

MURILO MARCHI PEREIRA

**PROPOSTA DE UM TRANSDUTOR CAPACITIVO
PARA MEDIÇÃO DA ESPESSURA DO FILME DE
ÓLEO LUBRIFICANTE EM ENSAIO DE DESGASTE
POR DESLIZAMENTO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
UBERLÂNDIA**

2023

MURILO MARCHI PEREIRA

PROPOSTA DE UM TRANSDUTOR CAPACITIVO PARA MEDIÇÃO DA ESPESSURA DO FILME DE ÓLEO LUBRIFICANTE EM ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior
Universidade Federal de Uberlândia.

Prof. MSc. Alessandro Augusto Olimpio
Ferreira Vittorino
Universidade Federal de Uberlândia.

Prof. Dr. Túlio Morini Vieira Alves Rodrigue
Universidade Federal de Uberlândia.

UBERLÂNDIA – MG

2023



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecatrônica				
Defesa de:	FEMEC42100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	08/12/2023	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:30
Matrícula do Discente:	11521EMT005				
Nome do Discente:	Murilo Marchi Pereira				
Título do Trabalho:	Proposta de um transdutor capacitivo para medição da espessura do filme de óleo lubrificante em ensaio de desgaste por deslizamento				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não				

Reuniu-se de forma remota, através da Plataforma Digital Zoom (<https://www.google.com/url?q=https://us02web.zoom.us/j/83712262495?pwd%3DV3lvckhZOVgxaWJXZ2hhbXB3WUVHUT09&sa=D&source=calendar&usd=2&usg=AOvVaw32djozXhGnturX2LoMoz4U>), a Banca Examinadora, designada pelo docente orientador, assim composta: Prof. Dr. Túlio Morini Vieira Alves Rodrigues - FATRA Ensino Superior; Eng. M.Sc. Alessandro Augusto Olimpio Ferreira Vittorino - Doutorando/FEMEC/UFU; e Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, e concedeu ao estudante a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do estudante e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Túlio Miorini Vieira Alves Rodrigues, Usuário Externo**, em 08/12/2023, às 15:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alessandro Augusto Olimpio Ferreira Vittorino, Usuário Externo**, em 08/12/2023, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/12/2023, às 15:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5021990** e o código CRC **A13B721F**.

“As coisas corajosas nas velhas histórias e canções, Sr. Frodo: aventuras como eu costumava chamá-las. Eu costumava pensar que eram coisas que a gente maravilhosa das histórias saía para procurar porque queriam elas, porque elas eram emocionantes, e a vida um pouquinho tediosa, uma espécie de esporte, poderíamos dizer. Mas esse não é o jeito das histórias que realmente importavam, nem das que ficam na lembrança. Normalmente parece que as pessoas simplesmente caíram dentro delas – os percursos delas foram traçados assim, como o senhor expressou. Mas acho que elas tiveram montes de oportunidades, assim como nós, de darem meia volta, só que não deram. E se tivessem dado, nós não iríamos saber, porque eles seriam esquecidos. Nós ouvimos falar dos que simplesmente foram em frente...”

J. R. R. Tolkien, O Senhor dos Anéis: As Duas Torres

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus que me concedeu a sabedoria e a perseverança para concluir este curso, apesar de todos os desafios e dificuldades.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica, ao curso de Engenharia Mecatrônica e todos os seus professores, por toda estrutura física e pelo conhecimento que foi transmitido ao longo desta graduação, que foram indispensáveis para a minha formação profissional como engenheiro mecatrônico.

Agradeço aos meu orientador, Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior, por seu auxílio, por me aceitar como seu orientado e por acreditar no meu potencial desde o princípio. E ao Prof. MSc. Alessandro Augusto Olimpio Ferreira Vittorino, pelo fundamental suporte ao longo do desenvolvimento deste projeto de final de curso.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas de faculdade pelos momentos que passamos juntos, pelo companheirismo ao longo do curso, pelos conhecimentos e experiências compartilhados e pela ajuda mútua que sempre prestávamos uns aos outros nos momentos de estudo e aprendizado.

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus pais, Hamilton e Alessandra, e a todos de minha família, que sempre me apoiaram durante toda duração desta graduação, me incentivando a continuar correndo atrás de meus sonhos e a crescer todos os dias como profissional e como indivíduo.

PEREIRA, M. M. **Proposta de um Transdutor Capacitivo para Medição da Espessura do Filme de Óleo Lubrificante em Ensaio de Desgaste por Deslizamento** 2023. 28p. Projeto Final de Curso, Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

A principal forma de diminuir o desgaste entre os corpos que deslizam um sobre o outro é por meio da introdução de uma camada de material lubrificante, consiste em um material com tensão de cisalhamento menor que os das superfícies sólidas, ou da interface entre elas, o que leva a uma redução no coeficiente de atrito. Para a finalidade de investigações laboratoriais afim de medir a espessura do filme lubrificante que se forma entre as superfícies em movimento relativo foram desenvolvidos diferentes métodos que fazem uso de diferentes princípios físicos como, por exemplo, ultrassônicos, ópticos ou com o uso de capacitivos. O presente propõe o projeto de um sensor capacitivo para a realização dessa medição em um ensaio do tipo bloco sobre anel, que é feito a partir do cálculo da capacitância teórica do sistema formado pelo corpo de prova e o contracorpo e então os demais componentes do circuito elétrico são dimensionados e ajustados por meio de simulações do circuito no *software* Proteus. As simulações do sensor mostraram que esse é capaz de medir capacitâncias da ordem de grandeza de nF e com essas medidas é possível estimar a espessura de filmes lubrificantes inferiores a 10 μm .

Palavras-chave: Desgaste por deslizamento. Sensor Capacitivo. Ensaio bloco-sobre-anel.

PEREIRA, M. M. **Proposal for a Capacitive Transducer for Measuring the Lubricating Oil Film Layer Thickness in a Sliding Wear Test** 2023. 28p. Final Course Project, Federal University of Uberlândia.

Abstract

The main way to reduce wear between bodies that slide over each other is through the introduction of a layer of lubricating material, consisting of a material with lower shear stress than that of the solid surfaces, or the interface between them, which leads to a reduction in the coefficient of friction. For the purpose of laboratory investigations in order to measure the thickness of the lubricating film that forms between surfaces in relative motion, different methods have been developed that make use of different physical principles such as, for example, ultrasonic, optical or with the use of capacitors. This paper proposes the design of a capacitive sensor to carry out this measurement in a block-on-ring type test, which is made from the calculation of the theoretical capacitance of the system formed by the test piece and the counterbody and then the other components of the electrical circuit are dimensioned and adjusted through circuit simulations in the Proteus software. Those simulations show that the sensor is capable of measuring capacitances of the order of magnitude of nF and with these measurements it is possible to estimate the thickness of lubricating films less than 10 μm .

Keywords: Sliding wear. Capacitive Sensor. Block-over-ring test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustrações de contatos conformes (a) não conformes (b). (Hutchings, 2017).	3
Figura 2.2 – Força F necessária para vencer o atrito causar um movimento do corpo por (a) rolamento ou (b) deslizamento (adaptado de Hutchings, 2017).	4
Figura 2.3 – Curva de Stribeck de contatos conformes lubrificadas (Vittorino, 2022, adaptado de Wuge, 2017).	5
Figura 2.4 – Curvas de lubrificação para contatos conformes (a) e não conformes (b). (Vittorino, 2022, adaptado de Gachot, 2016).	6
Figura 2.5 – Classificação dos mecanismos de desgaste (Vittorino, 2022).....	7
Figura 2.6 – Representação esquemática de diferentes ensaios tribológicos: (a) Bloco- sobre-anel, (b) Esfera-disco, (c) Pino-disco, (Vittorino, 2022, adaptado de Gayatri, 2019).	7
Figura 2.7 – Geometria para ensaios com geometrias não conforme (a) e conforme (b) (Adaptado de Hutchings; Shipway, 2017a).....	8
Figura 2.8 - Componentes do sistema de medição da espessura de filme lubrificante por ultrassom retirado do trabalho, (Dou, 2021).....	9
Figura 2.9 – Trajetória de integração para um capacitor de placas planas (Halliday, 2012).	11
Figura 2.10 - Efeito de capacitância em um ensaio tribológico tipo pino-sobre-disco, (Santos, 2009).....	12
Figura 2.11 - Circuito eletrônico do sensor capacitivo para medição da espessura do filme lubrificante, (Santos, 2009).	13
Figura 2.12 – Esquema do circuito de um filtro ativo passa-baixa de primeira ordem, (Malvino, 2007).....	14
Figura 3.1 - Falex® Block-on-Ring test machine (fonte: autor).	16
Figura 3.2 – Esquema das amostras utilizadas com suas dimensões em milímetros (Vittorino, 2022).....	16
Figura 3.3 – Esquema dos anéis (contracorpo) utilizados com suas dimensões em milímetros (Vittorino, 2022).....	17
Figura 3.4 – Corpo de prova e anel contracorpo (fonte: autor)	17
Figura 3.5 – Propriedades físicas do óleo hidráulico BP68 (Vittorino, 2022).	18

Figura 3.6 – Parâmetros da geometria do conjunto capacitivo corpo de prova mais contracorpo (fonte: autor).....	19
Figura 3.7 – Circuito do filtro ativo passa-baixa de primeira ordem (adaptado de Santos, 2009).....	21
Figura 4.1 – Desenho esquemático da simulação do circuito do filtro ativo passa-baixa (fonte: o autor).....	23
Figura 4.2 – Diagrama de Bode do filtro ativo passa-baixa (fonte: o autor).	24
Figura 4.3 – Desenho esquemático da simulação do sensor capacitivo com o filtro ativo (fonte: o autor).....	25
Figura 4.4 – Leituras de tensão nos pontos de saída do filtro, entre a saída do amplificador operacional AO1 e a entrada do filtro ativo, no capacitor C2 e no resistor R2 do circuito do sensor (fonte: o autor).....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetro Parâmetros da geometria do conjunto capacitivo corpo de prova mais contracorpo.....	20
Tabela 3.2 – Valores dos componentes do filtro ativo passa-baixa do sistema.....	22
Tabela 4.1 – Valores de tensão medidas em diferentes pontos do circuito.	24
Tabela 4.2 – Comparação dos valores teóricos calculados com os valores encontrados na simulação.	25

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{at} = força de atrito (N)

μ = coeficiente de atrito

N = força normal (N)

Hs = número de Hersey

η = viscosidade dinâmica do fluido (Pa·s)

U = velocidade linear de deslizamento (m/s)

P = carga aplicada (N)

λ = relação entre rugosidade e espessura de filme lubrificante

h_{min} = espessura mínima de filme lubrificante (μm)

σ = desvio padrão das alturas das asperezas das superfícies de contato

ρ = raio de contato (m)

C = capacitância (nF)

A = área das placas do capacitor

d = distância entre as placas do capacitor

ε = constante de permissividade elétrica do material dielétrico (F/m)

k = constante dielétrica do material dielétrico

ε_0 = constante de permissividade elétrica do vácuo (F/m)

q = carga elétrica entre as placas do capacitor

\vec{E} = campo elétrico

V = tensão ou diferença de potencial elétrico (V)

X_C = reatância capacitiva (Ω)

f = frequência do sinal elétrico (Hz)

i = corrente elétrica (A)

R = resistência elétrica (Ω)

f_C = frequência de corte do filtro ativo (Hz)

A_V = ganho de tensão do filtro ativo

α = ângulo em graus

L = espessura do corpo de prova (m)

r = raio do contracorpo (m)

ω_C = frequência angular correspondente a frequência de corte (Hz)

b = tipo de resposta em frequência para filtros de ordem ímpar

$A_{máx}$ = ganho máximo do filtro ativo (dB)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Atrito	3
2.2. Lubrificação	4
2.2.1. Regimes de Lubrificação.....	5
2.2.2. Mecanismos de Desgaste.....	6
2.3. Métodos de Medição	8
2.3.1. Sensor Ultrassônico.....	9
2.3.2. Sensor Capacitivo	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1. Materiais Utilizados.....	15
3.1.1. Equipamento de testes	15
3.1.2. Componentes Eletrônicos	18
3.2. Projeto do Sensor	18
3.2.1. Determinação da Espessura Teórica do Filme Lubrificante	18
3.2.2. Determinação da Capacitância Teórica do Sistema	19
3.2.3. Dimensionamento dos Componentes Eletrônicos do Circuito	21
4. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	23
5. CONCLUSÕES.....	27
6. TRABALHOS FUTUROS.....	28
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

No começo da década de 1960 foi notado um grande aumento em casos de falhas de sistemas mecânicos de máquinas devido ao desgaste, ao atrito e à falta de lubrificação. Um grupo de cientistas foi convidado pelo Departamento de Educação de Ciência do Reino Unido para estudar esses casos. Em 1966 esse grupo publicou um artigo mostrando que cerca de 515 milhões de libras (em termos da economia da época) poderiam ser economizadas por ano se as indústrias aplicassem conceitos e práticas tribológicas para melhorar a lubrificação, diminuir o desgaste das peças. Então em 1966 o termo tribologia passou a ser utilizado para denominar uma nova área de estudo científico. Segundo Jost (1966) Tribologia é a ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo e outros assuntos e práticas relacionadas.

