificante de acordo com o tipo de lubrificação a ser usada e temperatura de trabalho. Para Carmo (2012) os lubrificantes com maior viscosidade são mais eficientes para a lubrificação limítrofe por possuírem maior capacidade de carga. Já para a lubrificação hidrodinâmica os lubrificantes com menor viscosidade são mais eficientes.

### **1.1 Problema de pesquisa**

A proposta deste trabalho é desenvolver um dispositivo de análise de viscosidade que será utilizado em atividades práticas como forma de complementação da aula teórica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, Campus Guarapuava. Esse dispositivo terá como objetivo auxiliar nas pesquisas e experimentos relacionados à caracterização de fluidos e à avaliação da viscosidade de óleos lubrificantes. A implementação desse dispositivo proporcionará recursos de análise e contribuirá para o aprimoramento contínuo das técnicas de lubrificação e estudos relacionados na instituição.

A realização de experimentos práticos no dispositivo de análise de lubrificação contribui para o processo de ensino-aprendizagem, permitindo que os alunos compreendam melhor os conceitos teóricos por meio da experiência direta e da visualização dos resultados.

Para Souza (2013), o ensino experimental funciona como um auxílio para assegurar a transmissão de conhecimento científico.

### **1.2 Justificativa**

A justificativa para o desenvolvimento deste trabalho se baseia na necessidade de suprir uma demanda existente na Universidade. A implementação de um dispositivo de análise de viscosidade tem como objetivo proporcionar aos alunos um ambiente de aprendizado mais dinâmico e interativo, fornecendo aos alunos uma ferramenta valiosa para aprimorar sua compreensão teórica por meio de experiências práticas, além de contribuir para a seleção adequada de óleos baseada no parâmetro de viscosidade.

Além disso, a determinação da viscosidade em óleos é de suma importância para a seleção adequada desses fluidos em diversas aplicações. Com o dispositivo de análise de viscosidade, será possível realizar testes e medições, permitindo uma avaliação dos óleos disponíveis e compreendendo a escolha do óleo mais adequado para cada aplicação específica.

### **1.3 Objetivos**

Para o correto entendimento da proposta que este trabalho pretende apresentar, são detalhados a seguir o objetivo geral e específicos.

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um dispositivo para a determinação da viscosidade de óleos lubrificantes.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Para atingir o objetivo geral mencionado, é necessário fragmentá-lo em objetivos específicos que sejam progressivamente atendidos ao longo do trabalho. Dessa forma, os objetivos específicos propostos são:

- a) Relacionar a lubrificação com a viscosidade e quais fatores podem influenciá-la;
- b) Identificar os principais modelos de equipamentos de mensuração de viscosidade existentes;
- c) Definir conceitualmente o modelo escolhido bem como as equações necessárias para a determinação da viscosidade;
- d) Desenvolver um protótipo em 3D do dispositivo utilizando o software SolidWorks;
- e) Selecionar dispositivos auxiliares para leitura das variáveis envolvidas na determinação da viscosidade do protótipo;
- f) Obter o modelo físico do protótipo por meio da impressão 3D e a montagem dos dispositivos auxiliares;
- g) Realizar testes comparativos para verificar a consistência e similaridade dos resultados obtidos pelo dispositivo desenvolvido em relação a outros equipamentos de análise de viscosidade validados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica necessária para embasar o trabalho proposto.

### 2.1 Aprendizagem experimental

O dispositivo de análise da viscosidade em óleos lubrificantes servirá de apoio para as aulas experimentais, onde os alunos poderão consolidar o aprendizado visto em aulas expositivas e testar hipóteses.

Pimentel (2007) enfatiza em seu estudo que a experimentação é importante para estabelecer a relação entre prática e teoria para que haja o desenvolvimento profissional.

No âmbito do ensino profissionalizante é interessante que exista um equilíbrio entre as aulas práticas e aulas teóricas. Pois, em aulas extremamente teóricas a ausência de atividades práticas pode formar um estudante sem competências operacionais necessárias no ambiente profissional. Por outro lado, aulas extremamente práticas preparam um aluno apenas para executar comprometendo sua capacidade de reflexão e proposição de mudanças e melhorias, (Sabino; Dias e Lima, 2021).

De acordo com Saraiva Educação (2022), a pirâmide do aprendizado formulada possivelmente pelo psiquiatra Willian Glasser é uma representação gráfica na qual é atribuída porcentagens de retenção de conhecimento para cada atividade desenvolvida, como na Figura 1.



Figura 1 - Pirâmide de aprendizagem



Fonte: Viana (2021)

A pirâmide enfatiza que o ato de praticar é uma forma de aprendizado ativo onde o estudante participa de aulas em laboratórios, visualiza aplicações no dia a dia, resolve problemas e segundo essa análise quando um aluno realiza o ato de praticar ele pode reter 80% do aprendizado em relação às outras formas, como ler, escrever, observar, ouvir e discutir sobre o assunto.

A importância das atividades práticas e de laboratório relacionadas aos conteúdos contemplados no curso de Engenharia está prevista nas Diretrizes Curriculares Nacionais dos Cursos de Graduação de Engenharia onde:

3º Devem ser previstas as atividades práticas e de laboratório, tanto para os conteúdos básicos como para os específicos e profissionais, com enfoque e intensidade compatíveis com a habilitação da engenharia, sendo indispensáveis essas atividades nos casos de Física, Química e Informática (Brasil, 2019, p. 5).

Nesse sentido quando o aluno pratica experimentos ele assimila melhor o conteúdo, pois participando de forma ativa na obtenção de conhecimento ele pode ver como o objeto que ele está manipulando se comporta na prática, bem como a relação com a teoria, ele pode testar suas hipóteses, estimular sua criatividade e desenvolver habilidades práticas essenciais para sua formação acadêmica e profissional. Esse processo dinâmico e participativo promove uma aprendizagem significativa.

## 2.2 Lubrificação

Para Almeida (2017), o conceito de lubrificação é baseado em inserir um lubrificante entre superfícies para minimizar o atrito. Sendo esses lubrificantes de origem do petróleo, para aplicação industrial, pois conseguem contribuir com a formação de uma película lubrificante adequada e capacidade de adesão. Ainda, a lubrificação tem um papel importante dentro da indústria, prevenindo falhas, superaquecimentos, empenamentos e possibilitando um contato entre peças minimizando o desgaste.

Wen e Huang (2017) sugerem óleo e graxa como fluidos mais utilizados na indústria, tendo também a água, o ar e metais líquidos como lubrificantes especiais, por exemplo, o uso de sódio líquido como lubrificante de reatores nucleares. Os autores também citam o uso menos comum de lubrificantes sólidos como grafite, dissulfeto de molibdênio ou politetrafluoretileno.

Para os autores Wen e Huang (2017) o uso de um lubrificante com alta viscosidade pode gerar muito calor e dificultar o processo de resfriamento, com o aumento da temperatura causado pelo atrito pode haver a falha do filme e conseqüentemente o desgaste da superfície, em conclusão a viscosidade do fluido necessita ser adequada a situação de uso.

A escolha da viscosidade adequada é importante, mas como ela não se mantém constante ao longo do tempo em virtude de contaminantes presentes, ela pode sofrer alterações, portanto em alguns casos ela encontra-se inadequada ao uso sendo então necessária a troca do fluido lubrificante.

Totten (2006) ressalva que as mudanças na viscosidade do óleo em serviço podem indicar contaminação ou degradação do fluido. A redução no nível de viscosidade, por exemplo em um óleo de motor pode haver por contaminação com combustível, óleos leves ou solventes. Já o aumento da viscosidade pode se dar por subprodutos de oxidação e combustão.

De acordo com Almeida (2017) a lubrificação pode ser dividida de maneira geral em 2 grandes grupos:

- Lubrificação limite ou restrita: refere-se à condição na qual a película de lubrificante possui uma espessura na ordem de 10 microns, representando o limite entre o atrito seco e a lubrificação hidrodinâmica.

- Lubrificação hidrodinâmica ou plena: É mais comum a utilização deste sistema, a película de lubrificante é mais espessa (0,025 a 0,25 mm) dependendo da viscosidade, da rugosidade superficial, da forma geométrica, da velocidade relativa entre as camadas da superfície e da carga exercida sobre o fluido.

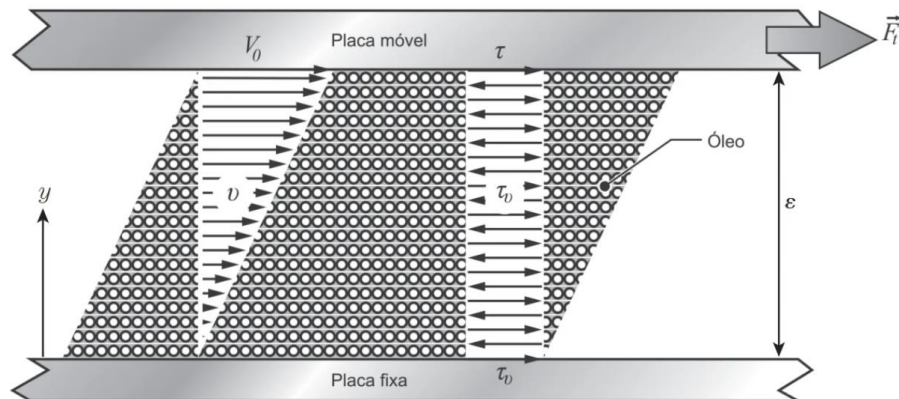
De acordo com Totten (2006) para que a espessura da película lubrificante que separa as superfícies possa ser mantida, precisa haver a correta faixa de viscosidade operacional. Segundo ele a viscosidade é provavelmente a propriedade de maior importância para a especificação de um lubrificante.

A definição de viscosidade sob a ótica de Carreteiro e Belmiro (2006) e da NBR 10441:2014 propõem que ela é uma propriedade dos fluidos que determina sua resistência ao cisalhamento, sendo a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, devida as interações entre as moléculas presentes no fluido.

Para Totten a definição de viscosidade dinâmica (absoluta) é a medida da força tangencial necessária para o cisalhamento de um plano paralelo de um fluido sobre outro. Essa força é proporcional à viscosidade do fluido, à área plana que está sendo cisalhada e à taxa na qual os planos paralelos adjacentes estão sendo forçados a deslizar um sobre o outro, dividida pela espessura do filme.

