



C A P Í T U L O 9

PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DE VISCOSIDADE EM ÓLEOS LUBRIFICANTES

Bruna Camila Schwab

Engenheiro Mecânico/UTFPR - Guarapuava - PR - Brasil
UTFPR – Campus Guarapuava, PR, Brasil

Luiz Fernando Rigatti

Professor da COEMT-GP/UTFPR - Guarapuava - PR – Brasil
UTFPR – Campus Guarapuava, PR, Brasil

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 Carretero 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.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aprendizagem Experimental

O dispositivo de análise da viscosidade de óleos lubrificantes tem como objetivo auxiliar nas aulas práticas, permitindo que os alunos testem hipóteses e consolidem o conteúdo aprendido em aulas teóricas. Pimentel (2007) destaca que a experimentação é essencial para conectar teoria e prática, promovendo o desenvolvimento profissional.

As Diretrizes Curriculares Nacionais dos cursos de Engenharia (Brasil, 2019) exigem atividades práticas e de laboratório em disciplinas básicas e específicas, com destaque para Física, Química e Informática. A prática permite ao aluno compreender o comportamento dos objetos, testar hipóteses, desenvolver habilidades e conectar teoria com a realidade, tornando a aprendizagem mais significativa.

2.2 Lubrificação

Almeida (2017) define lubrificação como a inserção de um lubrificante entre superfícies para reduzir o atrito e evitar falhas, superaquecimento e desgaste de componentes. Óleos derivados do petróleo são amplamente utilizados na indústria por sua capacidade de formar uma película lubrificante.

Almeida (2017) classifica a lubrificação em dois tipos:

- █ **Lubrificação limite:** película fina ($\sim 10 \mu\text{m}$), entre atrito seco e lubrificação plena.
- █ **Lubrificação hidrodinâmica:** película espessa (0,025 a 0,25 mm), dependendo de variáveis como viscosidade e carga.

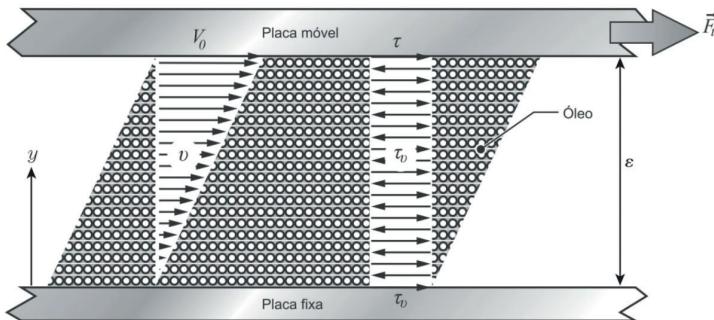
A espessura adequada da película lubrificante depende da viscosidade correta, considerada a propriedade mais importante para especificar um lubrificante (Totten, 2006).

2.3 Viscosidade

De acordo com a NBR 10441:2014 e Carretero & Belmiro (2006), a viscosidade dinâmica é a resistência do fluido ao cisalhamento, definida pela relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade. Bistafa (2017) ilustra com a Figura 1 o escoamento entre placas paralelas, onde a viscosidade é calculada pela Equação (1):

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

Figura 1 - Lei do escoamento de fluido viscoso entre placas paralelas



Fonte: Bistafa (2018)

A viscosidade é expressa em Pascal-segundos (Pa.s) ou centipoise (cP).

2.4 Influência da Temperatura e Pressão na Viscosidade

Wen e Huang (2017) explicam que com o aumento da temperatura, o movimento molecular se intensifica e a viscosidade dos líquidos diminui.

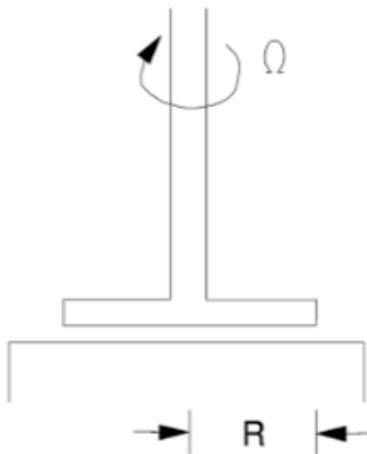
Já a pressão tem o efeito oposto: ao aumentar a pressão, as moléculas se aproximam e a viscosidade cresce.

2.5 Medição da Viscosidade

A viscosidade pode ser medida por diferentes viscosímetros, que utilizam princípios distintos:

- **Copo Ford:** mede o tempo de escoamento de um fluido.
- **Ostwald:** mede o tempo de escoamento em tubo capilar com base na equação de Poiseuille.
- **Esfera (Stokes):** mede o tempo de queda de uma esfera em fluido, calculando a viscosidade pela Lei de Stokes.
- **Saybolt:** mede o tempo para escoar 60 cm³ de fluido, resultado em unidades SSU (Segundo Saybolt Universal).
- **Rotacionais:** mede a viscosidade pela resistência ao cisalhamento entre superfícies em movimento relativo, como cone e placa, placas paralelas ou cilindros concêntricos. O fluido fica entre essas superfícies, uma delas rotaciona e a viscosidade é calculada a partir do torque necessário para manter a rotação. Conforme a Figura 2.