Holmberg e Erdemir (2017), em seu estudo sobre a influência da tribologia no consumo global de energia mostram que 23% do consumo mundial de energia é originado a partir de contatos tribológicos, sendo que 20% dessa energia é usada para superar forças de atrito e 3% dela é usada para manufaturar novamente peças danificadas devido ao desgaste ou a falhas relacionadas a ele. Ainda segundo este estudo, se utilizados os novos materiais, superfícies e tecnologias de lubrificação para redução do atrito e proteção contra o desgaste em carros, maquinário industrial e outros equipamentos, perdas energéticas decorrentes do atrito e do desgaste podem ser reduzidas em até 40% no longo prazo e em até 18% no curto prazo.

Hutchings (2017) define que quando duas superfícies sólidas se movimentam em contato uma com a outra, haverá desgaste, ou seja, danos a uma ou ambas superfícies, geralmente, resultando na perda progressiva de material. O desgaste muitas vezes pode ser imperceptível à olho nu, porém, em determinadas ocasiões, pode aumentar rapidamente, causando aumento nos espaços entre componentes móveis, o que leva a folgas indesejadas entre as peças, perda de precisão dos equipamentos e até mesmo falhas por fadiga. Perdas relativamente pequenas de material por desgaste podem ser o suficiente para causar falhas, porém em determinadas situações, como por exemplo, em casos de polimentos superficiais, altas taxas de desgaste são desejadas.

Os tipos de desgaste podem ser classificados em dois grupos: por deslizamento ou pela presença de partículas duras, que por sua vez pode ser sub-dividido em desgaste por abrasivo ou erosivo.

Uma das formas de diminuir o desgaste entre os corpos que deslizam um sobre o outro, é por meio da introdução de uma camada de material lubrificante entre elas, que consiste em um material com tensão de cisalhamento menor que os das superfícies, ou da interface entre elas, o que leva a uma redução no coeficiente de atrito. Como uma grande variedade de composições químicas pode ser usada como lubrificantes, é importante distinguir os diferentes tipos de lubrificação, sendo eles o hidrodinâmico, elastohidrodinâmico, limítrofe e os regime misto. Esses diferentes regimes de lubrificação serão abordados no trabalho.

Dentro da tribologia, uma das áreas de interesse de estudo é a avaliação do desgaste por deslizamento, afim de examinar os mecanismos pelos quais o desgaste

acontece, ou então para simular aplicações práticas e obter dessa forma dados importantes a respeito das taxas de desgaste e coeficientes de atrito do sistema simulado. Para isso existem diferentes métodos de teste, sendo necessário escolher, controlar e medir adequadamente todas as variáveis que podem influenciar os ensaios.

Dentre as variáveis que se pode monitorar em um ensaio de desgaste por deslizamento, é possível citar o regime de lubrificação do sistema, então para a finalidade de investigações laboratoriais é interessante medir a camada de filme lubrificante que se forma entre as superfícies que estão em movimento relativo. Para realizar essa medição, foram desenvolvidos diferentes métodos que fazem uso de diferentes princípios físicos, como por exemplo, com o uso de sensores ultrassônicos, ópticos ou capacitivos.

Este trabalho aborda como é possível medir a espessura da camada de material lubrificante em ensaios de desgaste por deslizamento por meio de um transdutor capacitivo e propõe o projeto de um sensor deste tipo para a realização dessa medição em um ensaio do tipo bloco sobre anel. O funcionamento deste sensor é baseado no princípio físico dos capacitores, que são equipamentos que armazenam energia elétrica compostos por duas partes condutoras separadas por um material dielétrico. No sistema de ensaios estudados, o corpo de prova e contracorpo são materiais condutores e o lubrificante utilizado é um material dielétrico, então quando esse conjunto é colocado na presença de uma diferença de potencial elétrico, ele se comportará como um capacitor. A capacitância de um capacitor é proporcional à distância entre suas placas condutores, portanto, se for possível medir a capacitância tribopar utilizado no ensaio, é possível então estimar a espessura do filme lubrificante entre eles.

Capítulo II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para melhor compreensão do tema abordado é necessário fazer uma revisão a respeito dos diferentes mecanismos de desgaste e os métodos de se realizar ensaios de desgaste; os diferentes regimes de lubrificação e suas características, assim como dos diferentes métodos de medição da espessura da camada de filme lubrificante que se forma durante os ensaios e seus princípios físicos de funcionamento.

2.1. Atrito

Antes de conceituar o atrito, é essencial mencionar que todo sistema tribológico refere-se à interação entre duas superfícies sujeitas aos elementos presentes na interface entre elas, bem como aos efeitos da temperatura e pressão do ambiente circundante. Mesmo em contatos aparentemente planos, as superfícies possuem asperezas, e a área de contato real é determinada pelo somatório dos picos mais proeminentes que efetivamente participam do contato entre os corpos (Zum Gahr, 1987). É nessa área de contato real que as forças atuam entre as duas superfícies, sendo essas forças responsáveis pelo surgimento do atrito.

Hutchings (2017) classifica os contatos entre os corpos em dois tipos: contatos conformes, caracterizados por um alto grau de conformidade na geometria das superfícies em contato; e contatos não conformes, conforme ilustrado na Figura 2.1. Os contatos conformes distribuem a tensão no contato de maneira mais uniforme, ao passo que os contatos não conformes exibem perfis de distribuição de tensão mais acentuados.

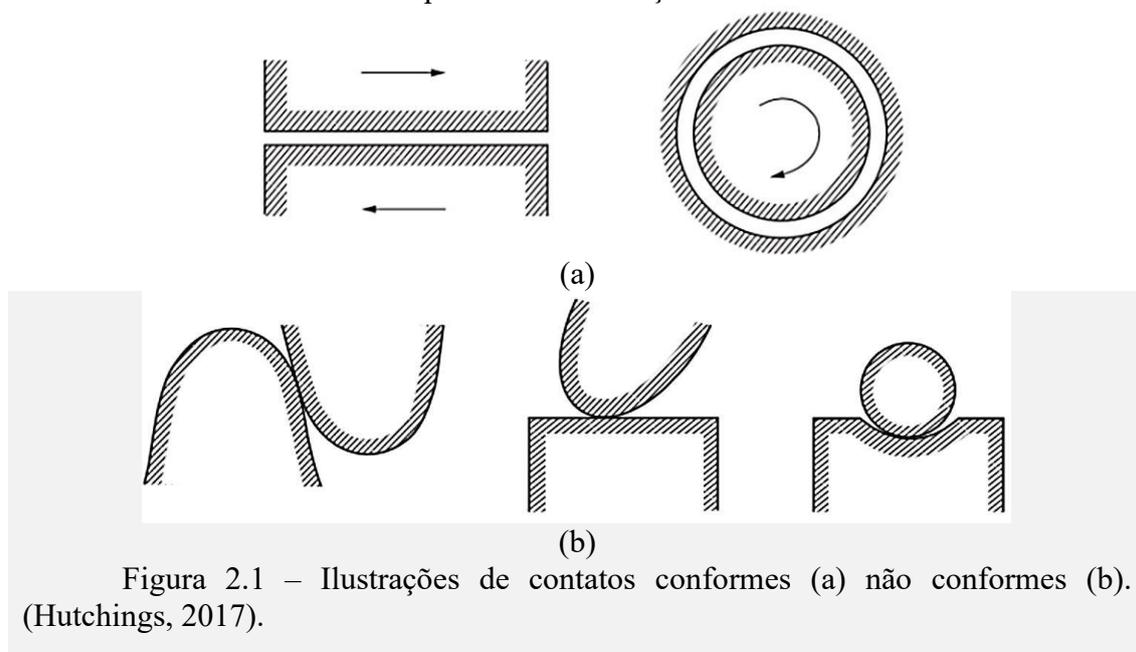


Figura 2.1 – Ilustrações de contatos conformes (a) não conformes (b). (Hutchings, 2017).

A força de atrito então é definida como a resistência encontrada por um corpo ao se movimentar sobre outro, e essa definição ampla abrange duas importantes classes de movimento relativo: deslizamento e rolamento (Hutchings, 2017). Em ambos os casos, é necessário que uma força tangencial F seja aplicada à um dos corpos para move-lo sobre

uma superfície estacionária, conforme mostra a figura 2.2. A razão entre essa força necessária para vencer o atrito e movimentar o corpo e a força normal N é conhecida como coeficiente de atrito, e é normalmente representada pela letra grega μ .

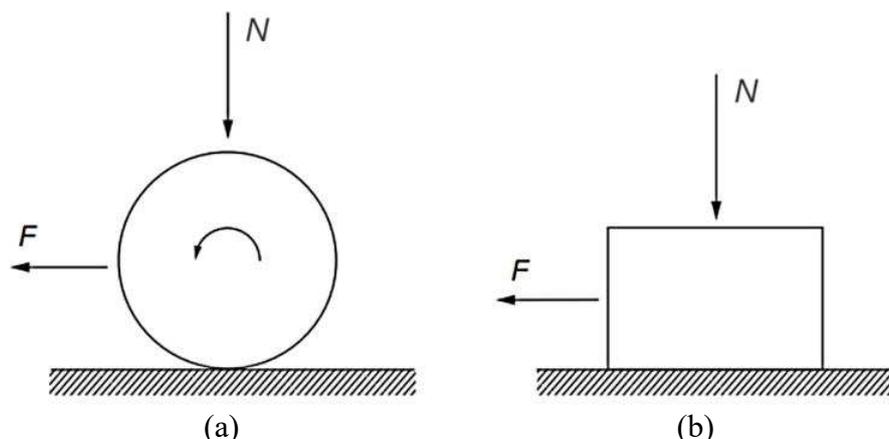


Figura 2.2 – Força F necessária para vencer o atrito causar um movimento do corpo por (a) rolamento ou (b) deslizamento (adaptado de Hutchings, 2017).

Leonardo da Vinci foi o primeiro a estudar essas forças de atrito e enunciar em 1493 as Leis do Atrito, que posteriormente foram formuladas por Amontón em 1699, enumeradas abaixo, e a elas é adicionada a terceira lei enunciada por Coulomb (1785):

- 1ª A força de atrito é proporcional à força normal que atua sobre o corpo;
- 2ª A força de atrito é independente da área aparente de contato;
- 3ª A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento.

A primeira lei pode ser expressa pela equação (2.1):

$$F_{at} = \mu \cdot N \quad (2.1)$$

O presente trabalho se propõe a estudar os meios de medir a espessura de filme de óleo lubrificante em ensaios de desgaste de mancais de deslizamento lubrificado, onde a lubrificação é vantajosa por minimizar o desgaste e reduzir a dissipação de energia em função do atrito.

2.2. Lubrificação

A lubrificação é a introdução entre duas superfícies deslizantes de um material com tensão de cisalhamento inferior à ambos os corpos ou à sua interface (Hutchings, 2017).