Bistafa (2017) demonstra a definição de viscosidade dinâmica ou absoluta, com um experimento onde um fluido está contido entre duas (02) placas paralelas, como pode ser observado pela Figura 2. Uma força tangencial externa  $\vec{F}_t$  é aplicada a uma das placas para entrar em movimento a fim de superar a resistência viscosa do fluido a uma velocidade constante  $V_0$ , pelo princípio da aderência completa, a lâmina fluida, em contato com a placa superior, adquire a mesma velocidade  $V_0$  enquanto a outra permanece em regime estacionário, ou seja, possui velocidade zero. À medida que o fluido se move, as camadas adjacentes de fluido são arrastadas umas pelas outras, criando uma diferença de velocidade entre elas a qual transmite ao fluido a tensão tangencial  $\tau$ . Como as lâminas fluidas podem se movimentar umas em relação às outras cada lâmina adquire uma velocidade própria  $v$ .

Figura 2 - Lei do escoamento de fluido viscoso entre placas paralelas



Fonte: Bistafa (2018)

Diante do exposto a viscosidade dinâmica pode ser definida pela Equação (1):

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{\partial v}{\partial y}} \quad (1)$$

Onde:

$\mu$  é a viscosidade dinâmica ou absoluta;

$\tau$  é a tensão de cisalhamento;

$\partial v / \partial y$  é o gradiente local de velocidade.

Esse resultado é conhecido como lei de Newton da viscosidade essa lei indica que, quando a distribuição de velocidades no filme de óleo é linear, o gradiente de velocidades é uma constante, Equação (2):

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{V_0 - 0}{\varepsilon} = cte \quad (2)$$

Onde:

$\varepsilon$  é a espessura do filme de óleo entre as placas;

$V_0$  é a velocidade da placa móvel.

Este resultado mostra que a tensão viscosa tem um valor fixo não só entre as lâminas, como também nas placas inferior e superior.

O parâmetro  $\tau$  é expresso em unidades de pressão - Pascal (Pa), enquanto o parâmetro do gradiente de velocidade local é expresso em unidades de

velocidade/comprimento [(m/s)/m]. Portanto, a viscosidade dinâmica é expressa em Pascal-segundos (Pa.s) ou Poise (P).

No entanto a viscosidade dinâmica é readequada para a ordem de grandeza em milipascal-segundos (mPa.s) ou centipoise (cP).

Wen e Huang (2017) e a NBR 10441:2014 definem viscosidade cinemática como a razão entre a viscosidade dinâmica de um fluido e sua densidade na mesma temperatura e pressão, como na Equação (3):

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

Onde:

$\rho$  é a densidade;

$v$  é a viscosidade cinemática.

A unidade de viscosidade cinemática no Sistema Internacional SI é m<sup>2</sup>/s e no sistema Centímetro-Grama-Segundo CGS é o Stoke (St), a equivalência é dada pela Equação (4).

$$1 \text{ St} = 102 \text{ mm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}. \quad (4)$$

Como o St tem uma magnitude desapropriada para a representação, o cSt (centi Stoke) é mais usado na prática, a equivalência pode ser vista na Equação (5).

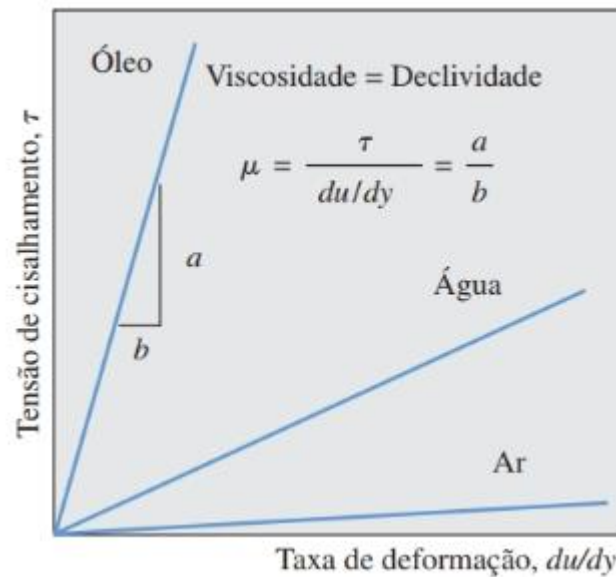
$$1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2/\text{s} \quad (5)$$

A NBR 10441:2014 complementa de definição de viscosidade cinemática como sendo a razão entre o momento de transporte e o momento de armazenamento.

As literaturas usam tanto a simbologia  $\mu$  como a simbologia  $\eta$  para designar a viscosidade dinâmica.

Para Bistafa (2017) assim como para Çengel e Cimbala (2015) a definição de fluido newtoniano segue a lei de Newton da viscosidade onde a taxa de deformação é linearmente proporcional a tensão de cisalhamento, como pode ser observado na Figura 3. Como exemplo de fluidos newtonianos tem-se o ar, a água, a gasolina e os óleos.

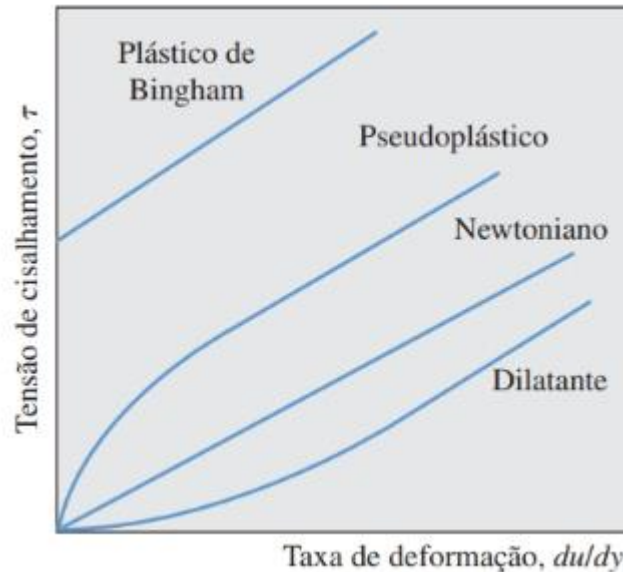
**Figura 3 - Comportamento linear de um fluido newtoniano**



Fonte: Çengel e Cimbala (2015).

Çengel e Cimbala (2015) definem os fluidos não newtonianos pela ausência de linearidade na relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação. A inclinação da curva no gráfico de tensão versus taxa de deformação é referida como a viscosidade aparente dos fluidos não newtonianos. Os fluidos dilatantes como, por exemplo, as soluções de amido a viscosidade aparente aumenta com a taxa de deformação. Já os fluidos que exibem comportamento oposto são denominados de pseudoplástico como algumas tintas e soluções de polímeros. Já os plásticos de Bingham comportam-se inicialmente como sólidos, mas deformam-se continuamente quando a tensão de cisalhamento excede um limite de carga e então passam a comportar-se como fluido como, por exemplo a pasta de dente. A Figura 4 ilustra o comportamento dos fluidos mencionados anteriormente.

**Figura 4 - Variação da tensão de cisalhamento com a taxa de deformação para fluidos newtonianos e não newtonianos**



Fonte: Çengel e Cimbala (2015).

### 2.3 Relação entre viscosidade e temperatura

Para Wen e Huang (2017) o fluido é composto por moléculas em movimento aleatório, de modo que a viscosidade do fluido é resultado das forças gravitacionais e do momento das moléculas. À medida que a temperatura aumenta, tanto o movimento molecular médio quanto a distância molecular média do fluido aumentam. Isso faz com que o momento das moléculas aumente, mas as forças gravitacionais diminuam. Portanto, a viscosidade de um líquido diminui drasticamente com o aumento da temperatura, e isso afeta significativamente a lubrificação.

Para os autores as Equações (6) e (7) podem ser usadas com limitações pois são resultados de testes empíricos.

Para Reynolds:

$$\eta = \eta^0 e^{-\beta(T-T^0)} \quad (6)$$

Para Vogel:

$$\eta = \eta^0 e^{\frac{b}{T+\theta}} \quad (7)$$

Onde:

$\eta_0$  é a viscosidade sob a temperatura  $T_0$ ;

$\eta$  é a viscosidade na temperatura  $T$ ;

$\beta$  é o coeficiente de viscosidade-temperatura, aproximadamente igual a  $0.03$   $1/^\circ\text{C}$ ;  $m = 1, 2, \dots$ ;

$\theta$  é a temperatura de "viscosidade infinita" e para um óleo mineral padrão,  $\theta$  é desejavelmente igual a  $95$   $^\circ\text{C}$ ;

$a$ ,  $s$  e  $b$  são constantes.

A equação de viscosidade-temperatura de Reynolds é mais conveniente de ser usada, mas a equação de viscosidade-temperatura de Vogel é mais precisa.

## 2.4 Relação entre viscosidade e pressão

De acordo com Wen e Huang (2017) com o aumento da pressão, a distância entre as moléculas de um fluido diminui, resultando em um aumento da viscosidade.

As seguintes equações são utilizadas para descrever a relação entre viscosidade e pressão.

Equação de Barus:

$$\eta = \eta_0 * \exp(\alpha * p) \quad (8)$$

Onde:

$\eta$  é a viscosidade sob a pressão  $p$ ;

$\eta_0$  é a viscosidade em pressão atmosférica;

$\alpha$  é o coeficiente de viscosidade-pressão;

$p$  é igual a  $5.1 \times 10^{-9}$  Pa,  $z$  geralmente tem o valor de  $0.68$  para óleos minerais, e  $c$  é aproximadamente igual a  $\alpha/15$ . O coeficiente de viscosidade-pressão ( $\alpha$ ) dos óleos minerais fica em torno de  $2.2 \times 10^{-8}$   $\text{m}^2/\text{N}$ .

## 2.5 Relação entre viscosidade, temperatura e pressão

É importante observar que a viscosidade de um lubrificante pode ser afetada tanto pela temperatura quanto pela pressão.

Equações de Barus e Reynolds:



$$\eta = \eta_0 * \exp[\alpha p - \beta(T - T_0)] \quad (9)$$

Onde:

T é a temperatura;

T<sub>0</sub> é a temperatura de referência.

Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  descrevem as variações da viscosidade com a pressão e temperatura, respectivamente.

## 2.6 Medição da viscosidade

De acordo com Ghosh, Majumdar e Sarang (2013) a viscosidade de um fluido é medida com um viscosímetro. Esses são dispositivos que usam a teoria do fluxo viscoso para relacionar a taxa de fluxo com a queda de pressão ao longo do caminho de fluxo padronizado e a viscosidade do fluido.