Figura 2 – Viscosímetro Placas Paralelas



Fonte: Steffe (1992)

Para medições precisas, o fluido deve ser incompressível, com propriedades constantes sob pressão, temperatura controlada e aderência total às paredes (sem deslizamento). Levando em consideração a hipótese descrita de Sampaio (2022) e isolando μ tem-se a equação da viscosidade.

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

Onde T é o torque, h' é a espessura da camada de fluido, ω é a rotação, Ri é o raio interno.

2.6 Ferramentas para Desenvolvimento do Dispositivo

O projeto fez uso de diversas ferramentas:

- █ **CAD (Desenho Assistido por Computador):** utilizado para elaborar modelos 2D e 3D do dispositivo. A modelagem 3D permite testes de resistência estrutural e térmica.
- █ **Arduino:** plataforma de prototipagem eletrônica que permite controle de sensores e atuadores. O código é programado via ambiente IDE e transferido por cabo USB.

- **Encoder:** sensor óptico que mede posição e velocidade de eixos rotativos a partir de pulsos gerados por um disco com marcações.
- **Dinamômetro:** mede força com base na deformação de uma mola, segundo a Lei de Hooke dada pela Equação 3.

$$F = k\Delta L \quad (3)$$

- **Impressão 3D:** permite a fabricação rápida e econômica de protótipos a partir de arquivos CAD, utilizando materiais como PLA e ABS. As peças são impressas em camadas com geometrias complexas.

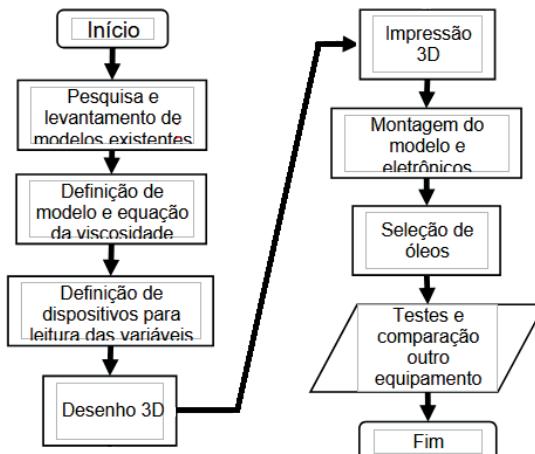
3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia baseou-se em revisão bibliográfica, com busca, seleção e análise de fontes sobre viscosidade, sua importância na lubrificação, métodos de medição e escolha de dispositivos para coleta de variáveis. A pesquisa teve caráter quantitativo, visando analisar dados numéricos e fornecer orientações para a medição da viscosidade. Tecnicamente, envolveu pesquisa teórica bibliográfica e experimentos laboratoriais para validar e aplicar conceitos, resultando em uma abordagem integrada entre teoria e prática.

3.1 Sequência de fabricação do protótipo

Para criação do protótipo, é fundamental seguir as etapas delineadas na Figura 3.

Figura 3 – 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 2 onde reescrevendo alguns termos, tem-se:

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

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

$$\mu = \frac{2Fr\epsilon}{\pi\omega r^4} (Pa \cdot s) \quad (3)$$

Simplificando a equação em relação ao termo r :

$$\mu = \frac{2F\epsilon}{\pi\omega r^3} (Pa \cdot s) \quad (4)$$

Para obter os valores das variáveis da Equação (4) o protótipo conta com alguns dispositivos auxiliares. Abaixo é detalhado como o valor de cada variável é obtido.

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

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

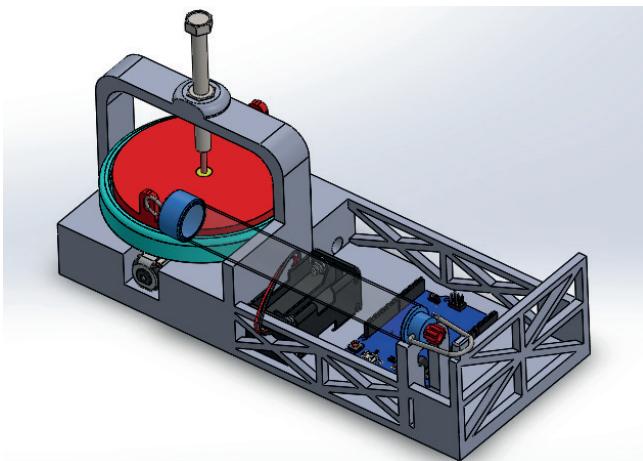
r é o raio do disco fixo em metros.

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

3.2 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 4.