Segundo Vitorino (2022) os principais fatores que influenciam a ação de lubrificantes são: 1- temperatura; 2- velocidade relativa; 3- força normal. O aumento da temperatura afeta na redução da viscosidade, que reduz a tensão cisalhante entre as camadas de fluido e consequentemente o atrito. Baixas velocidades de deslizamento relativa entre as superfícies reduz a capacidade do fluido sustentar o filme lubrificante; A força normal e as condições de geometria do contato, que podem facilitar ou não que o lubrificante permaneça em um vale ou que seja pressionado para fora da interface. Esses parâmetros são fundamentais para definição dos regimes de lubrificação em sistema mecânico.

2.2.1. Regimes de Lubrificação

Os regimes de lubrificação podem ser especificados por dois parâmetros. Um deles é o número de Hersey (Equação 2.2), que é dado pela razão entre produto da viscosidade dinâmica η (m/s^2) pela velocidade linear de deslizamento U (m/s) e a carga P (N). O outro parâmetro pelo qual os regimes de lubrificação podem ser especificados é o parâmetro λ (Equação 2.3), que é a razão entre a espessura mínima de filme lubrificante (h_{\min}) e o desvio padrão das alturas das asperezas das duas superfícies em contato (σ).

$$Hs = \frac{\eta \cdot U}{P} \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sigma} \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (2.4)$$

A Figura 2.3 mostra o gráfico conhecido como Curva de Stribeck, que classifica os regimes de lubrificação. Essa curva classifica os regimes de lubrificação em três categorias: limítrofe ($\lambda < 1$); misto ($1 < \lambda < 3$); e hidrodinâmico ($\lambda > 3$).

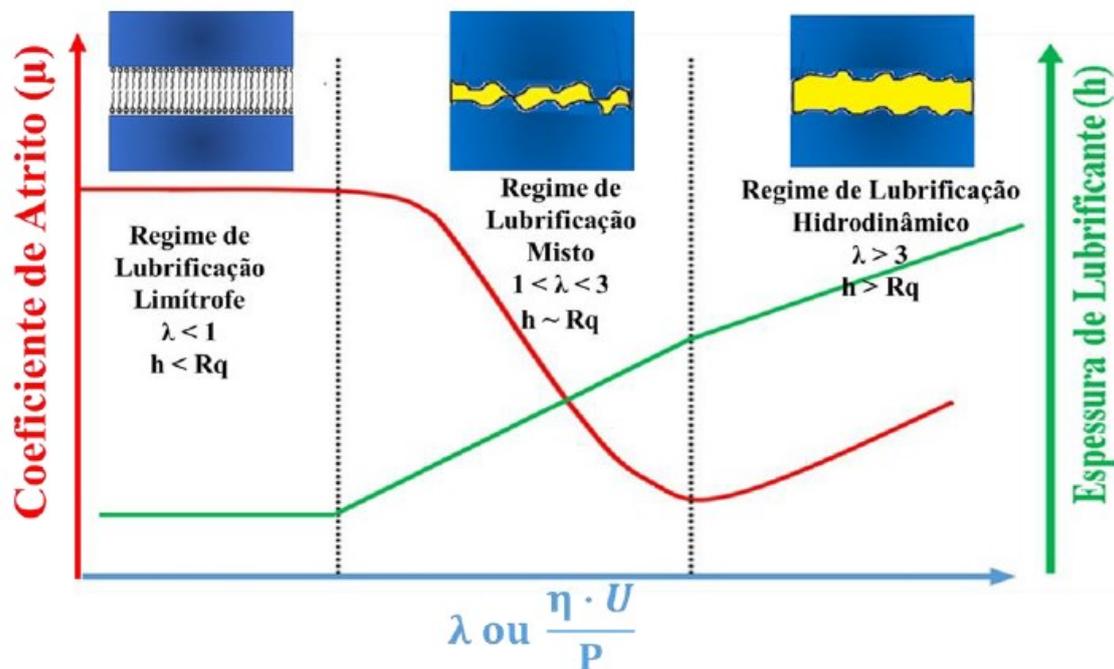


Figura 2.3 – Curva de Stribeck de contatos conformes lubrificadas (Vittorino, 2022, adaptado de Wuge, 2017).

O regime limítrofe é caracterizado por apresentar as maiores tensões de contato e as forças hidrodinâmicas não são suficientes para manter um filme contínuo de lubrificante entre as superfícies, o que ocasiona nos maiores valores de atrito e desgaste quando comparado com os outros regimes de lubrificação. Isso ocorre devido à altas temperaturas, ou baixas velocidades de deslizamento.

No regime misto há um início de separação na interface das superfícies, causado pelo aumento da velocidade de deslizamento, pela redução da carga, ou pela maior refrigeração do contato, fazendo com que a viscosidade do lubrificante aumente.

No regime hidrodinâmico as superfícies em movimento relativo estão completamente separadas pelo filme de fluido lubrificante que se encontra plenamente desenvolvido. Essa é a condição na a qual a maioria dos mancais foram projetados para operar.

De acordo com a geometria de contato, irá ocorrer uma condição elasto-hidrodinâmica para contatos não conformes, e hidrodinâmicos para contatos conformes. Nota-se que ambos os casos ocorrem quando o número de Hersey é maior, mas somente em contatos conformes há separação total entre as superfícies em contato pelo lubrificante. Os gráficos da Figura 2.4 ilustram essa diferença de regimes de lubrificação para os dois tipos diferentes de geometria.

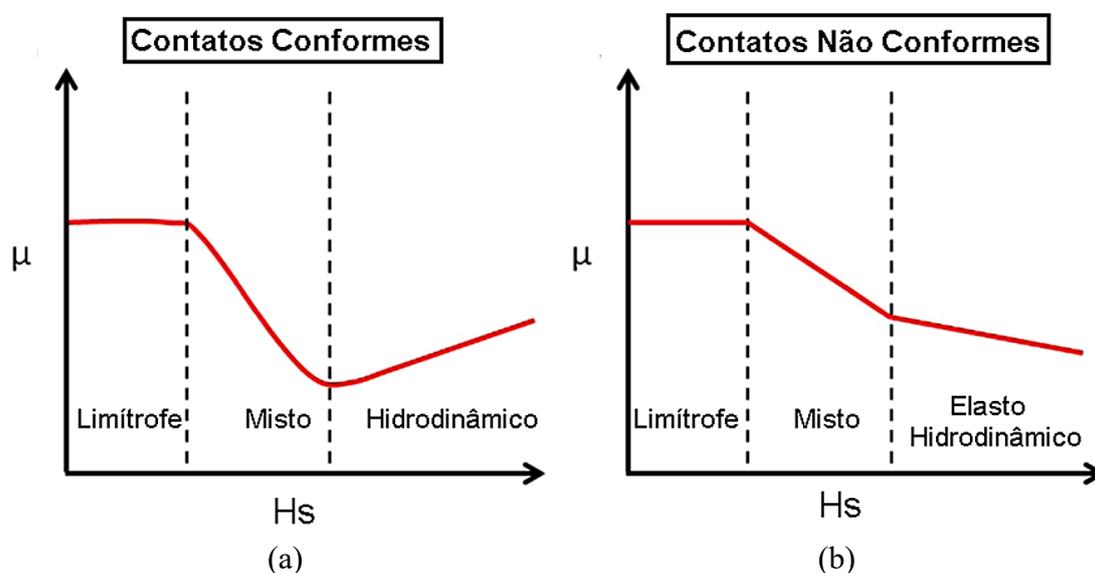


Figura 2.4 – Curvas de lubrificação para contatos conformes (a) e não conformes (b). (Vittorino, 2022, adaptado de Gachot, 2016).

Para contatos conformes é possível calcular a espessura mínima (h_{min}) do filme de óleo lubrificante pela Equação 2.4 conforme a forma analítica (Stolarski, 1990).

$$h_{min} = 4,9 \cdot \frac{\mu \cdot U \cdot \rho}{P} \quad (2.5)$$

Onde ρ é o raio da circunferência do corpo de prova em metros (m).

2.2.2. Mecanismos de Desgaste

É necessário também conhecer os diferentes mecanismos que levam ao desgaste, para então entender qual é o tipo de desgaste que será estudado no desenvolvimento do sensor proposto neste trabalho. Hutchings (2017) propõe um raciocínio que divide os mecanismos de desgaste com base na presença ou não de partículas duras, como mostrado por Vittorino (2022) na Figura 2.5. Na sua ausência destas partículas, o desgaste é causado somente pela interação das superfícies em movimento relativo.

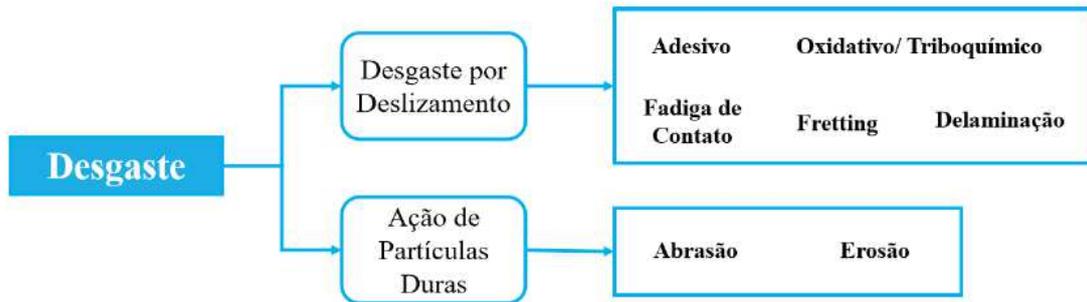


Figura 2.5 – Classificação dos mecanismos de desgaste (Vittorino, 2022)

As condições de desgaste podem ser simuladas em diferentes condições de desgaste, de acordo com as demandas de cada estudo. É fundamental que o ensaio represente o mecanismo de desgaste principal presente na situação que se deseja simular. Como exemplo de configurações mais comuns para ensaios de desgaste por deslizamento, a Figura 2.5 apresenta alguns dos modelos de ensaio existentes em normas.

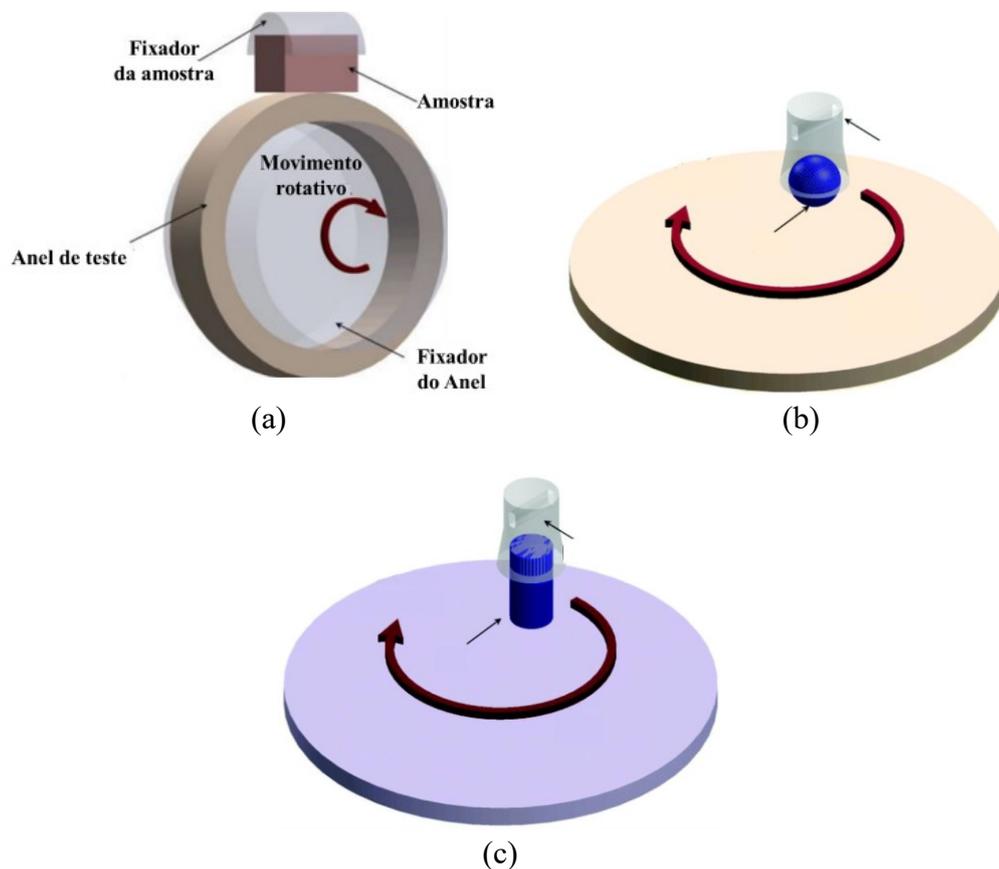


Figura 2.6 – Representação esquemática de diferentes ensaios tribológicos de desgaste por deslizamento: (a) Bloco-sobre-anel, (b) Esfera-disco, (c) Pino-disco, (Vittorino, 2022, adaptado de Gayatri, 2019).