### 2.6.1 Tipos de viscosímetros

Viscosímetros são equipamentos que servem para oferecer uma medida quantitativa da viscosidade em fluidos. A seguir é apresentado os principais modelos de viscosímetros disponíveis.

#### 2.6.1.1 Copo Ford

De acordo com a NBR 5849: 2015 o viscosímetro Copo Ford é utilizado para determinar a viscosidade em um fluido durante o escoamento. O fluido é alocado em um copo que possui um orifício, quando esse orifício é aberto o fluido escoar e deve-se contabilizar o tempo até a última gota de fluido. A viscosidade é determinada por uma equação onde a variável é o tempo de escoamento. Essa equação está relacionada com o tamanho do Copo Ford o qual é dado por n°2, n°3 e n°4. A Figura 5 abaixo mostra uma representação desse viscosímetro.

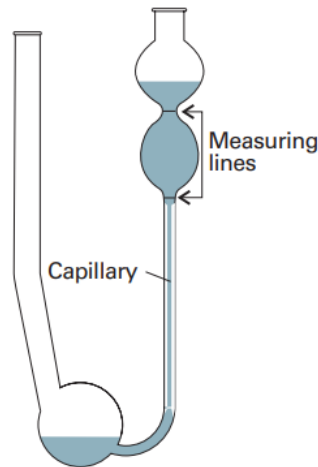
**Figura 5 – Copo Ford**

Fonte: Splabor (2023)

#### 2.6.1.2 Viscosímetro de Ostwald/Cannon-Fenske

O autor Atkins (2006) descreve o princípio básico desse viscosímetro como sendo a contagem de tempo em que uma quantidade de fluido leva para escoar, sob a influência da gravidade, de um ponto a outro do tubo capilar em formato de U em que se conhece o raio, a densidade, a diferença de altura, o comprimento do tubo e o volume. A viscosidade é obtida por meio de uma equação envolvendo as variáveis citadas, conhecida como equação de Poiseuille. Sendo este método utilizado para fluidos newtonianos. Uma representação desse viscosímetro pode ser vista na Figura 6 abaixo.

**Figura 6 – Viscosímetro de Ostwald**



**Fonte: Atkins (2006)**

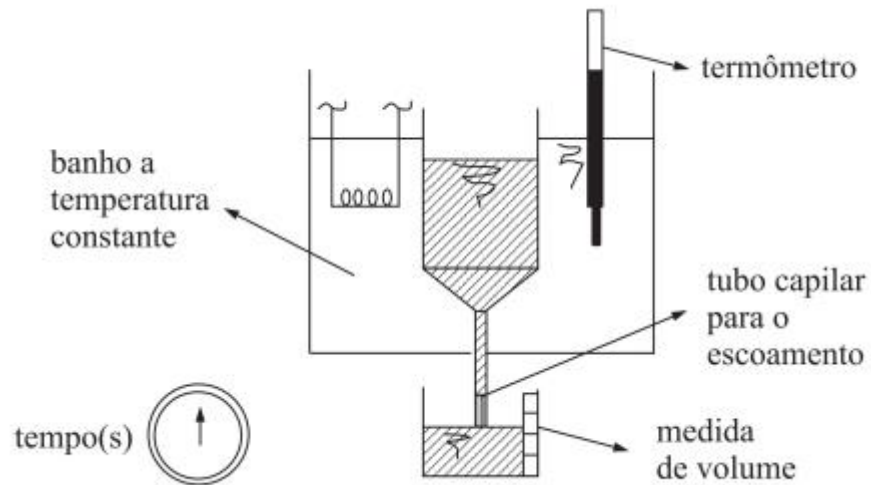
#### 2.6.1.3 Viscosímetro de Esfera ou viscosímetro de Stokes

Silva et al. (2018) descrevem o viscosímetro de esfera como um tubo posicionado na vertical ou inclinado. Dentro deste tubo, é lançada uma esfera que se move pela ação da gravidade até atingir sua velocidade terminal. Isso ocorre quando as forças gravitacionais se igualam às forças de arrasto. Durante o experimento, mede-se o intervalo de tempo que a esfera leva para passar de um ponto pré-determinado para outro. Para calcular a viscosidade do fluido, utiliza-se a lei de Stokes, levando em consideração os valores de velocidade terminal, densidade do líquido, tamanho da esfera e densidade da esfera. A fim de aumentar a precisão do teste, é possível variar o tamanho das esferas.

#### 2.6.1.4 Viscosímetro de Saybolt

Brunetti (2008) explica que o viscosímetro de Saybolt opera medindo o tempo necessário para que  $60 \text{ cm}^3$  de um fluido escoe através de um tubo capilar. O experimento pode ser realizado a temperaturas de  $40^\circ\text{C}$  ou  $100^\circ\text{C}$ . A viscosidade é calculada por meio de uma equação em que o tempo é a variável, e a unidade de medida é o Segundo Saybolt Universal (SSU).

**Figura 7 – Viscosímetro de Saybolt**



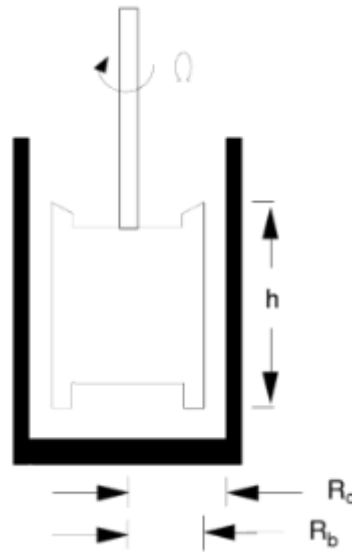
**Fonte: Brunetti (2008)**

#### 2.6.1.5 Viscosímetro rotacional

Viscosímetros rotacionais podem ser do tipo cone e placa, placas paralelas e cilindros concêntricos como pode ser visto na Figura 8 e Figura 9. De forma geral um dos cilindros ou placa rotaciona em relação ao outro ou ambos rotacionam com o fluido acondicionado entre os cilindros ou placas.

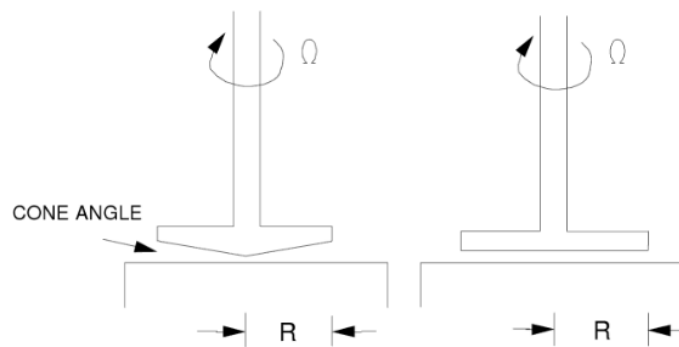
Segundo Steffe (1992) para determinação da viscosidade é necessário que o fluido de teste seja incompressível, que as propriedades não variem com a pressão, que a temperatura seja mantida constante e que seja assumida a condição de não deslizamento nas paredes. A viscosidade é medida em função da velocidade angular necessária para produzir um determinado torque, em alguns modelos a leitura é feita através de uma mola torcional. Esse modelo de viscosímetro pode ser utilizado para determinar a viscosidade de fluidos newtonianos e não newtonianos.

**Figura 8 – Viscosímetro Rotacional de Cilindros Concêntricos**



Fonte: Steffe (1992)

**Figura 9 – Viscosímetro Cone Placa e Placas Paralelas**



Fonte: Steffe (1992)

Conforme o autor anterior a Equação (10) é utilizada para encontrar o valor da viscosidade em um fluido newtoniano em um dispositivo de placas paralelas utilizando como base a lei da viscosidade de Newton dada pela Equação (1) e a Equação (2) a respeito do comportamento linear do fluido.

$$\frac{2M}{\pi R^3} = \mu \frac{\Omega R}{h} \quad (10)$$

Onde:

$M$  é o torque;

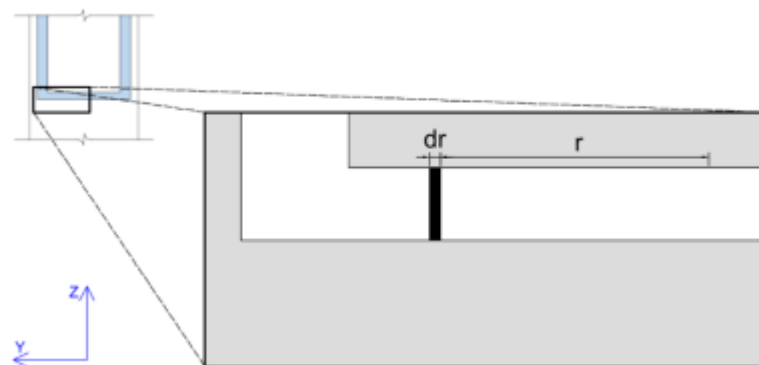
$\Omega$  é a rotação;

$h$  é a altura entre as placas;

$R$  é o raio da placa.

O autor Sampaio (2022) calcula a viscosidade entre a base de dois cilindros concêntricos o qual pode se fazer uma analogia para o modelo de placas paralelas utilizando a lei de Newton da viscosidade como na Equação (1). A Figura 10 mostra a região entre os dois cilindros.

**Figura 10 – Base de dois cilindros concêntricos de um viscosímetro rotacional**



**Fonte: Sampaio (2022)**

Para o sistema de coordenadas adotado a lei de Newton da viscosidade pode ser escrita como:

$$\tau = \mu \frac{du}{dz} \quad (11)$$

Onde:

$du/dz$  é o perfil de velocidade.

Utilizando a condição de não deslizamento, a velocidade da camada fluida que está em contato com o cilindro interno, o qual é mantido fixo, deve ser nula. Já a velocidade da camada que está em contato com o cilindro externo deve ser igual a velocidade de rotação do cilindro e considerando o perfil de velocidade linear para fluidos newtonianos assim como na Equação (2) tem-se:

$$\frac{du}{dz} = \frac{V'}{h'} \quad (12)$$

Onde:

$V'$  é a velocidade da camada em contato com o cilindro que rotaciona.

$h'$  é a espessura da camada de fluido.