Figura 4 - Representação CAD do protótipo

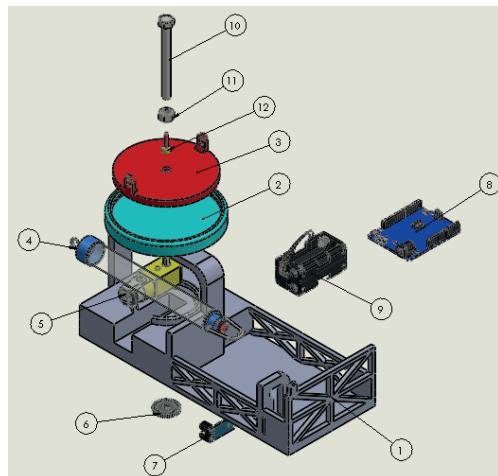


Fonte: Autoria própria (2023)

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 5 mostra a vista explodida com todos os elementos.

Figura 5 - Vista explodida do protótipo



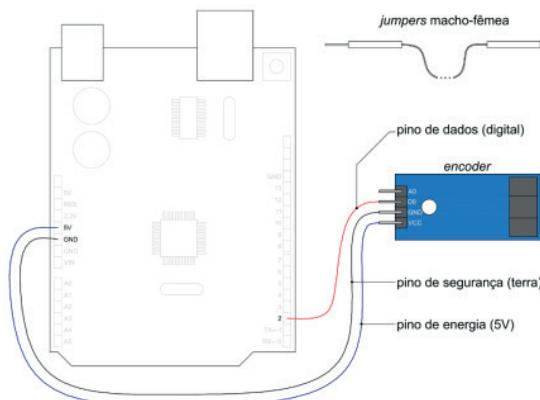
Fonte: Autoria própria (2023)

3.3 Impressão 3D e Conexão eletrônica

Os componentes fabricados em impressão 3D correspondem a base fixa, a base rotativa e o disco, com cerca de 42 horas de impressão.

Para leitura da rotação do disco rotativo é utilizado um Arduino Uno e um Enconder LM393 conforme esquema de ligação da Figura 6 e programação na IDE Arduino.

Figura 6 - Conexão entre Arduino e Encoder



Fonte: Sampaio (2022)

3.4 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 7. 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 7 – Reômetro Anton Paar



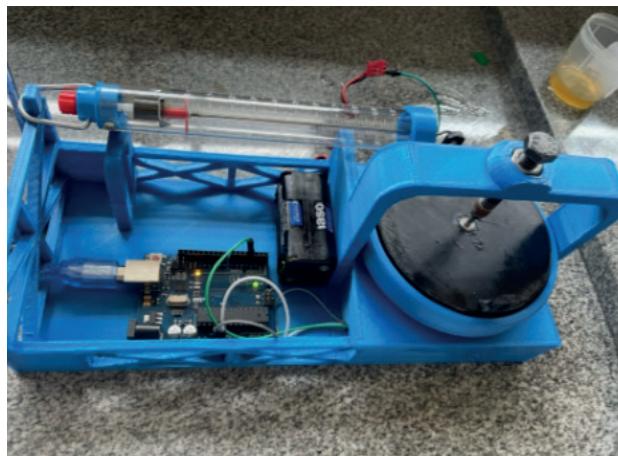
Fonte: Autoria própria (2023)

As amostras foram ensaiadas a temperatura de 40 °C onde o próprio reômetro faz o aquecimento e leitura da temperatura.

3.5 Testes com o viscosímetro proposto

Os testes foram realizados com o protótipo da Figura 8 em um laboratório da UTFPR.

Figura 8 – Protótipo



Fonte: Autoria própria (2023)

Para o aquecimento dos óleos foi utilizada uma estufa modelo TE-394/1 TECNAL.

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

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

$$RPM = \frac{2\pi}{60} rad/s \quad (5)$$

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					
Nº 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)

O mesmo procedimento foi feito utilizando o reômetro nos óleos 15W40, 20W50, SAE68 e o óleo SAE90.

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 (4). Os resultados das leituras realizadas pelo dispositivo e o valor de viscosidade para o óleo 15W40 podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados protótipo para o óleo 15W40

15W40 a 40°C			
Nº 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)

O mesmo procedimento foi feito utilizando o protótipo nos óleos 15W40, 20W50, SAE68 e o óleo SAE90. 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 3 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 3 – Comparação das viscosidades médias entre reômetro e protótipo

Viscosidade média			
Reômetro	Protótipo		
Viscosidade (Pa.s)	Viscosidade (Pa.s)	Erro em %	
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 8.

Figura 8 – 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.

BISTAFÁ, 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: Interciênciia, 2006.

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 experencial 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.

RIBEIRO DO CARMO, Mariana. **Influência dos parâmetros de operação e de propriedades dos lubrificantes nas condições de lubrificação em geometria quatro-esferas.** 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

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.

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.

STEFFE, J. F. **Rheological methods in food process engineering.** 2. ed. East Lansing, MI: Freeman Press, 1996. ISBN 0-9632036-1-4.

TOTTEN, G. E. **Handbook of lubrication and tribology: volume I – application and maintenance.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

WEN, S.; HUANG, P. **Principles of Tribology.** 2. ed. Singapura: Wiley, 2017. 608 p. ISBN 978-1-119-21489-2.