A escolha da geometria do contato é fundamental para atingir o regime de lubrificação desejado, conforme Hutchings (2017), possibilitando assim simular o desgaste de mancais pela utilização de um sistema do tipo bloco-sobre-anel conforme, como exemplifica a Figura 2.6.

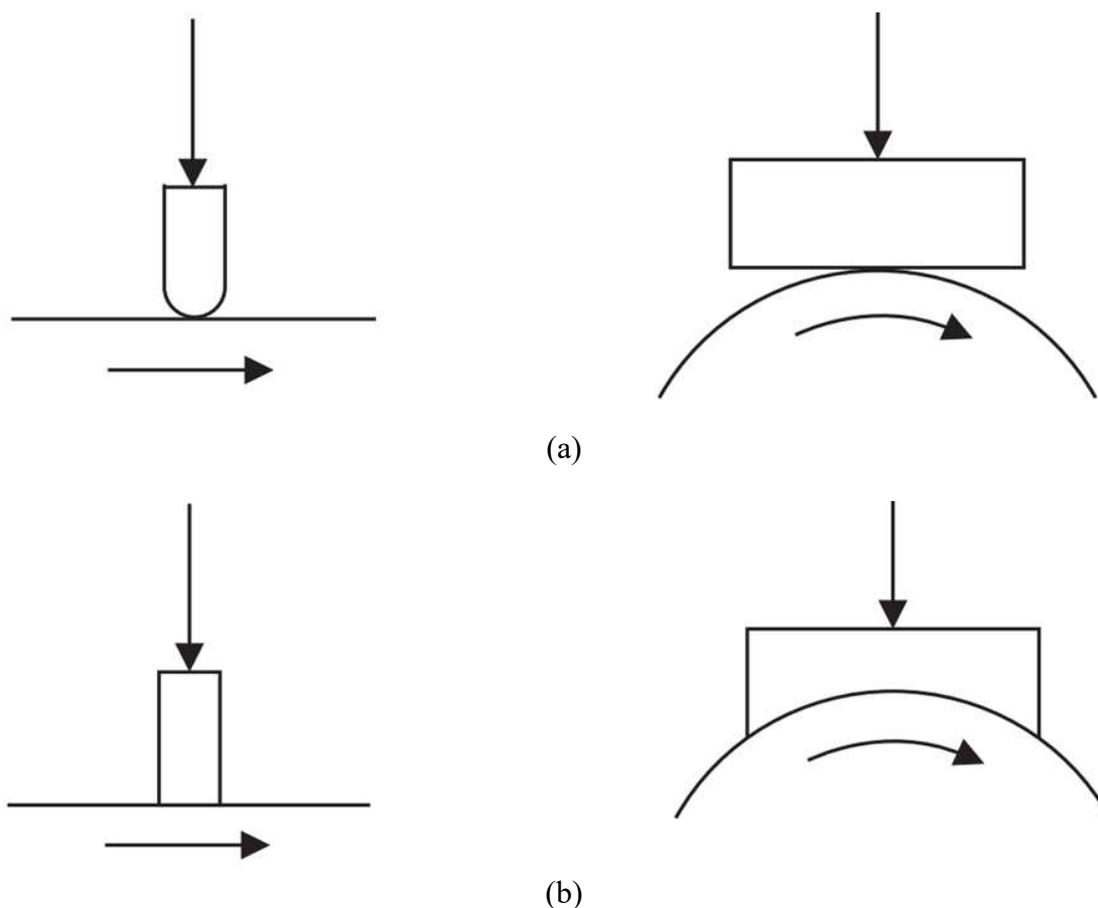


Figura 2.7 – Geometria para ensaios com geometrias não conforme (a) e conforme (b) (Adaptado de Hutchings; Shipway, 2017a).

Os contatos podem ser descritos como conformes e não conformes. Contatos conformes ocorrem por uma área nominal de contato extensa, enquanto contatos não conformes ocorrem apenas em um ponto, uma linha ou um plano. As tensões de contato são mais elevadas em contatos não conformes. Podem ser citados como exemplo de contatos conformes um ensaio pino-disco onde a ponta do pino é plana, ou um ensaio do tipo bloco-sobre-anel conforme. E como exemplos de contatos não conformes tem-se ensaio pino-disco onde a ponta do pino é esférica, ou um ensaio do tipo bloco-sobre-anel não conforme.

2.3. Métodos de Medição

Como visto anteriormente, na maioria dos casos reais, o deslizamento de uma superfície sólida sobre a outra ocorre na presença de um lubrificante, mas em algumas aplicações de engenharia, isso pode também ocorrer na ausência de lubrificante. A necessidade de verificar a presença e a espessura do filme lubrificante é fundamental para o entendimento do processo e definição do regime de lubrificação que o sistema opera.

Para atender essa finalidade, foram desenvolvidos diferentes métodos de medição da espessura do filme lubrificante em ensaios de desgaste por deslizamento, dentre eles

podem ser citados, por exemplo, as medições feita por meio de sensores capacitivos, e por meio de sensores ultrassônicos. Existem ainda, outras maneiras para realizar a medição da espessura do filme lubrificante, como o de deslocamento de fibra ótica e a medição por fluorescência induzida por laser, porém esses métodos exigem uma janela transparente de cada lado das peças que compõe o tribopar de corpo de prova e contracorpo do ensaio e isso nem sempre é fisicamente possível para os equipamentos de ensaio disponíveis, enquanto as duas formas citadas anteriormente são menos invasivas.

Cada método possui suas peculiaridades, vantagens e desvantagens, por isso é necessário entendê-los para melhor definir qual o método de medição mais adequado para cada situação de ensaio.

2.3.1. Sensor Ultrassônico

Um dos métodos utilizados para medir a espessura de filme de óleo lubrificante em ensaios é fazendo uso da tecnologia baseada em ultrassom, que tem como vantagem possuir consideravelmente menos ruído na sua leitura que o a medição por capacitância.

De acordo com Dou, P. (2021) esse método utiliza pulsos de som e a sua propagação por diferentes meios (fluidos e sólidos) como princípio para medir a espessura do filme lubrificante. O sistema é composto basicamente por um sensor ultrassônico que é excitado por um receptor de pulsos ultrassônicos que gera um sinal de pulsos de tensão elétrica. O conjunto de pulsos sonoros então é emitido e transmitido para um tribopar, normalmente composto por duas superfícies sólidas e um fluido lubrificantes que os separa parcial ou completamente. Parte desses pulsos são refletidos pelo tribopar de volta para o sensor, que então transforma esse sinal sonoro em um sinal elétrico que é lido por um osciloscópio ou por um computador. A figura ilustra o sistema.

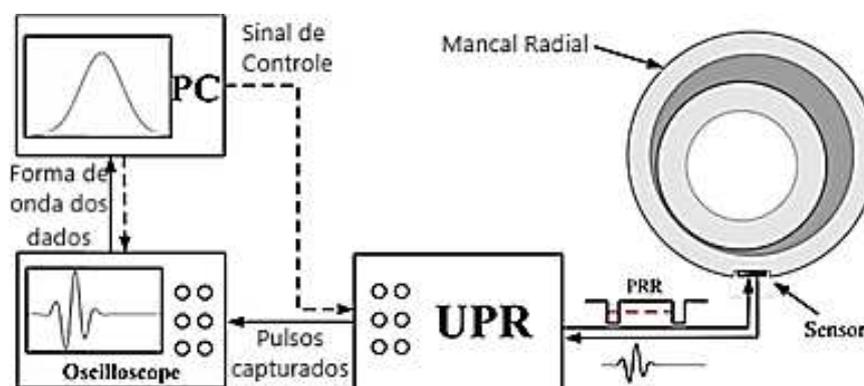


Figura 2.8 - Componentes do sistema de medição da espessura de filme lubrificante por ultrassom retirado do trabalho, (Dou, 2021).

Dentre as vantagens da medição da espessura da camada de óleo lubrificante pode ser citado o fato de que é um método bastante versátil e adaptável em situações e necessidades diferentes, devidos aos diferentes modelos existentes, baseados na propagação de sinais ultrassônicos que podem ser usados para medir a espessura do filme de óleo lubrificantes. Esses diferentes modelos podem variar de acordo com a geometria das estruturas lubrificadas e a característica da propagação do som pelos materiais que compõe o sistema. Outra grande vantagem deste método é possibilidade de realizar medições de filmes com espessura da ordem de décimos de micrometros, porém uma grande desvantagem é a existência de zonas cegas onde a frequência dos pulsos de

aproxima das frequências de ressonância dos materiais. Nessas zonas o sensor ultrassônico apresenta resolução insuficiente e baixa sensibilidade.

De acordo com Dou (2021), os modelos ultrassônicos usados para medir a espessura do filme de óleo, são avaliados baseado em vários comportamentos de propagação sonora. Conforme a geometria das estruturas lubrificadas e as características de propagação do som, os modelos de cálculo podem ser classificados como paralelos e não-paralelos e também existem modelos para diferentes aplicações.

Estruturas paralelas são abstrações aproximadas que podem ser encontradas em aplicações como as de rolamentos axiais, onde a propagação do som pode ser simplificada como uma estrutura de três camadas (aço-óleo-aço) para correlacionar a espessura do filme lubrificante com as medidas dos ecos dos pulsos ultrassônicos. Para rolamentos com revestimentos, deve-se considerar uma estrutura de quatro camadas (aço-revestimento-óleo-aço), porém se a camada de revestimento for muito fina, os ecos das interfaces entre o aço e o revestimento e entre o revestimento e o óleo se sobrepõe, tornando mais difícil de isolar o eco emitido pelo material lubrificante.

No caso da medição da espessura da camada lubrificante em estruturas não-paralelas, como em mancais de rolamento, existem dois grandes desafios técnicos que são estudados atualmente. O primeiro deles é a resolução espacial da distribuição do filme, pois o óleo se distribui entre as superfícies com regiões de diferentes espessuras e tensões. Como a espessura mínima encontra-se em uma zona de microescala, sua identificação é determinada pela resolução espacial da medição. O segundo desafio das estruturas não-paralelas é a dificuldade na caracterização da espessura do filme lubrificante em um contato misto fluido-sólido, uma vez que nesses casos a distribuição do óleo lubrificante não é contínua por toda superfície sólida das peças. Uma das suas principais desvantagem da utilização desta aproximação é a sua limitada faixa de efetividade ($< 10 \mu\text{m}$).

2.3.2. Sensor Capacitivo

De acordo com Halliday (2012), um capacitor é um equipamento que armazena energia elétrica utilizando dois condutores isolados entre si contendo um material dielétrico entes eles. No caso do teste de desgaste, o corpo de prova e o contra corpo do ensaio são ambos metálicos e possuem uma camada de fluido lubrificante entre eles. Essa montagem isolada, permite que esse conjunto se comporte como um capacitor quando submetido a uma diferença de potencial elétrico. Nesse caso, o corpo e o contra corpo são as partes condutoras do capacitor, e o fluido lubrificante, o dielétrico.

A capacitância de um capacitor é a medida da quantidade de carga que precisa ser acumulada nas placas para produzir uma diferença de potencial, e ela depende da geometria dos condutores e da distância entre eles, mas não depende da carga e nem da diferença de potencial.