Sendo a força de cisalhamento infinitesimal igual ao produto da tensão de cisalhamento por um elemento infinitesimal de área e substituindo  $\tau$  pelo seu valor dado na Equação (11), bem como a substituição de  $du/dz$  pelo valor dado na Equação (12), tem-se:

$$dF = \tau dA = \mu \frac{du}{dz} dA = \mu \left( \frac{V'}{h'} \right) dA \quad (13)$$

Como  $dA = 2\pi r dr$ , então, a força de cisalhamento infinitesimal é:

$$dF = \mu \left( \frac{V'}{h'} \right) 2\pi r dr \quad (14)$$

Sendo  $V'$  a velocidade linear igual a  $\omega r$  a Equação (14) fica:

$$dF = \mu \left( \frac{\omega r}{h'} \right) 2\pi r dr \quad (15)$$

A força de cisalhamento  $dF$  aplicada a uma distância  $r$  gera um torque infinitesimal  $dT$ :

$$dT = dF \cdot r \quad (16)$$

Substituindo  $dF$  pela Equação (15) e integrando para obter o torque.

$$T = \int dT = \int_0^{Ri} dF \cdot r = \mu \frac{2\pi\omega}{h'} \int_0^{Ri} r^3 dr \quad (17)$$

Solucionando a integral da Equação (17).

$$T = \mu \frac{2\pi\omega Ri^4}{4h'} \quad (18)$$

Levando em consideração a hipótese descrita de Sampaio (2022) e isolando  $\mu$  tem-se a equação da viscosidade.

$$\mu = \frac{2Th'}{\pi\omega Ri^4} \quad (Pa.s) \quad (19)$$

Pode-se observar que rearranjando os termos da Equação (10) para isolar  $\mu$  obtém-se o mesmo valor da Equação (19).

## 2.7 Ferramentas para o desenvolvimento do dispositivo

Nesta sessão é apresentado algumas ferramentas necessárias para o desenvolvimento de projetos.

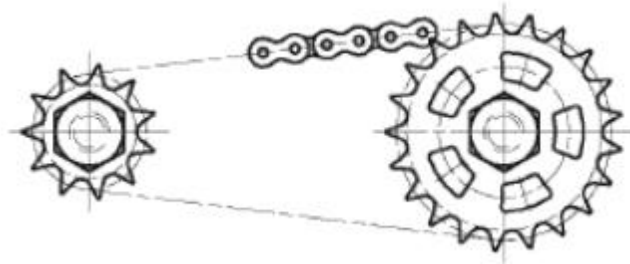
### 2.7.1 Desenho Assistido por Computador (CAD)

Uma ferramenta indispensável em um projeto de engenharia mecânica são os *softwares* de desenho técnico. O Desenho Assistido por Computador (CAD) surgiu por volta dos anos de 1980 a 1990 onde a evolução dos equipamentos de informática permitiu sua criação, permitindo assim, posteriormente a substituição dos desenhos técnicos feitos à mão em folhas de papel. O desenho técnico tem por objetivo a comunicação de ideias, sendo regulamentado por normas possibilitando assim a padronização, (Silva et al., 2006).

No início da utilização do *software* a representação baseava-se em projeções ortogonais múltiplas (vistas), o qual se parecia com visualização bidimensional (2D) das pranchetas, como na representação da Figura 11.



**Figura 11 - Representação 2D**



Fonte: Silva et al. (2006)

Posteriormente o CAD evoluiu para uma modelagem tridimensional (3D), representado pela Figura 12, sendo possível fazer a montagem virtual dos conjuntos, (Silva et al., 2006).

**Figura 12 - Representação 3D**



Fonte: Silva et al. (2006)

Ainda segundo Silva (2006) o modelo 3D torna possível efetuar várias simulações, em particular na análise de resistência estrutural e/ou térmica, como deslocamentos, tensões temperaturas, frequências de vibração etc. Por esses motivos é utilizado o CAD antes mesmo da produção de um protótipo real.

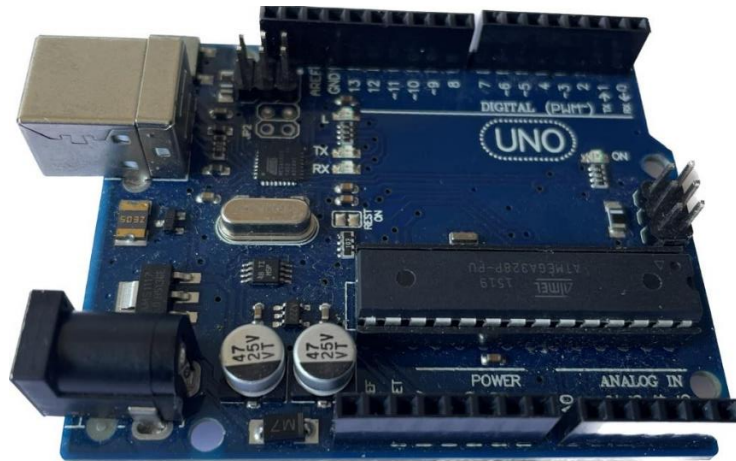
## **2.8 Dispositivos auxiliares**

### **2.8.1 Arduino**

Segundo Mc Roberts (2011), o Arduino é considerado uma plataforma de computação física ou embarcada. Isso implica que se trata de um sistema capaz de interagir com o ambiente por meio de hardware e software. Para iniciar o uso do Arduino, é necessário dispor de um computador com o ambiente de desenvolvimento

integrado IDE do Arduino instalada, a qual é uma aplicação de código aberto. A IDE do Arduino é o ambiente no qual os programas de computador são desenvolvidos. Após a elaboração do programa, este pode ser transferido para o Arduino por meio de uma conexão física entre o dispositivo e o computador, utilizando um cabo. O Arduino está equipado com entradas e saídas que possibilitam a conexão a sensores, enquanto suas saídas têm a capacidade de controlar motores ou displays.

**Figura 13 - Arduino**

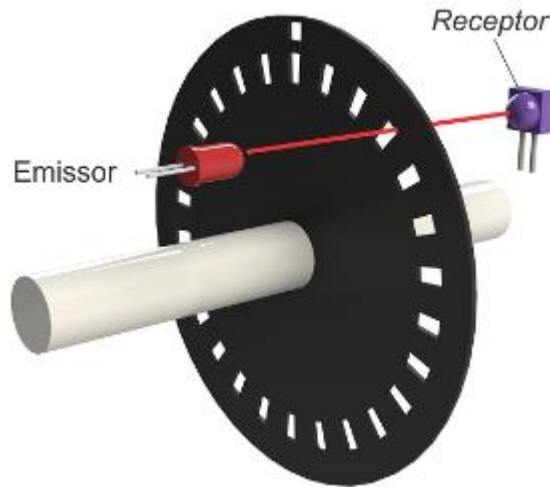


**Fonte: Autoria própria (2023)**

## 2.8.2 Encoder

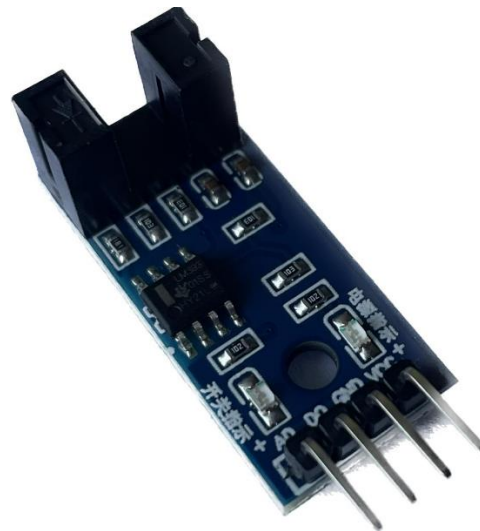
Um encoder incremental óptico é um dispositivo que mede a posição ou velocidade de um eixo rotativo com base em princípios ópticos o qual pode ser visto na Figura 15. Consiste em um disco giratório opaco com marcas ou ranhuras e sensores ópticos, onde um emissor de luz ilumina o disco. As marcas, chamadas de "janelas," são interpretadas pelos sensores, que detectam a luz que passa por elas. O disco com "janelas" pode ser visto na Figura 14. À medida que o disco gira, as marcas bloqueiam intermitentemente a luz, gerando pulsos contados e interpretados eletronicamente por um circuito de processamento de sinal. Cada pulso representa um pequeno deslocamento angular, sendo convertido em sinais elétricos ou digitais para determinar a posição ou velocidade do eixo rotativo. A resolução e precisão das medições dependem do número de marcas no disco, quanto maior, melhor a resolução (Tomazini e Albuquerque, 2020).

**Figura 14 – Disco para leitura da rotação pelo encoder**



Fonte: Almeida (2017)

**Figura 15 - Encoder**



Fonte: Aatoria própria (2023)

### 2.8.3 Dinamômetro

Um dinamômetro é um dispositivo utilizado para medir forças, e sua operação é baseada no princípio de que os corpos são elásticos, ou seja, eles se deformam sob a ação de forças de contato (Chaves, 2007). O dinamômetro utiliza uma mola como elemento sensor, que se alonga quando uma força de estiramento é aplicada. Esse fenômeno, conhecido como lei de Hooke, estabelece uma relação linear entre a força aplicada  $F$  e a elongação da mola  $\Delta L$ , expressa matematicamente por:

$$F = k \Delta L \quad (20)$$

Onde  $k$  é a constante da mola.

#### 2.8.4 Impressão 3D

A impressão 3D, ou fabricação aditiva, é uma tecnologia de manufatura que permite a criação de objetos tridimensionais adicionando material de forma sucessiva em camadas, a partir de diversos materiais, como o Biopolímero ácido poliláctico PLA e o acrilonitrila butadieno estireno ABS.

A representação do objeto a ser impresso é gerada através de um software CAD e posteriormente convertida em um arquivo *STeroLithography* STL ou *Additive Manufacturing Format* AMF os quais representam os modelos em forma de uma malha triangular e então podem ser impressos na impressora.

A vantagem da impressão 3D se dá na obtenção de protótipos com maior rapidez e economia se comparada aos outros processos de. Esse processo de manufatura aditiva permite a fabricação de geometrias complexas (Volpato *et.al*, 2018).

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Metodologia**

A abordagem metodológica adotada neste trabalho fundamenta-se em uma revisão bibliográfica, a qual compreende a busca, seleção e análise criteriosa de artigos, livros e outras fontes pertinentes à temática em questão. A revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de obter uma compreensão sobre o assunto relacionado a viscosidade e sua importância dentro da área da lubrificação, sobre as formas de se medir a viscosidade e sobre a seleção de dispositivos para obter a medição das variáveis envolvidas.