A partir da medição da capacitância pode ser calculado a distância entre as partes do sistema, e assim a espessura da cama da de filme lubrificante durante o ensaio. A fórmula da capacitância (C) de um sistema de placas paralelas está apresentada na Equação 2.6.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.6)$$

Onde A é a área das superfícies metálicas, d é a distâncias entre as superfícies e ϵ é a constante de permissividade elétrica do dielétrico, dada pela Equação 2.7

$$\varepsilon = k \cdot \varepsilon_0 \quad (2.7)$$

Onde $\varepsilon_0 = 8,8541878 \cdot 10^{-12}$ F/m é a constante de permissividade elétrica do vácuo e k é a constante dielétrica do material dielétrico.

A Equação 2.6 é encontrada, conforme mostra Halliday (2012), primeiramente supondo uma carga elétrica q entre as placas; em seguida calcula-se o campo elétrico (\vec{E}) entre as placas em função de q usando a Lei de Gauss (Equação 2.8).

$$\varepsilon \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q \quad (2.8)$$

Então com a equação do campo elétrico \vec{E} encontrada, calcula-se então a diferença de potencial elétrico $V_f - V_i$ entre as placas pela Equação 2.9.

$$V_f - V_i = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (2.9)$$

Onde a integral deve ser calculada ao longo de uma trajetória que começa em uma placa e termina na outra, portanto sempre será escolhida uma trajetória que coincide com uma das linhas do campo elétrico, da placa negativa até a placa positiva, como está ilustrado na Figura 2.9.

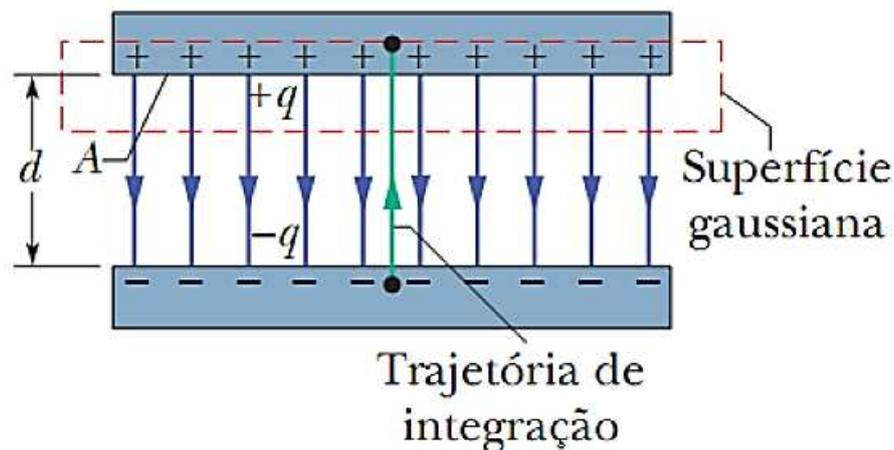


Figura 2.9 – Trajetória de integração para um capacitor de placas planas (Halliday, 2012).

Para esta trajetória, os vetores \vec{E} e $d\vec{s}$ têm sentidos opostos, então o produto vetorial entre eles é igual a $-E ds$, e, chamando de V a diferença $V_f - V_i$, a Equação 2.9 pode ser simplificada da seguinte forma:

$$V = \int_-^+ E ds \quad (2.10)$$

Então finalmente calcula-se C através da Equação 2.11.

$$C = \frac{q}{V} \quad (2.11)$$

Para realizar essa medição é necessário montar um circuito capaz de medir a capacitância do sistema. Uma das alternativas para isso, como mostra Ducu (2000), é criação de um circuito que gere um sinal de tensão de saída diretamente proporcional à espessura da camada de óleo lubrificante entre as duas superfícies metálicas, portanto é necessário um sinal diretamente proporcional à reatância capacitiva (X_C) do sistema, já que esta é inversamente proporcional à capacitância do sistema e a frequência da onda harmônica (f) em Hertz, como mostra a Equação 2.12.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.12)$$

A reatância capacitiva também pode ser relacionada com a corrente (i) e a tensão (V_c) sobre o capacitor, conforme a lei de Ohm:

$$V_c = X_C \cdot i \quad (2.13)$$

A obtenção desse sinal pode ser feita a partir da medição da impedância do sensor capacitivo, que é a soma da resistência do sensor com a sua reatância capacitiva. Visto que a reatância capacitiva do filme de óleo lubrificante é muito maior que a sua resistência elétrica, pode-se considerar a impedância apenas como a reatância capacitiva. Santos G. F. (2009) propôs um sistema com base nesse princípio para ensaios de desgaste por deslizamento do tipo pino sobre disco. A Figura 2.10 mostra como o sistema do ensaio pino sobre disco pode se comportar de forma semelhante a um capacitor.

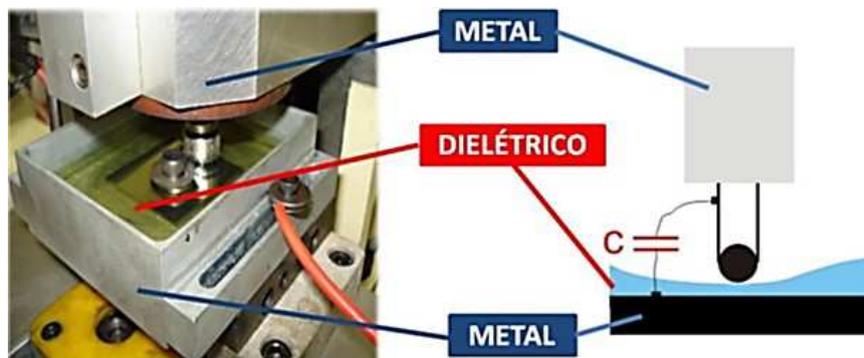


Figura 2.10 - Efeito de capacitância em um ensaio tribológico tipo pino-sobre-disco, (Santos, 2009).

O sinal de saída do circuito proposto por Santos (2009), mostrado na Figura 2.11, acima é proporcional à tensão no resistor R2, que por sua vez é inversamente proporcional à capacitância do transdutor capacitivo. Conforme a lei de Kirchhoff, a tensão de entrada (V_{in}) é igual à soma das tensões no transdutor (V_c) e nos resistores R1 e R2 (V_{R1} e V_{R2} respectivamente) obtém-se a Equação 2.14.

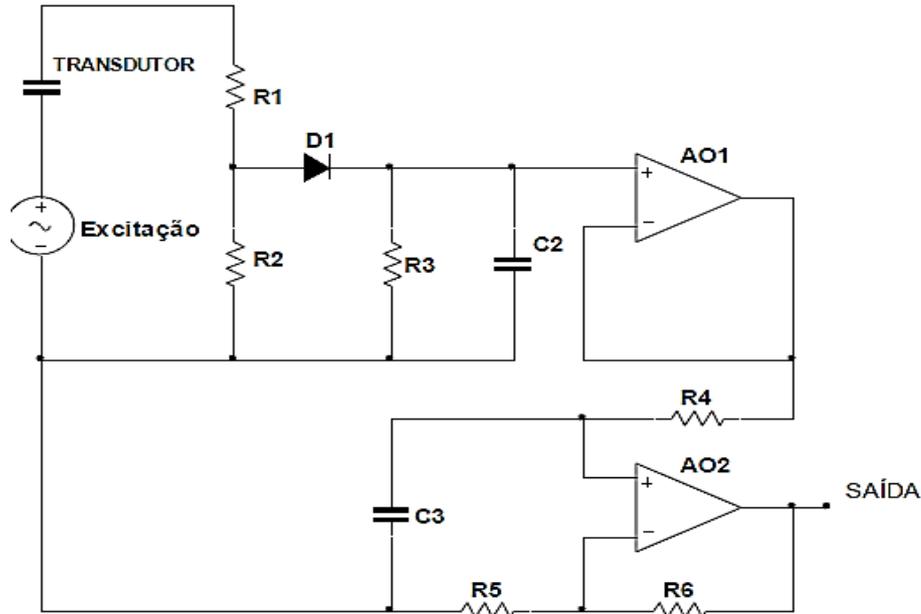


Figura 2.11 - Circuito eletrônico do sensor capacitivo para medição da espessura do filme lubrificante, (Santos, 2009).

$$V_{in} = V_c + V_{R1} + V_{R2} \quad (2.14)$$

Considerando a tensão e a corrente eficazes a partir da lei de Ohm, conforme a Equação 2.15, é possível encontrar o módulo da corrente (i) pela Equação 2.16:

$$V_{in} = (X_c \cdot i) + (R_1 \cdot i) + (R_2 \cdot i) \quad (2.15)$$

$$i = \frac{V_{in}}{(X_c + R_1 + R_2)} \quad (2.16)$$

Substituindo na Equação 2.16 a reatância capacitiva X_c pela Equação 2.12, tem-se:

$$i = \frac{V_{in}}{\left(\frac{1}{2\pi f C} + R_1 + R_2\right)} \quad (2.17)$$

A tensão no resistor R_2 é dada pela lei de Ohm na Equação 2.18:

$$V_{R2} = R_2 \cdot i \quad (2.18)$$

Substituindo o valor da corrente da Equação 2.16 na Equação 2.18, tem-se:

$$V_{R2} = R_2 \cdot \frac{V_{in}}{\left(\frac{1}{2\pi f C} + R_1 + R_2\right)} \quad (2.19)$$

Pela Equação 2.19, pode-se concluir que o valor da tensão em R_2 é um sinal proporcional à capacitância do transdutor, uma vez que R_1 , R_2 , V_{in} e f são constantes. O diodo D1 é utilizado para retificar o sinal que é uma onda harmônica e o capacitor C2 é

utilizado para amenizar o efeito de ripple, ou ondulação, que é a variação de um sinal em tensão contínua devido à retificação do sinal. O capacitor funciona como um filtro que faz com que o sinal de tensão retificada tenha módulo igual ao valor de pico do sinal de tensão alternada. A tensão de ripple pode ser determinada pela Equação 2.20 (Malvino, 2007).

$$V_r = \frac{i}{f \cdot C} \quad (2.20)$$

Uma das desvantagens do sensor capacitivo para a medição da espessura do filme lubrificante é a quantidade de ruído que o circuito eletrônico do transdutor introduz na leitura, portanto após sinal passar pelo amplificador operacional AO1 para ser ampliado ele então passa por um filtro ativo passa-baixa de primeira ordem para atenuar os ruídos presentes no sinal.

Conforme definido por Malvino (2007), filtros são circuitos que permitem a passagem de uma faixa de frequência enquanto rejeita outra. Filtros ativos são construídos com resistores, capacitores e amplificadores operacionais e são usados para separar sinais indesejados, bloquear sinais de interferência, melhorar sinais, entre outras aplicações. Os filtros ativos de primeira ordem são construídos utilizando apenas um capacitor, por isso podem ser apenas dos tipos passa-baixa ou passa-alta. Para a aplicação deste trabalho, um filtro passa-baixa de primeira ordem é o suficiente para atenuar as frequências que estão acima da do valor crítico. A Figura 2.12 mostra o esquema o circuito de um filtro ativo passa baixa de primeira ordem e sua frequência de corte (f_c) e seu ganho de tensão (A_V) são dados pelas equações 2.21 e 2.22 respectivamente.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_3 C_1} \quad (2.21)$$

$$A_V = \frac{R_2}{R_1} + 1 \quad (2.22)$$

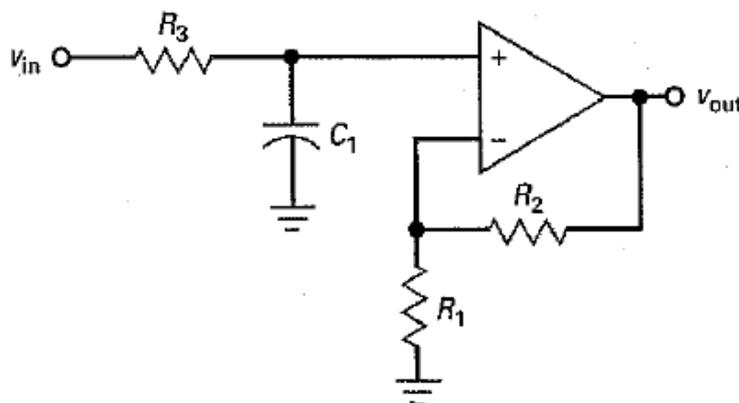


Figura 2.12 – Esquema do circuito de um filtro ativo passa-baixa de primeira ordem, (Malvino, 2007).

Em altas frequências o capacitor C_1 se comporta como um curto circuito, portanto a frequência de trabalho do filtro deve ser inferior a f_c . Comparando a Equação 2.20 com a Equação 2.12, pode-se concluir que a frequência de corte ocorre quando $f_c = X_C$. Para frequências acima de f_c o circuito de atraso $R_3 C_1$ reduz a tensão na entrada não inversora

do amplificador operacional, e como o circuito não está na malha de realimentação, a tensão saída do filtro decai a uma taxa de 20 dB por década. A tensão de saída (V_{out}) do filtro passa-baixa é expressa em função da tensão de entrada (V_{in}), do ganho de tensão, da frequência de entrada (f_{in}) e da frequência de corte é dada pela Equação 2.23, onde n é o número de polos do filtro. Para o caso de um filtro de primeira ordem $n = 1$.

$$V_{out} = A_V \frac{V_{in}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{in}}{f_c}\right)^{2n}}} \quad (2.23)$$

Conforme mostrado por Santos, esse método pode medir espessuras de filmes de abaixo de 10 μm . Porém uma das desvantagens deste método é a necessidade de garantir o isolamento elétrico dos terminais do sensor e dos corpos de prova e contra corpos utilizados no ensaio. Esse isolamento é necessário para eliminar efeitos de capacitância estática do sensor, que podem fazer com que o circuito se torne não linear, e capacitâncias parasitas do sistema, que se tornariam ruídos na leitura do sinal de saída.

Os métodos apresentados mostram ser soluções viáveis para a necessidade da medição da espessura do filme lubrificante visto que não são tão invasivos quanto os métodos que exigem a presença de janelas transparentes no sistema. Nota-se que cada tipo de medição apresenta uma faixa de efetividade que atende diferentes necessidades, sendo o sensor ultrassônico mais adequado para a medição de filmes de lubrificante com espessura inferior à 10 μm e o sensor capacitivo é capaz de medir filmes com espessura superior a 10 μm .

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo três engloba o projeto e a simulação do circuito do sensor capacitivo proposto neste trabalho, assim como a identificação dos recursos utilizados na realização do mesmo.

3.1. Materiais Utilizados

3.1.1. Equipamento de testes

O equipamento no qual o sensor será instalado é o *Falex® Block-on-Ring test machine* que é usado para avaliar as características de atrito e desgaste de materiais e lubrificantes em variadas condições de testes simulados.



Figura 3.1 - Falex® Block-on-Ring test machine.

Para os ensaios realizados neste equipamento são usados corpos de prova confeccionados conforme a norma ASTM D271 94 (2014) para ensaios do tipo bloco sobre anel. Eles são feitos de aço AISI 1045, com coeficiente de Poisson 0,33, módulo de elasticidade 210 GPa, dureza Vickers de aproximadamente $1,714 \pm 0,035$ GPa e dimensões conforme.

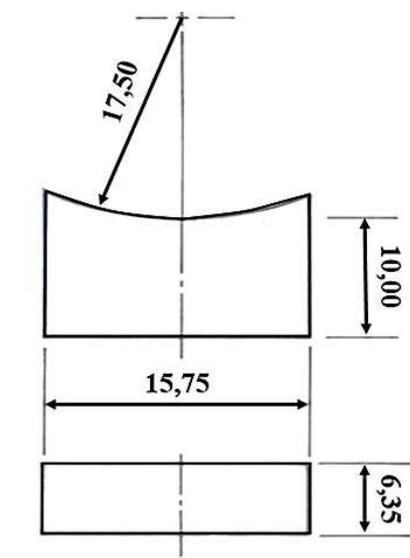


Figura 3.2 – Esquema das amostras utilizadas com suas dimensões em milímetros (Vittorino, 2022).

As amostras analisadas são da mesma geometria do trabalho de Vittorino, 2022. O contracorpo do ensaio é um anel de mesmo diâmetro formando assim um sistema de geometria conforme, pois o regime de lubrificação hidrodinâmico só é possível nessa configuração e para que seja possível medir a capacitância do sistema é necessário que

haja separação total das superfícies. Foram utilizados anéis padrões fornecidos pela *Falex*® feitos de aço AISI 4620 (Aço níquel-molibdênio), também normatizados de acordo com a ASTM D271 94 (2014), com dureza superficial Vickers variando entre $6,796 \pm 0,098$ GPa e dimensões mostradas na Figura 3.3.

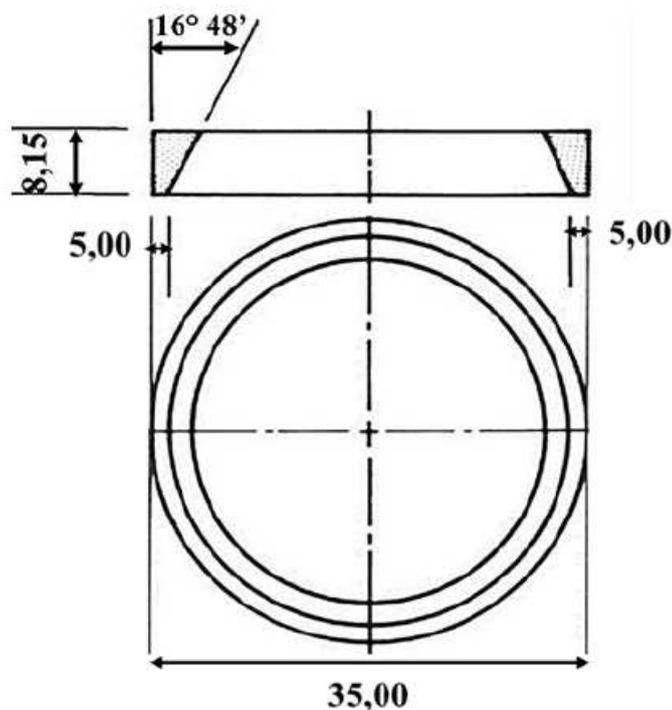


Figura 3.3 – Esquema dos anéis (contracorpo) utilizados com suas dimensões em milímetros (Vittorino, 2022).



Figura 3.4 – Corpo de prova e anel contracorpo (fonte: autor)

Para este trabalho foi considerado que seria usado nos ensaios o mesmo lubrificante usado por Vittorino (2022) e Rodrigues (2018), que é óleo hidráulico BP68 da fabricante YPF® Brasil que possui as seguintes propriedades físicas: viscosidade cinemática de 159,60 cSt a 20 °C e 7,16 cSt a 100 °C (Vittorino, 2022), suas outras

propriedades físicas como massa específica (ρ) e viscosidade dinâmica (ν) podem ser identificados no gráfico apresentado na Figura 3.5.

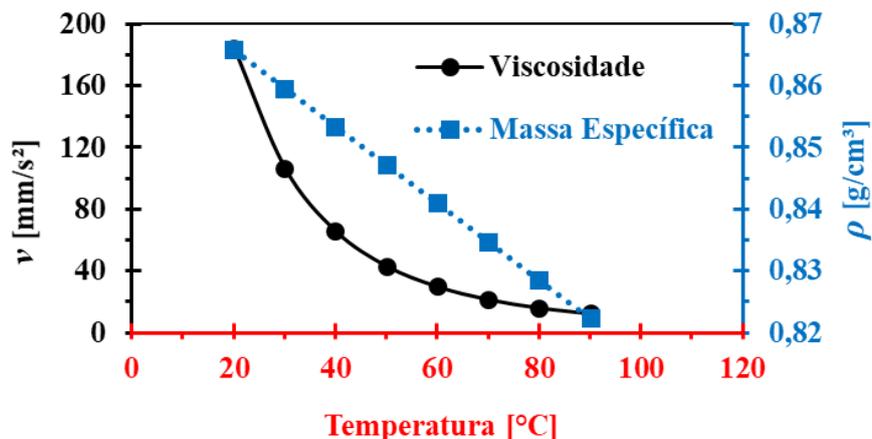


Figura 3.5 – Propriedades físicas do óleo hidráulico BP68 (Vittorino, 2022).

3.1.2. Componentes Eletrônicos

Para o projeto do circuito do sensor capacitivo foram considerados os seguintes componentes eletrônicos:

- Resistores;
- Capacitores;
- Diodo 1N4007;
- Amplificadores operacionais LM741.

3.2. Projeto do Sensor

A simulação do circuito do sensor foi feita no *software* Proteus (versão 8.13), que é um programa para criação de projetos de circuitos eletrônicos composto por conjuntos de ferramentas incluindo simulações e módulos de projetos de placas de circuito impresso, usadas principalmente para o projeto de circuitos integrados.

Para simular o circuito do sensor, primeiramente é necessário calcular a capacitância teórica do sistema, para isso é preciso calcular a espessura teórica do filme de óleo lubrificante, que será considerada como a distância entre as placas do capacitor formado pelo conjunto corpo de prova e contracorpo. Tendo obtido esses valores, então é feito o dimensionamento dos componentes eletrônicos do circuito e finalmente a simulação é ajustada com os valores nominais reais de componentes eletrônicos disponíveis no mercado que forem mais próximos dos valores teóricos encontrados.

3.2.1. Determinação da Espessura Teórica do Filme Lubrificante

Para calcular a espessura mínima do filme de óleo lubrificante é usada a Equação 2.6 conforme visto no tópico 2.2.1, considerando os mesmos parâmetros de ensaio usados

por Vittorino (2022), sendo esses uma velocidade linear de deslizamento de 0,33 m/s para que o regime de lubrificação seja hidrodinâmico, uma carga fixa de 2004,18 N, o raio do corpo de provas igual a 0,01725 m, como visto na Figura 3.2 e uma viscosidade dinâmica de 0,130644012 Pa.s. Obteve-se um valor de espessura teórica de filme lubrificante h_{min} de aproximadamente 4,56 μm .

3.2.2. Determinação da Capacitância Teórica do Sistema

Como visto no tópico 2.4.2, a capacitância de um capacitor é proporcional à geometria das placas. No sistema de ensaio de desgaste por deslizamento do tipo bloco-sobre-anel para o caso conforme, a geometria do conjunto capacitivo é equivalente à geometria de um capacitor cilíndrico, porém limitado pelo ângulo α em radianos.