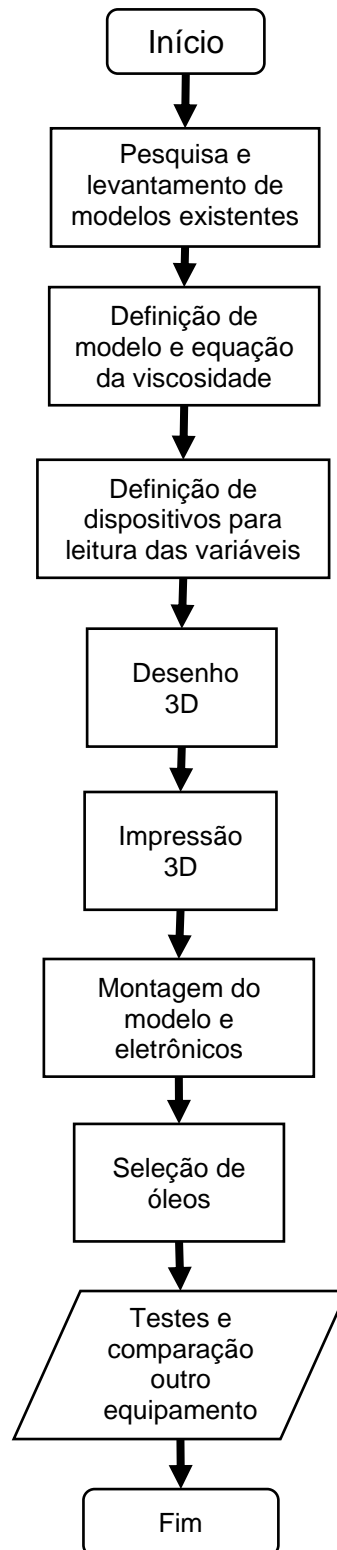
Nesse contexto, a natureza da pesquisa é caracterizada pela aplicação de uma abordagem quantitativa, visando a obtenção e análise de dados numéricos para a compreensão mais aprofundada do fenômeno em estudo. O objetivo da pesquisa, por sua vez, é prescritivo, concentrando-se em fornecer orientações para medição da viscosidade no contexto da lubrificação.

No tocante aos procedimentos técnicos, a pesquisa teórica foi predominantemente bibliográfica, enquanto a pesquisa prática envolveu a realização de experimentos em um ambiente de laboratório, permitindo a validação e aplicação dos conceitos teóricos na prática. Dessa forma, a combinação desses elementos metodológicos contribui para uma abordagem abrangente no estudo da viscosidade e suas implicações na área da lubrificação.

### **3.2 Sequência de fabricação do protótipo**

Para criação do protótipo, é fundamental seguir as etapas delineadas na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma de desenvolvimento do protótipo



Fonte: Autora própria (2023)

O protótipo deste trabalho segue o modelo de um viscosímetro rotacional de placas paralelas. Neste modelo, um disco gira enquanto o outro é submetido a um torque causado pelo arrasto viscoso do fluido. No contexto deste trabalho, o fluido em questão é um óleo lubrificante localizado entre os dois discos.

Para obtenção do valor de viscosidade é utilizado como base a Equação (19) onde reescrevendo alguns termos, tem-se:

$$\mu = \frac{2T\epsilon}{\pi\omega r^4} \quad (Pa.s) \quad (21)$$

Como o valor do torque  $T$  pode ser reescrito como o produto entre a força e a distância de aplicação da força  $F.r$ , tem-se:

$$\mu = \frac{2Fr\epsilon}{\pi\omega r^4} \quad (Pa.s) \quad (22)$$

Simplificando a equação em relação ao termo  $r$ :

$$\mu = \frac{2F\epsilon}{\pi\omega r^3} \quad (Pa.s) \quad (23)$$

Para obter os valores das variáveis da Equação (23) o protótipo conta com alguns dispositivos auxiliares. Abaixo é detalhado como o valor de cada variável é obtido.

$\epsilon$  é medido entre o disco fixo e o disco rotativo o qual é equivalente a espessura do filme de óleo lubrificante em metros.

$\omega$  é a rotação do disco rotativo medido pelo encoder com o auxílio do disco para enconder e o Arduino na unidade de Rad/s.

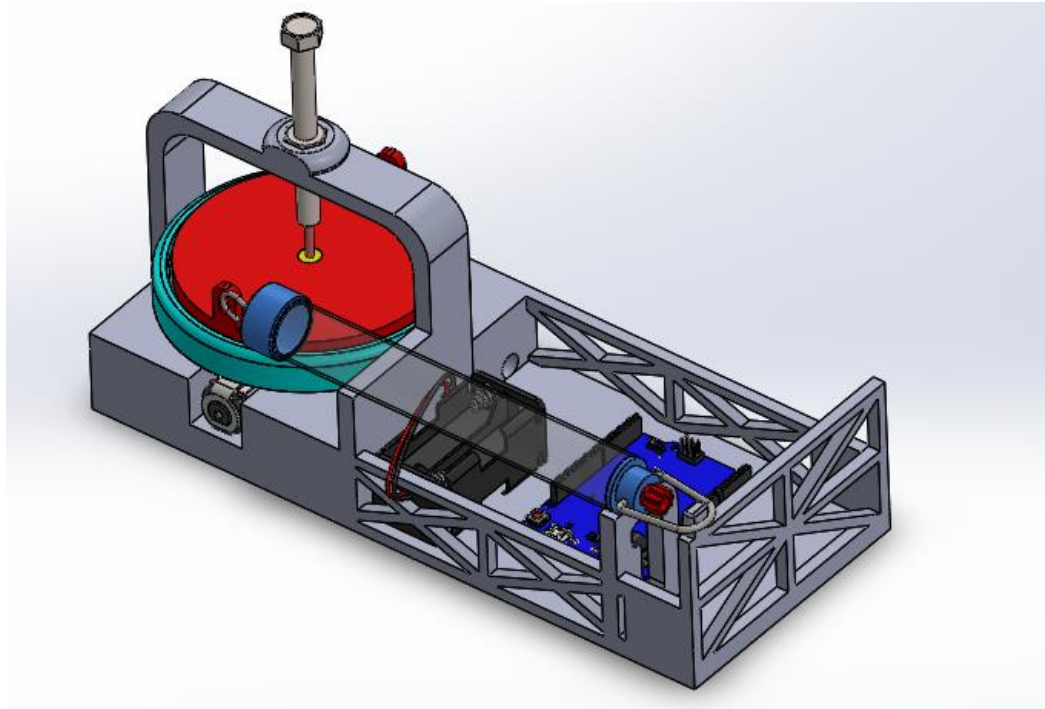
$r$  é o raio do disco fixo em metros.

$F$  é a força viscosa que faz o disco fixo rotacionar medida pelo dinamômetro em Newtons.

### 3.3 Modelagem 3D

Para modelagem 3D do protótipo foi utilizado o software SolidWorks 2022 com licença acadêmica e um computador pessoal, conforme pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Representação CAD do protótipo



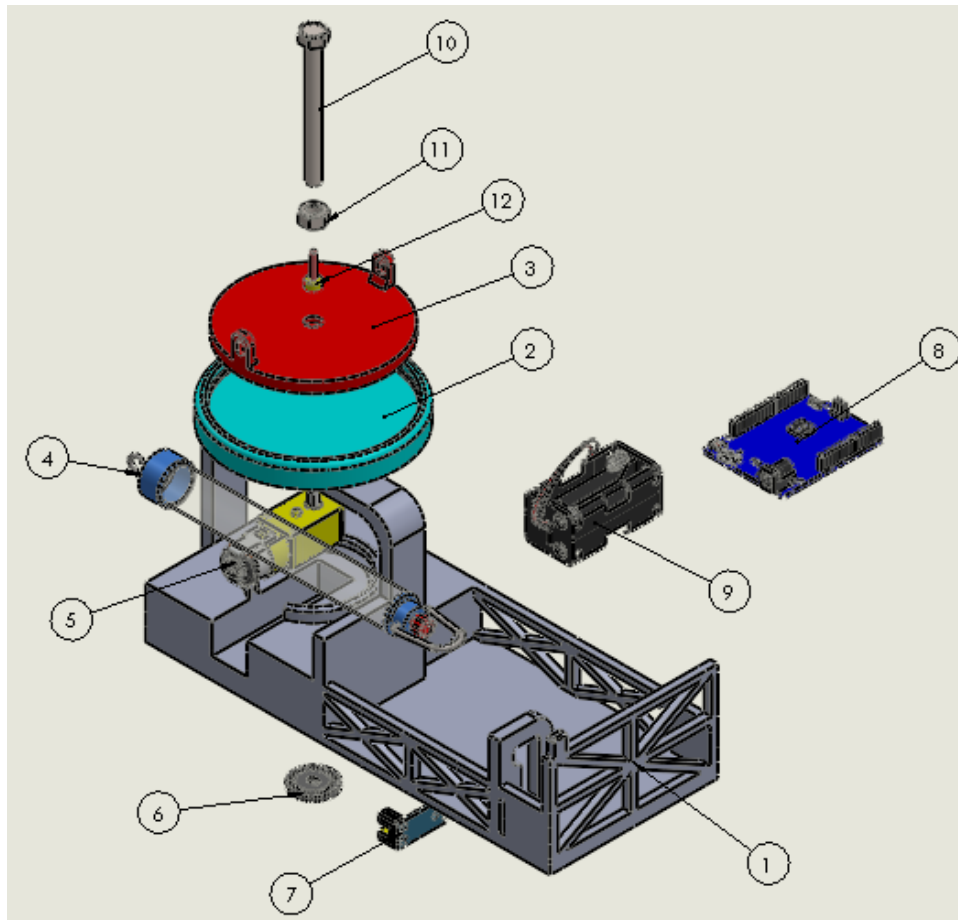
Fonte: Autoria própria (2023)

O modelo conta com uma base fixa para alocar o motor DC, dinamômetro e para alocar os dispositivos eletrônicos como o Arduino e o encoder os quais fazer a leitura da rotação do motor.

O disco rotativo está acoplado ao motor e serve para alocar os óleos lubrificantes submetidos aos testes de viscosidade. O disco que sofre o arrasto viscoso está preso a base fixa por meio de um parafuso para restringir a altura entre o disco e a base rotativa, um rolamento é fixado nele para que haja a liberdade de rotação onde o dinamômetro consegue fazer a leitura correta da força tangencial. A Figura 18 mostra a vista explodida com todos os elementos e o Quadro 1 descreve qual é o item de acordo com a numeração da Figura 18.