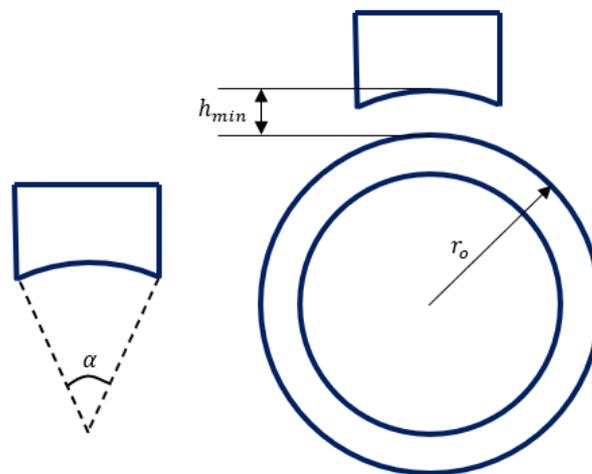


Figura 3.6 – Parâmetros da geometria do conjunto capacitivo corpo de prova mais contracorpo (fonte: autor)

A área (A) das placas do capacitor nessa situação é dada pela Equação 3.1 abaixo.

$$A = \frac{\alpha}{180} \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad (3.1)$$

Onde r é o raio médio entre o externo do anel e o raio do arco de circunferência do corpo de prova e L é a espessura do corpo de prova. Substituindo a Equação 2.7 na Equação 2.8 e resolvendo a integral da Equação 2.8, tem-se que:

$$q = k \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot A \quad (3.2)$$

Substituindo a Equação 3.1 na Equação 3.2 e isolando o campo elétrico (\vec{E}), obtém-se a Equação 3.3.

$$\vec{E} = \frac{180 \cdot q}{k \cdot \epsilon_0 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot r \cdot L} \quad (3.3)$$

Substituindo \vec{E} da Equação 3.3 na equação 2.10, e como o sentido de integração do corpo de prova para o anel, portanto considera-se que $ds = -dr$ tem-se:

$$V = \int_{r_1}^{r_0} -\frac{180 \cdot q}{k \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot r \cdot L} dr \quad (3.4)$$

Onde r_0 é o raio externo do anel e r_1 é o raio do arco de circunferência do corpo de prova. Resolvendo a integral:

$$V = \frac{180 \cdot q}{k \cdot \varepsilon_0 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot L} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) \quad (3.5)$$

Finalmente substituindo a Equação 3.2 e a Equação 3.5 na Equação na Equação 2.10, tem-se que a capacitância teórica do sistema é dada pela Equação 3.6

$$C = \frac{\alpha \pi k \varepsilon_0 L}{180 \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \quad (3.6)$$

Os valores dimensionais de r_0 e r_1 são iguais, como visto nas Figuras 3.2 e 3.3, mas visto que durante o ensaio haverá uma camada de filme lubrificante de espessura h_{min} entre o corpo de prova e o contracorpo, para o cálculo da capacitância teórica do sistema presente poderá ser considerado que o raio r_1 igual ao raio r_0 mais h_{min} , tendo então a Equação 3.7 para encontrar a capacitância teórica do sistema.

$$C = \frac{\alpha \pi k \varepsilon_0 L}{180 \ln\left(\frac{r_0 + h_{min}}{r_0}\right)} \quad (3.7)$$

O ângulo α pode ser encontrado com a relação trigonométrica abaixo.

$$\frac{\alpha}{2} = \sin^{-1}\left(\frac{l/2}{r_0}\right) \quad (3.8)$$

Onde l é a largura do corpo de prova. Para um óleo lubrificante derivado de petróleo considera-se uma constante de permissividade elétrica $k = 2,3$, da Figura 3.2 tem-se que r_0 , L e l .

Tabela 3.1 – Parâmetro Parâmetros da geometria do conjunto capacitivo corpo de prova mais contracorpo.

r_0	L	l	α
17,50 mm	6,35 mm	15,75 mm	53,487°

Substituindo os valores acima e o valor de h_{min} encontrado no tópico anterior na Equação 3.7, obtém-se uma capacitância teórica do sistema de 46,33 nF.

3.2.3. Dimensionamento dos Componentes Eletrônicos do Circuito

A partir da capacitância teórica encontrada no tópico acima é feito o dimensionamento dos componentes do circuito do sensor. Com a Equação 2.12, encontra-se a impedância capacitiva teórica do sistema, mas para isso é necessário saber também a frequência de excitação do circuito, ou seja, a frequência do sinal elétrico que alimenta o circuito. Considerando uma frequência de excitação do sensor $f=14$ Hz (Santos, 2009), a impedância capacitiva teórica do sistema é de 245,35 k Ω , a partir desse valor os resistores R1, R2 e R3 e o Capacitor C2 mostrados na Figura 2.11 foram dimensionados empiricamente por meio de simulações, como será mostrado no tópico 3.2.4.

Como descrito no tópico 2.4.2, um diodo será utilizado para retificar o sinal do circuito, para isso foi escolhido um diodo 1N4007, que é um modelo amplamente disponível comercialmente.

O sinal de saída do sensor passará por um filtro ativo passa-baixa de primeira ordem, cuja malha está destacada na Figura 3.7, afim de atenuar possíveis ruídos no sinal.

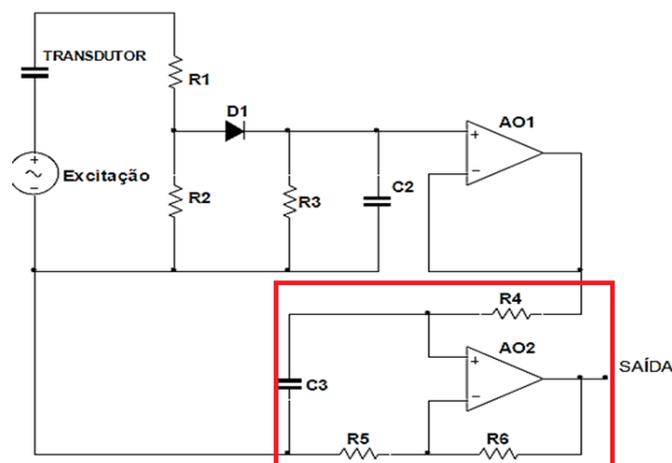


Figura 3.7 – Circuito do filtro ativo passa-baixa de primeira ordem (adaptado de Santos, 2009).

Este filtro pode ser projetado seguindo o passo a passo descrito por Pertence Jr (2015): Primeiramente é estabelecido o valor do ganho de tensão (A_v), que diz respeito à quantas vezes o sinal de saída será maior que o sinal de entrada do filtro. Para este projeto foi escolhido arbitrariamente um ganho $A_v = 5$. Em segundo lugar escolhe-se a frequência de corte (f_c), que para o projeto desse filtro foi determinada $f_c = 170$ Hz, ou seja, cerca de 12 vezes a frequência de excitação do circuito, conforme o trabalho de Santos (2009), dessa forma todo ruído presente no sinal com frequência acima de 170 Hz será atenuado. A partir de f_c é determinado o valor da capacitância do capacitor C3 conforme a Equação 3.9.

$$C = \frac{10}{f_c} \quad (3.9)$$

Então o valor das resistências dos resistores R4, R5 e R6 são determinados pela Equação 3.10, pela Equação 3.11 e pela Equação 3.12 respectivamente.

$$R4 = \frac{1}{b \cdot \omega_c \cdot C} \quad (3.10)$$

Onde ω_c é a frequência angular correspondente a frequência de corte, dada pela multiplicação de f_c por 2π e b é um parâmetro usado para determinar o tipo de resposta em frequência para filtros de ordem ímpar maior ou igual a três. Como o filtro em questão é de primeira ordem, $b = 1$.

$$R5 = \frac{A_v}{A_v - 1} R4 \quad (3.11)$$

$$R6 = A_v \cdot R4 \quad (3.12)$$

Os valores encontrados são valores teóricos aproximados que não são encontrados comercialmente, portanto são escolhidos resistores e capacitores disponíveis comercialmente com os valores de resistência e capacitância mais próximos dos encontrados, como mostra a Tabela 3.2

Tabela 3.2 – Valores dos componentes do filtro ativo passa-baixa do sistema.

	C3	R4	R5	R6
Valor teórico calculado	58,80 nF	16,72 kΩ	20,90 kΩ	83,59 kΩ
Valor mais próximo disponível comercialmente	56 nF	16 kΩ	20 kΩ	82 kΩ

CAPÍTULO IV

4. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 4.1 mostra a simulação do filtro ativo passa-baixa projetado no tópico anterior e a Figura 4.2 mostra o diagrama de Bode que representa a resposta em frequência do filtro.

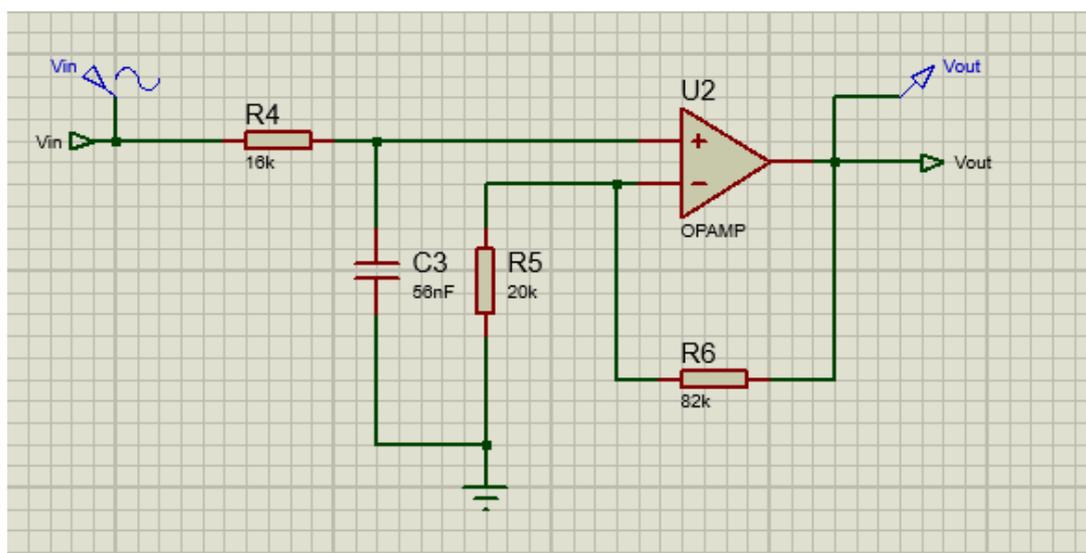


Figura 4.1 – Desenho esquemático da simulação do circuito do filtro ativo passa-baixa (fonte: o autor).

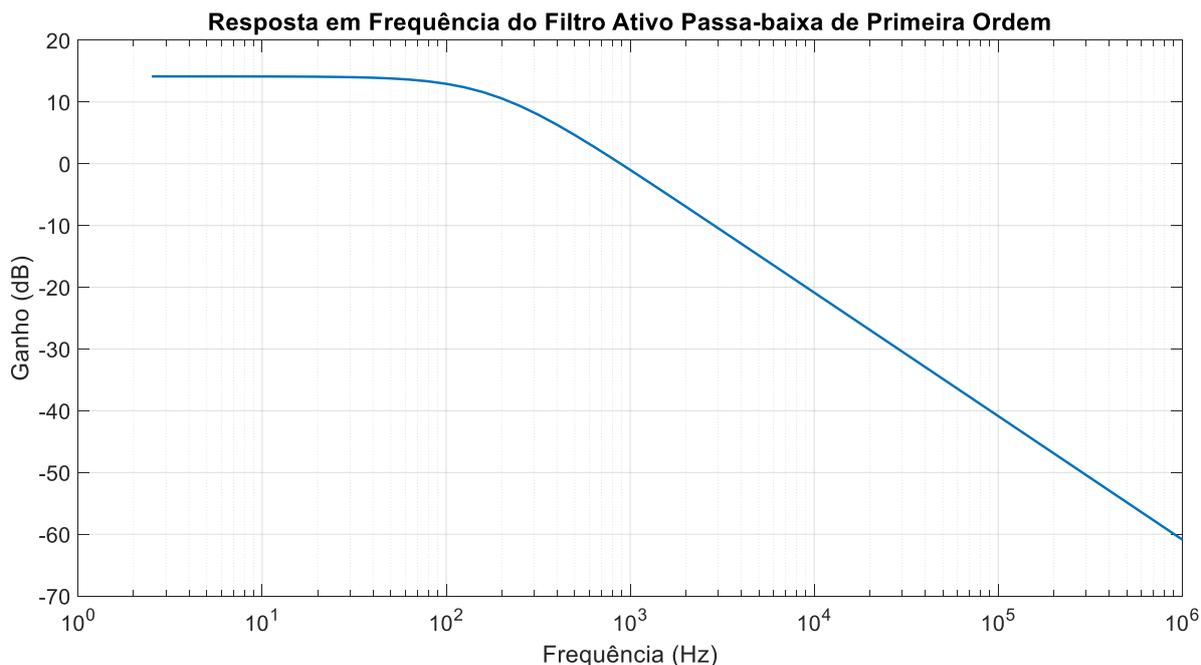


Figura 4.2 – Diagrama de Bode do filtro ativo passa-baixa (fonte: o autor).

Pertence Junior (2015) mostra que o ganho máximo de um filtro ativo é dado pela Equação 4.1 e que a frequência de corte do filtro pode ser encontrada no diagrama de Bode no ponto 3 dB abaixo do ganho máximo.

$$A_{m\acute{a}x} = 20 \cdot \log(A_v) \quad (4.1)$$

A partir da Equação 3.13, encontra-se um ganho máximo teórico de 13,98 e analisando a Figura 3.13, nota-se que o ganho máximo se encontra um ganho máximo no gráfico de 14,20 e uma frequência de corte de 180 Hz, portanto a simulação realizada apresenta uma aproximação satisfatória dos valores teóricos calculado.