**Figura 18 - Vista explodida do protótipo**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Quadro 1 – Lista de componentes**

Item	Descrição	Quantidade	Código da peça
1	Base fixa	1	PV_001
2	Disco rotativo	1	PV_002
3	Disco fixo	1	PV_003
4	Dinamômetro	1	PV_004
5	Motor DC	1	PV_005
6	Disco de medição de rotação	1	PV_006
7	Encoder	1	PV_007
8	Arduino	1	PV_008
9	Suporte para pilhas	1	PV_009
10	Parafuso de fixação	1	PV_010
11	Porca	1	PV_011
12	Rolamento	1	PV_012

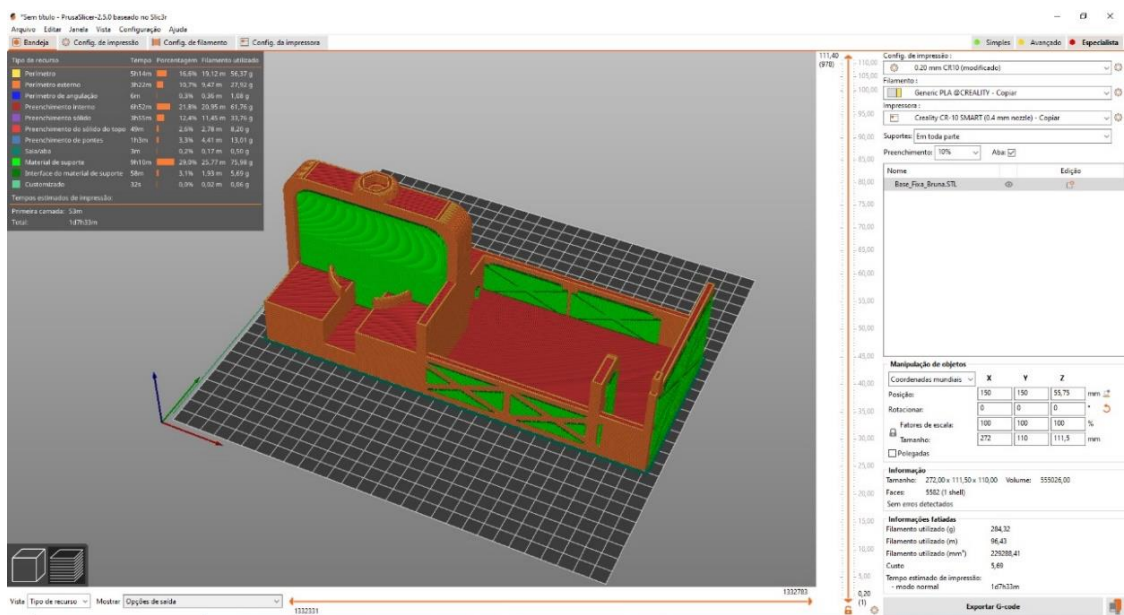
Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.4 Impressão 3D

Os componentes fabricados em impressão 3D correspondem a base fixa, a base rotativa e o disco, os quais podem ser vistos respectivamente na Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

A base fixa foi impressa em PLA na impressora Creatily CR-10 por cerca de 1 dia 7 horas e 33 minutos.

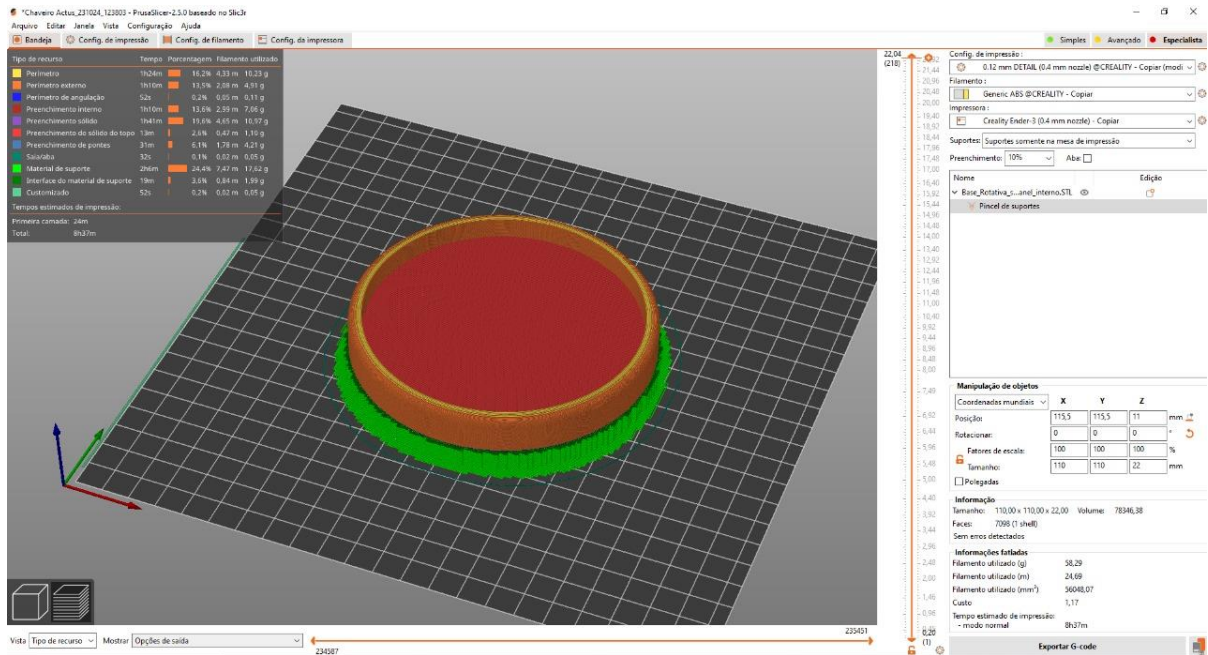
Figura 19 - Impressão 3D base fixa



Fonte: Autoria própria (2023)

A base rotativa da Figura 20 foi impressa em ABS na impressora Creatily Ender-3 por cerca de 8 horas e 37 minutos.

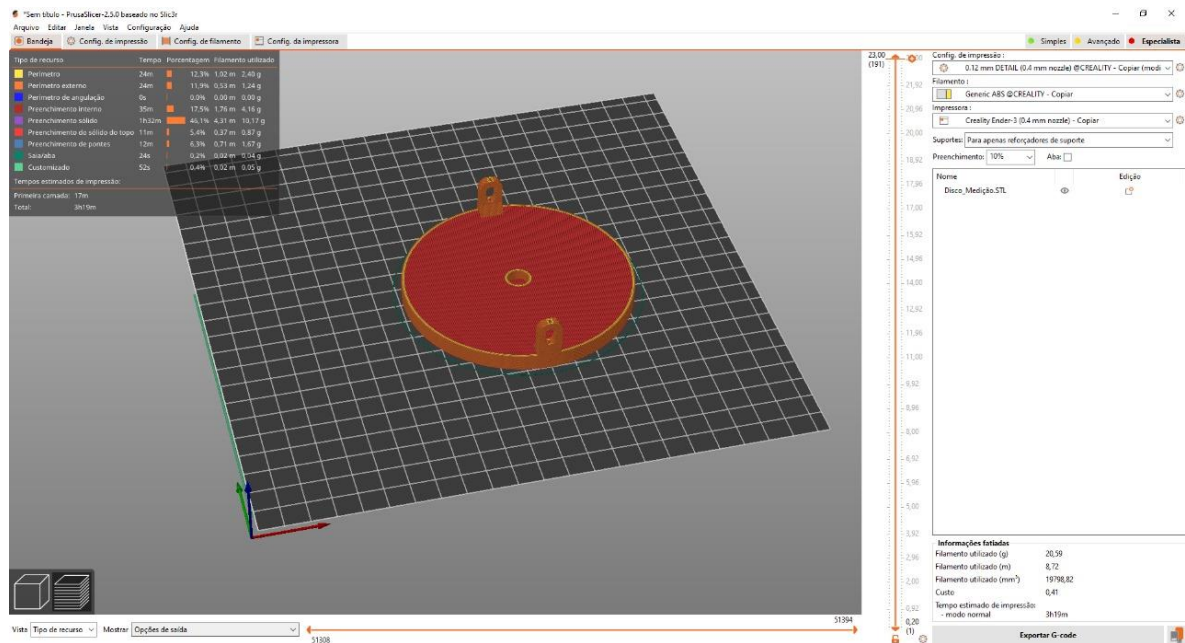
Figura 20 - Impressão 3D Base rotativa



Fonte: Autoria própria (2023)

O disco da Figura 21 foi impresso em ABS na impressora Creality Ender-3 por cerca de 3 horas e 19 minutos.

Figura 21 – Impressão 3D Disco

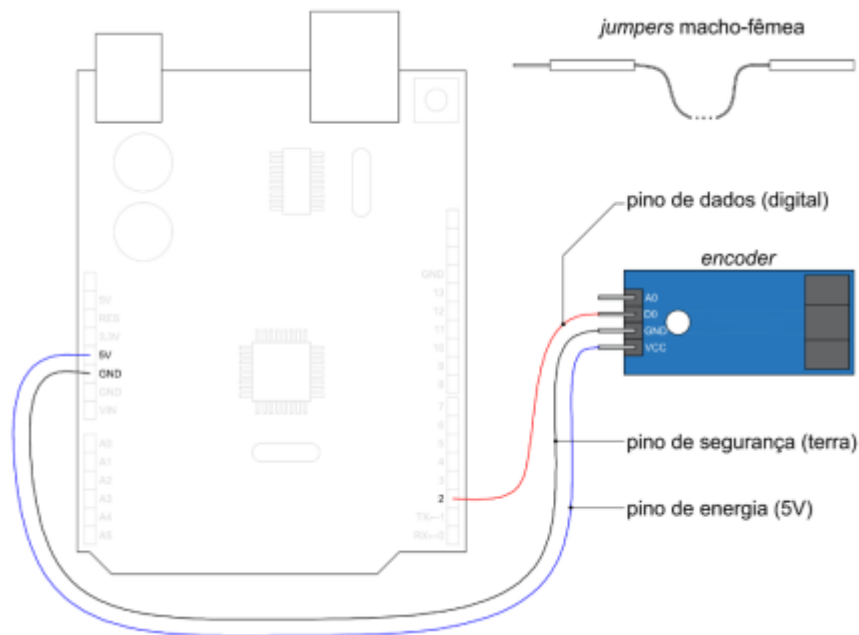


Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.5 Conexão eletrônica

Para leitura da rotação do disco rotativo é utilizado um Arduino Uno e um Encoder LM393 conforme esquema de ligação da Figura 22 e programação na IDE Arduino detalhada no Apêndice A.

Figura 22 - Conexão entre Arduino e Encoder



Fonte: Sampaio (2022)

### 3.6 Testes com reômetro

Com o objetivo de obter valores de viscosidade confiáveis foi realizado um ensaio com o reômetro MCR 92 da Anton Paar o qual pode ser visto na Figura 23. Neste ensaio foram utilizadas 5 amostras de óleos: 3 multiviscosos e 2 monoviscosos sendo eles o SAE 5W30, SAE 15W40, SAE 20W50, SAE 68 e SAE 90 estes mesmos óleos são ensaiados pelo dispositivo proposto neste trabalho.

**Figura 23 – Reômetro Anton Paar**



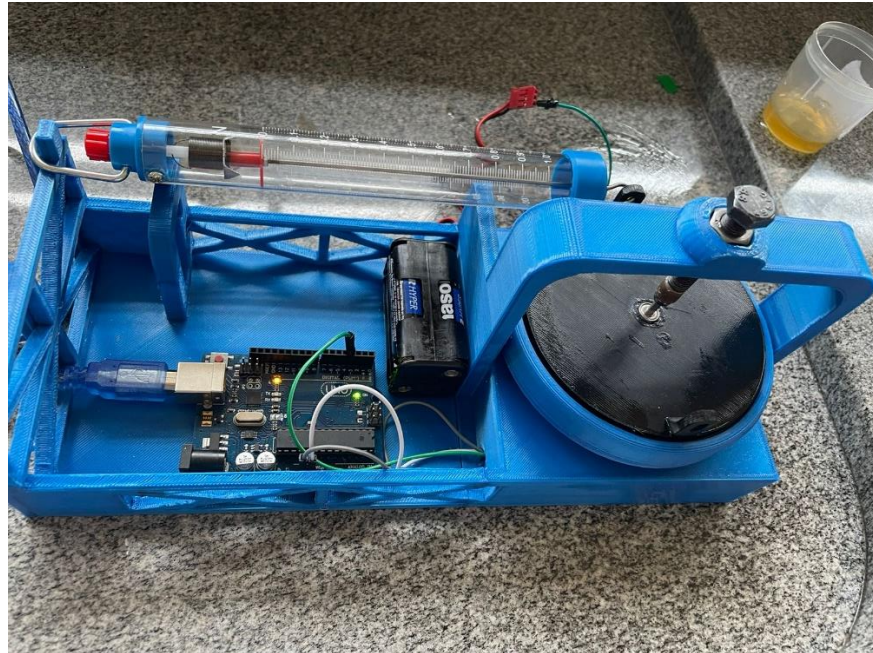
**Fonte: Autoria própria (2023)**

As amostras foram ensaiadas a temperatura de 40 °C onde o próprio reômetro faz o aquecimento e leitura da temperatura. O mecanismo do reômetro é parecido com o modelo de placas paralelas e por isso foi utilizado.

### **3.7 Testes com o viscosímetro proposto**

Os testes foram realizados com o protótipo da Figura 24 em um laboratório da UTFPR.

**Figura 24 - Protótipo**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Para o aquecimento dos óleos foi utilizada uma estufa modelo TE-394/1 TECNAL a qual pode ser vista na Figura 25 e Figura 26.

**Figura 25 - Estufa**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

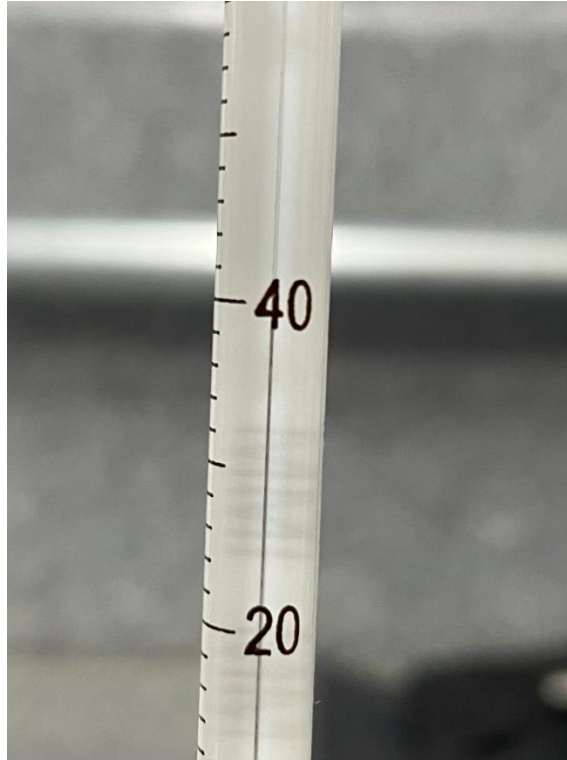
**Figura 26 – Aquecimento dos óleos**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Todas as amostras de óleos foram aquecidas a temperatura de 40° C, como mostra a Figura 27, mesma temperatura utilizada no reômetro para que possa haver a comparação.

**Figura 27 – Leitura da temperatura**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

Em seguida, o óleo é transferido para a base rotativa, onde o disco de medição é rosqueado até estabelecer contato com a superfície do óleo. Posteriormente, o motor é acionado, e a leitura de força é exibida pelo dinamômetro, enquanto a rotação é capturada pelo encoder e transmitida ao Arduino. Isso viabiliza a visualização dos dados através do Monitor Serial no computador.

Para obter o valor de viscosidade é utilizado a Equação (23) onde o valor da espessura da camada de óleo é  $\epsilon = 0,003 \text{ m}$  e o raio do disco de medição é  $r = 0,048 \text{ m}$ . O Valor da força  $F$  é obtida pelo dinamômetro. Como o valor de rotação ( $\omega$ ) é obtido em Rotações Por Minuto RPM ele precisa ser transformado para Rad/s utilizando a equivalência:

$$RPM = \frac{2\pi}{60} \text{ rad/s} \quad (24)$$



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultado dos testes com o reômetro

A Tabela 1 mostra os resultados de viscosidade obtidos para o óleo 5W30.

**Tabela 1- Resultados reômetro para o óleo 5W30**

5W30					
N° Leituras	Taxa de Cisalhamento (1/s)	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa·s)	Temperatura (°C)	Torque (mN·m)
1	0,1	0,0073	0,0732	40,01	0,0003
2	0,22	0,0151	0,0699	40,01	0,0006
3	0,46	0,0316	0,0682	40,01	0,0012
4	1,00	0,0615	0,0615	40,01	0,0023
5	2,15	0,1327	0,0616	40,02	0,0049
6	4,64	0,2821	0,0608	40,02	0,0104
7	10,0	0,6100	0,0610	40,03	0,0224
8	21,5	1,3046	0,0606	40,03	0,0479
9	46,4	2,8039	0,0604	40,04	0,1030
10	100	5,9813	0,0598	40,05	0,2197

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 2 mostra os resultados de viscosidade obtidos para o óleo 15W40.

**Tabela 2 - Resultados reômetro para o óleo 15W40**

15W40					
N° Leituras	Taxa de Cisalhamento (1/s)	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa·s)	Temperatura (°C)	Torque (mN·m)
1	0,10	0,0137	0,1366	40,01	0,0005
2	0,22	0,0270	0,1253	40,01	0,0010
3	0,46	0,0542	0,1167	40,01	0,0020
4	1,00	0,1046	0,1046	40,01	0,0038
5	2,15	0,2251	0,1045	40,01	0,0083
6	4,64	0,4731	0,1019	40,01	0,0174
7	10,00	1,0078	0,1008	40,02	0,0370
8	21,50	2,1266	0,0987	40,02	0,0781
9	46,40	4,4978	0,0969	40,02	0,1652
10	100,00	9,4369	0,0944	40,02	0,3466

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 3 mostra os resultados de viscosidade obtidos para o óleo 20W50.

Tabela 3 - Resultados reômetro para o óleo 20W50

<b>20W50</b>					
N° Leituras	Taxa de Cisalhamento (1/s)	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa·s)	Temperatura (°C)	Torque (mN·m)
1	0,10	0,0139	0,1388	40,01	0,0005
2	0,22	0,0315	0,1462	40,01	0,0012
3	0,46	0,0670	0,1443	40,01	0,0025
4	1,00	0,1491	0,1491	40,01	0,0055
5	2,15	0,3152	0,1463	40,01	0,0116
6	4,64	0,6713	0,1446	40,01	0,0247
7	10,00	1,4233	0,1423	40,01	0,0523
8	21,50	3,0278	0,1405	40,02	0,1112
9	46,40	6,4337	0,1386	40,02	0,2363
10	100,00	13,4670	0,1347	40,03	0,4947

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 4 mostra os resultados de viscosidade obtidos para o óleo SAE68.

Tabela 4 – Resultados reômetro para o óleo SAE 68

<b>SAE 68</b>					
N° Leituras	Taxa de Cisalhamento (1/s)	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa·s)	Temperatura (°C)	Torque (mN·m)
1	0,1	0,0028	0,0282	39,9	0,0001
2	0,22	0,0087	0,0402	39,9	0,0003
3	0,46	0,0201	0,0433	39,9	0,0007
4	1	0,05	0,05	39,92	0,0018
5	2,15	0,114	0,0529	39,93	0,0042
6	4,64	0,2555	0,055	39,95	0,0094
7	10	0,5406	0,0541	39,97	0,0199
8	21,5	1,1622	0,0539	39,99	0,0427
9	46,4	2,4956	0,0538	40,01	0,0917
10	100	5,3687	0,0537	40,03	0,1972

Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 5 mostra os resultados de viscosidade obtidos para o óleo SAE 90.

Tabela 5 - Resultados reômetro para o óleo SAE 90

<b>SAE 90</b>					
N° Leituras	Taxa de Cisalhamento (1/s)	Tensão de Cisalhamento (Pa)	Viscosidade (Pa·s)	Temperatura (°C)	Torque (mN·m)
1	0,10	0,0203	0,2031	40,04	0,0007
2	0,22	0,0456	0,2115	40,03	0,0017
3	0,46	0,0969	0,2088	40,02	0,0036
4	1,00	0,2006	0,2006	40,02	0,0074
5	2,15	0,4381	0,2034	40,02	0,0161
6	4,64	0,9354	0,2015	40,01	0,0344
7	10,00	2,0044	0,2004	40,01	0,0736
8	21,50	4,2996	0,1996	40,01	0,1579
9	46,40	9,1683	0,1975	40,02	0,3368
10	100,00	19,2670	0,1927	40,02	0,7077

Fonte: Autoria própria (2023)

#### 4.2 Resultados dos testes com o protótipo

Os resultados obtidos pelo protótipo contemplam a leitura de rotação fornecida pelo Monitor Serial do Arduino, os resultados de força fornecidos pelo dinamômetro e a viscosidade obtida utilizando a Equação (23).