A Figura 4.3 mostra a simulação do circuito do filtro ativo no *software* Proteus, onde foram feitas leituras dos valores de tensão nos pontos de saída do filtro, entre a saída do amplificador operacional AO1 e a entrada do filtro ativo, no capacitor C2 e no resistor R2. As tensões são mostradas no gráfico da Figura 4.4. Analisando as tensões no gráfico, são encontrados os valores de tensão mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de tensão medidas em diferentes pontos do circuito.

Amplitude da Tensão em R2	619,00 mV
Tensão em C2	430,00 mV
Tensão na saída AO1	973,00 mV
Tensão de saída V_{out}	4,79 V

Ao substituir na Equação 2.19 os valores projetados R1, R2, f e a capacitância teórica calculada na Equação 3.7, encontra-se um valor de tensão $V_{R2} = 585,14$ mV, ao comparar esse valor com a tensão medida na simulação, obtém-se um erro de aproximadamente 5,47%.

Isolando-se a capacitância na Equação 2.19 e substituindo nela os valores de R_1 , R_2 , V_{R2} , V_{in} e f encontra-se um valor de $C = 48,98$ nF que seria medido pelo sensor. Comparando esse valor com o valor da capacitância calculado no tópico 3.2.2 obtém-se um erro de aproximadamente 5,40%.

A partir deste valor de capacitância, ao isolar h_{\min} na Equação 3.7, foi encontrada uma espessura de aproximadamente $4,32$ μm e comparando esse valor com o valor da espessura calculada no tópico 3.2.1, obtém-se um erro de aproximadamente 5,26%.

Ao substituir os valores de f , f_c , A_v e $V_{in} = 973$ mV na Equação 3.22, encontra-se um valor de tensão de saída $V_{out} = 4,85$ V. Comparando esse valor com o valor de V_{out} da simulação, obtém-se um erro de aproximadamente 1,24 %.

Tabela 4.2 – Comparação dos valores teóricos calculados com os valores encontrados na simulação.

	Valor Teórico	Valor Simulado	Erro (%)
V_{R2}	585,14 mV	619,00 mV	5,47
C	46,33 nF	48,98 nF	5,40
h_{\min}	4,56 μm	4,32 μm	5,26
V_{out}	4,85 V	4,79 V	1,24

Esses valores de erros podem ser atribuídos às diferenças de aproximações dos métodos de cálculos computacionais utilizados pelo *software* de simulação e também ao fato de que o *Proteus* mostra nos gráficos gerados valores inteiros aproximados, que quando são utilizados nos cálculos também podem levar à essa diferença de resultados.

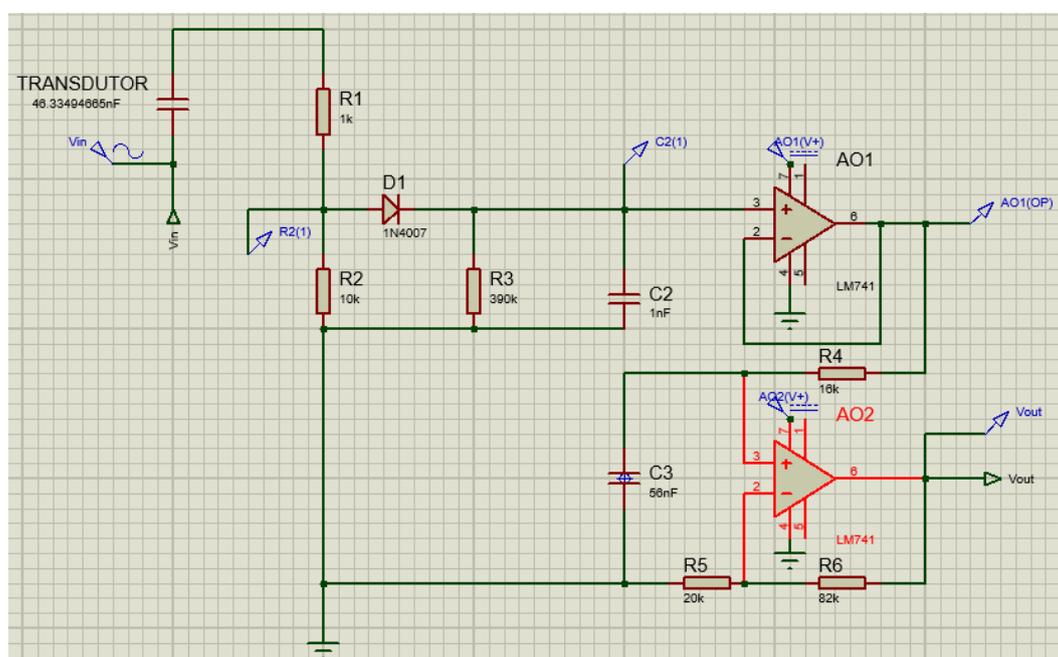


Figura 4.3 – Desenho esquemático da simulação do sensor capacitivo com o filtro ativo (fonte: o autor).

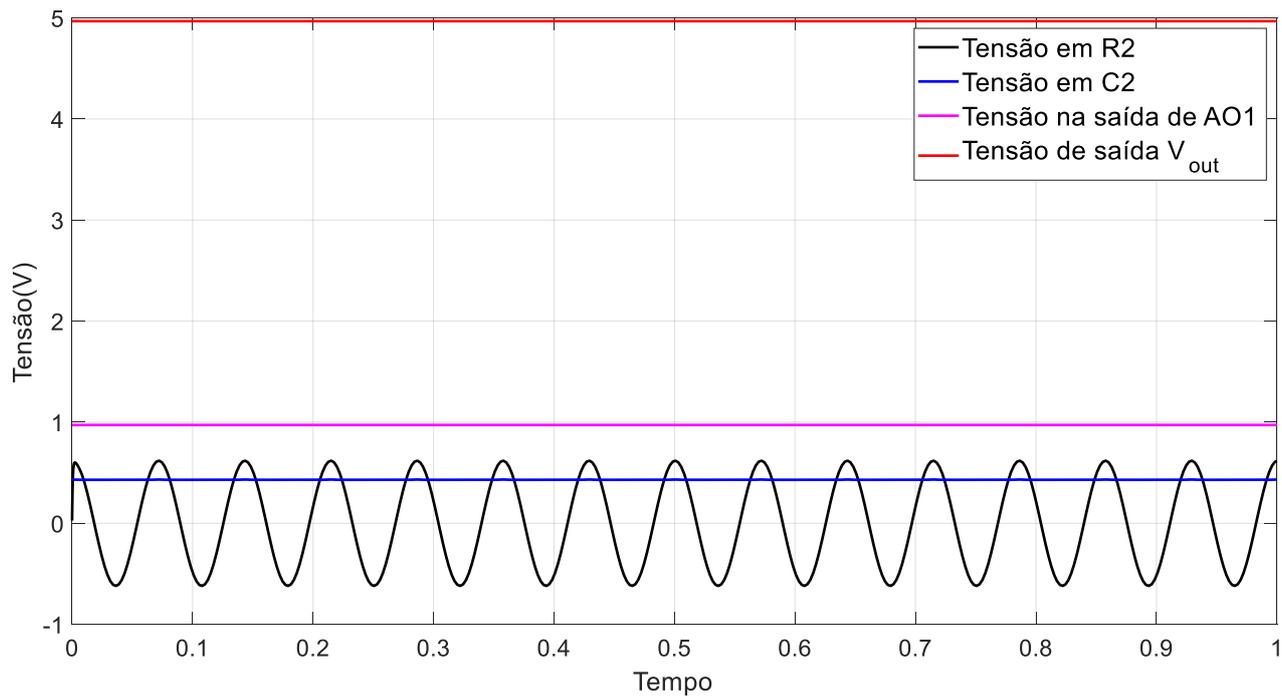


Figura 4.4 – Leituras de tensão nos pontos de saída do filtro, entre a saída do amplificador operacional AO1 e a entrada do filtro ativo, no capacitor C2 e no resistor R2 do circuito do sensor (fonte: o autor).

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista os valores baixos dos erros encontrados nas comparações entre os valores teóricos encontrados e medias das tensões no resistor R2 e de saída (V_{out}) e nos cálculos da capacitância C e da espessura mínima do filme lubrificante (h_{min}) a partir dessas medidas, como visto na Tabela 4.2, pode-se concluir que os resultados das simulações são satisfatórios. Portanto, sensor projetado apresenta ser uma opção viável para a medição da capacitância do conjunto corpo de prova e contracorpo e a partir disto estimar a espessura da camada de óleo lubrificante presente entre as partes do ensaio de desgaste por deslizamento.

O sensor é capaz de medir capacitâncias da ordem de grandeza de nF, como é mostrado nas simulações, e com essas medidas é possível estimar o valor da espessura de camadas de filme de óleo lubrificante inferiores a 10 μm , com aproximadamente cinco por cento de erro. O sensor capacitivo mostra ser uma alternativa em relação ao sensor ultrassônico que também consegue medir espessuras de filme de lubrificante inferiores a 10 μm , mas apresenta limitações nas medições da espessura de camadas que sejam superiores a esse valor em algumas situações e sua modelagem é mais complexa.

Para que seja possível implementar esse sistema no equipamento de ensaios, é necessário garantir que a amostra e o anel estejam eletricamente isolados. Isso é necessário para que não existam efeitos de capacitância estática do sensor, que podem fazer com que o circuito se torne não linear o que o deixaria sua modelagem seria mais difícil, e capacitâncias parasitas do sistema, que se tornariam ruídos na leitura do sinal de saída.

CAPÍTULO VI

6. TRABALHOS FUTUROS

A partir dos estudos realizados nessa dissertação, sugere-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Projeto de isolamento elétricos do equipamento de testes bloco sobre anel e construção para implementação do sensor capacitivo neste equipamento e levantamento da sua curva de calibração;
- Avaliar diferentes placas de aquisição de dados, como os modelos da National Instruments, para serem utilizadas em conjunto com o sensor proposto neste trabalho;
- Avaliação da espessura de filme lubrificante no ensaio bloco-sobre-anel em amostras com diferentes tipos de texturização utilizando o sensor capacitivo para realizar a medição desta espessura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOYLESTAD, Robert L. Introdução à Análise de Circuitos. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

BUDINAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10. ed. PortoAlegre: McGraw Hill, 2016.

DOU, P; JIA, Y; ZHENG, P; WU, T; YU, M; REDDYHOFF, T; PENG, Z. Review of ultrasonic-based technology for oil film thickness measurement in lubrication, *Tribology International*, Volume 165, 2022.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2012 vol 3;

HOLMBERG, K., ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction* **5**, 263–284 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. [s.l.] Elsevier, 2017.

JOST, H. P. Lubrification (Tribology) – A Report on the present position and industry's needs. London, Department of education and science: 1-79, 1966.

MALVINO, Albert P.. Eletrônica Volume I. São Paulo: Makron Books, 1997.

MALVINO, Albert P.. Eletrônica Volume II. São Paulo: Makron Books, 1997.

PERTENCE JR, A. Amplificadores e filtros ativos: eletrônica analógica [recursos eletrônicos]. 8. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2015.

RODRIGUES, T. A.; TONIELLO, I. Z. O; VITTORINO, A. A. O. F; SILVA JUNIOR, W. M. Topographic Characterization and Tribological Analysis Of Partial And Total Textured Surfaces. **Proceedings of the 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, Uberlândia, Brazil, 2019.

RODRIGUES, T. A. **Efeito do Controle da Topografia na Eficiência de Contatos Lubrificados: Avaliação Experimental**. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SANTOS, Germano Ferreira; DOS SANTOS, Marcelo Braga. Proposta de um Sensor de Medição de Espessura de Filme de Óleo Lubrificante em Ensaios de Mancais. **IX Encontro Interno e XIII Seminário de Iniciação Científica PIBIC-UFU, CNPq & FAPEMIG**, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

STOLARSKI, T. A. MSc, PhD, DSc, DIC, CEng, MIMechE, in *Tribology in Machine Design*, 1990.