Os resultados das leituras realizadas pelo dispositivo e o valor de viscosidade para o óleo 15W40 podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6- Resultados protótipo para o óleo 15W40

<b>15W40 a 40°C</b>			
N° Leituras	Rotação (RPM)	Força (N)	Viscosidade (Pa·s)
1	177	0,15	0,139
2	172	0,14	0,134
3	173	0,19	0,181

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados das leituras realizadas pelo dispositivo e o valor de viscosidade para o óleo 20W50 podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7- Resultados protótipo para o óleo 20W50

<b>20W50 a 40°C</b>			
N° Leituras	Rotação (RPM)	Força (N)	Viscosidade (Pa·s)
1	210	0,25	0,196

(continua)

N° Leituras	Rotação (RPM)	Força (N)	(conclusão)
			Viscosidade (Pa.s)
2	195	0,24	0,202
3	190	0,23	0,199

Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados das leituras realizadas pelo dispositivo e o valor de viscosidade para o óleo SAE 90 podem ser observados na Tabela 8.

**Tabela 8- Resultados protótipo para o óleo SAE 90**

SAE 90 a 40°C			
N° Leituras	Rotação (RPM)	Força (N)	Viscosidade (Pa.s)
1	185	0,32	0,285
2	168	0,27	0,265
3	152	0,26	0,282

Fonte: Autoria própria (2023).

Quanto aos resultados dos óleos 5W30 e SAE 68 não se mostrou satisfatório, houve uma imprecisão na medição da força a qual variava durante o experimento. Acredita-se que isso ocorreu pela baixa viscosidade desses óleos se comparado aos outros nessa mesma temperatura.

Ao analisar a comparação entre os resultados do reômetro e do protótipo na Tabela 9, constata-se que o protótipo exibe um erro aproximado de 40%. Este desvio pode ser atribuído a diversos fatores, incluindo a escolha do processo de fabricação, ou seja, a impressão 3D, que, neste caso, não proporcionou a precisão dimensional necessária, contribuindo para o desequilíbrio na base rotativa. Além disso, o sistema de ajuste de altura através do parafuso não assegura uma regulagem precisa, e a imprecisão na impressão 3D, juntamente com a colagem entre o parafuso e o disco, resultaram em falta de concentricidade entre o disco de medição e a base rotativa.

**Tabela 9 – Comparação das viscosidades médias entre reômetro e protótipo**

	Viscosidade média		
	Reômetro	Protótipo	Erro em %
	Viscosidade (Pa.s)	Viscosidade (Pa.s)	
15W40	0,108	0,151	39,8
20W50	0,142	0,199	40,1
SAE 90	0,201	0,277	37,8

Fonte: Autoria própria (2023)

Outro fator que contribui para o erro é o efeito da força centrífuga, pelo qual o óleo é deslocado em direção à borda, deixando o centro desprovido de óleo. Isso resulta em um contato reduzido entre os discos, ocorrendo principalmente nas extremidades. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 28.

**Figura 28 – Efeito da força centrífuga**



**Fonte: Autoria própria (2023)**

## 5 CONCLUSÃO

Apesar da existência do erro, o dispositivo consegue fazer a leitura da força viscosa e da rotação, evidenciando assim a diferença nos valores de viscosidade entre os diferentes tipos de óleo. Essa capacidade de distinguir as características viscosas dos óleos indica o potencial do dispositivo como uma ferramenta útil para análises comparativas, podendo ser usado pelos alunos de forma didática para compreender as nuances do grau de viscosidade entre os óleos lubrificantes.

Portanto, o presente trabalho cumpre com seu objetivo geral, o qual era desenvolver um dispositivo para a determinação da viscosidade de óleos lubrificantes, e para que isso se tornasse possível, precisou também cumprir com os objetivos específicos os quais incluem a relação entre lubrificação e viscosidade, destacando os fatores influenciadores e proporcionando a base teórica necessária para o desenvolvimento do dispositivo proposto.

A identificação dos principais modelos de equipamentos de mensuração de viscosidade existentes foi efetuada por meio de uma revisão a qual permitiu a adaptação do modelo escolhido ao escopo do projeto. A definição conceitual do modelo escolhido e a apresentação das equações relevantes para a determinação da viscosidade foram abordadas estabelecendo a fundamentação teórica essencial.

A elaboração do protótipo em 3D utilizando o software SolidWorks foi executada, proporcionando um modelo tridimensional o qual serviu para possibilitar a impressão 3D. A escolha dos dispositivos auxiliares para a leitura das variáveis assegurou a leitura dos dados obtidos pelo dispositivo principal. A obtenção do modelo físico do protótipo por meio da impressão 3D e a subsequente montagem dos dispositivos auxiliares resultou em um dispositivo pronto para análises de viscosidade.

Os testes comparativos evidenciaram a consistência dos resultados em relação ao outro equipamento validado, fortalecendo a aplicabilidade do dispositivo proposto.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fernanda. O que é Encoder? Para que serve? Como escolher? Como interfacear? **HI Tecnologia**, 2017. Disponível em: <<https://materiais.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>>. Acesso em: 18 de out. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10441: **Produtos de petróleo — líquidos transparentes e opacos — determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica**. Rio de Janeiro, p. 2. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5849: **Tintas — determinação de viscosidade pelo copo ford**. Rio de Janeiro, 2015.

ATKINS, P. W.; JULIO DE PAULA. **Physical chemistry**. New York: W.H. Freeman, 2006.

BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Mecânica dos fluidos: noções e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

BRASIL. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Superior. **Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019**. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 abr. 2019. Seção 1, p. 5.

CARMO, Mariana Ribeiro do. **Influência dos parâmetros de operação e de propriedades dos lubrificantes nas condições de lubrificação em geometria quatro-esferas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CARRETEIRO, Ronald P., BELMIRO, Pedro Nelson A. **Lubrificantes & Lubrificação Industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012. E-book. ISBN 9788580554915. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580554915/>. Acesso em: 13 nov. 2023.

CHAVES, Alaor. **Física Básica-Mecânica**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2007. E-book. ISBN 978-85-216-1932-1. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-1932-1/>. Acesso em: 23 out. 2023.

EDUCAÇÃO, S. **Pirâmide da aprendizagem: conheça a teoria de William Glasser**. Disponível em: <<https://blog.saraivaeducacao.com.br/piramide-da-aprendizagem/>>. Acesso em: 13 de junho de 2023.

GROSH, Mihir Kumar, MAJUMDAR, Bankim Chandra, SARANGI, Mihir. **Theory of lubrication**. New Dheli: McGraw Hill. 2013.

MANG, Theo, DRESEL, Wilfried. **Lubricants and lubrication**. 2. ed. Weinheim, Germany: Wiley-Vch, 2007. DOI: 10.1002/9783527610341  
MCROBERTS, Michael. **Arduino básico**. 4. ed. São Paulo: Novatec Editora Ltda., 2011.

PIMENTEL, Alessandra. **A teoria da aprendizagem experiencial como alicerce de estudos sobre desenvolvimento profissional**. Estudos de Psicologia (Natal) [online]. (2007); 12(2): 159-168. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-294X2007000200008>>. Acesso em: 16 jun. 2023.  
Apud OLIVEIRA-FORMOSINHO, J. **O desenvolvimento profissional das educadoras de infância: entre os saberes e os afetos, entre a sala e o mundo**. In: MACHADO, M. L. de A. (Org.). Encontros e desencontros em educação infantil. São Paulo: Cortez, 2002. p. 133-167.

SABINO, Edson Ricardo Calado; DIAS, Túlio Albuquerque; LIMA, José Roberto Tavares de. **Aproximação entre Teoria e Prática através da Criação de um Ambiente Experimental para a Disciplina de Proteção de Sistemas**. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/676>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

SAMPAIO, José Jailson de Oliveira. **Desenvolvimento e Avaliação de Protótipo de Viscosímetro Rotacional de Baixo Custo Baseado em Impressão 3D e Arduino**. Orientador: Sandro Vagner de Lima. 2022. 103f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/69918>. Acesso em: 17 de ago. 2023.

SILVA, Arlindo; RIBEIRO, Carlos T.; DIAS, João; SOUSA, Luís. **Desenho Técnico Moderno**, 4ª edição. Grupo GEN, 2006. E-book. ISBN 978-85-216-2739-5. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2739-5/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

SILVA, Rodrigo Ernesto Andrade et al. **Determinação da viscosidade cinemática por método de Stokes através de estudo e desenvolvimento de viscosímetro automatizado**. In: CONAPESC, 3., 2018, João Pessoa. Anais do CONAPESC, João Pessoa, 2018.

SOUZA, Alessandra Cardosina de. **A experimentação no ensino de ciências: importância das aulas práticas no processo de ensino aprendizagem**. Monografia de Especialização. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Especialização em Educação: Métodos e Técnicas de Ensino. Medianeira, 2013.

SPLABOR. **O que é um Copo Ford? Qual a sua função e utilização**. Disponível em: <https://www.splabor.com.br/blog/viscosimetros-2/o-que-e-um-copo-ford-qual-a-sua-funcao-e-utilizacao/>. Acesso em: 15 de out. 2023.



THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2020.

VIANA, J. **Pirâmide de Aprendizagem de William Glasser**. Disponível em: <<https://keeps.com.br/piramide-de-aprendizagem-de-william-glasser-conceito-e-estrutura/>>. Acesso em: 13 jun. 2023.

VOLPATO, Neri et al. **Manufatura Aditiva: Tecnologia e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. ISBN 978-85-212-1151-8

## APÊNDICE A – Código para medição de rotação

```
//Medidor de rotação
volatile int cont = 0;
int voltas = 0;
void setup() {
  pinMode(3, INPUT);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), interrupcao, RISING);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(" - Inicio - ");
}
void loop() {
  delay(1000);
  detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3));
  voltas = ((cont/20)*60);
  Serial.print("RPM = ");
  Serial.println(voltas);

  cont = 0;
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), interrupcao, RISING);
}

void interrupcao(){
  cont++;
}
```