

**MARCO AURÉLIO DE FREITAS SANTOS
JÚNIOR**

**INFLUÊNCIA DO CONTROLE DE
TEMPERATURA EM ENSAIOS DE DESLIZAMENTO
LUBRIFICADO DE SUPERFÍCIES CONFORMES**



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

2021

MARCO AURÉLIO DE FREITAS SANTOS JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DO CONTROLE DE
TEMPERATURA EM ENSAIOS DE DESLIZAMENTO
LUBRIFICADO DE SUPERFÍCIES CONFORMES**

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

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior

UBERLÂNDIA-MG

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
 Rodovia BR 050, KM 78, Bloco 1D, 2º andar - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 2512-6773 - www.mecanica.ufu.br - cocme@ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	FEMEC41100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	08/12/2021	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	11711EMC055				
Nome do Discente:	Marco Aurélio de Freitas Santos Júnior				
Título do Trabalho:	INFLUÊNCIA DO CONTROLE DE TEMPERATURA EM ENSAIOS DE DESLIZAMENTO LUBRIFICADO DE SUPERFÍCIES				

Reuniu-se, em ambiente virtual, com acesso pelo link <https://us02web.zoom.us/j/84551522220?pwd=VUIReURyR3djRXhXc1BMV09ZZzlkQT09>, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, em 08/12/2021, assim composta: Dr. Túlio Alves Rodrigues – Universidade Federal de Uberlândia/UFU; Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva – Faculdade de Engenharia Mecânica FEMEC/UFU e Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior – Faculdade de Engenharia Mecânica FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Washington Martins da Silva Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente 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):

(x) 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 **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/12/2021, às 10:32, 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 **Túlio Alves Rodrigues, Usuário Externo**, em 08/12/2021, às 10:32, 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 **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/12/2021, às 10:32, 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 **3232150** e o código CRC **5F410AC6**.

“Todas as conquistas começam com o simples ato de acreditar que elas são possíveis”.

Autor: Desconhecido

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a minha família, ao meu pai Marco Aurélio, à minha mãe Adriana e minha irmã Jéssica, pelo total apoio, ajuda e compreensão, durante a minha formação acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Washington, pela paciência e orientação que levaram a realização deste trabalho. Ao amigo Alessandro Augusto Olímpio Ferreira Vittorino, do Laboratório de Tribologia de Materiais, por todos os incentivos, conhecimentos e ajudas durante a realização do trabalho.

Ao doutorando Túlio Alves Rodrigues pelo apoio incondicional principalmente nessa fase final do trabalho.

Ao doutorando Paulo Lourenço Monteiro Junior pela confecção das amostras utilizadas nesse trabalho e pelo apoio técnico ao longo do desenvolvimento do projeto.

A coordenação do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Engenharia Mecânica da UFU, pela brilhante condução desse curso e pela oportunidade de realização desse Projeto de fim de curso.

As agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo financiamento desse e de demais pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Tribologia e Materiais

Resumo

A utilização de fluido lubrificante atua diretamente na diminuição do atrito e do desgaste entre superfícies sólidas animadas de em movimento relativo através da separação parcial ou completa das superfícies. Essa ideia não é nova, uma vez que são encontrados registros que remontam ao Egito antigo sobre a utilização de substâncias oleaginosas com a finalidade de reduzir o atrito entre os blocos de pedras usados na construção das pirâmides. A eficiência da lubrificação de um óleo é influenciada por suas propriedades, como, por exemplo a sua composição, consistência e atividade de superfície. Porém, o fator fundamental para o estudo do desempenho e eficiência de lubrificantes é a compreensão das características do sistema tribológico. A temperatura está diretamente relacionada à viscosidade do fluido lubrificante, que influencia o comportamento tribológico de sistemas lubrificados. O presente trabalho tem como objetivo analisar o efeito da refrigeração do fluido lubrificante no desempenho de ensaios lubrificados do tipo bloco sobre anel. Para refrigerar o fluido, o sistema de aquecimento do fluido lubrificante do tribômetro Falex® block on ring foi adaptado para funcionar como radiador, evitando assim o aquecimento do fluido lubrificante. Foram realizados ensaios de deslizamento lubrificado, em amostras conformes de aço ABNT 1045 com cargas 49,05 N e 98,1 N, na presença do sistema de refrigeração. Importante ressaltar que os ensaios feitos durante o trabalho têm como principal referência os sistemas mecânicos que utilizam mancais hidrodinâmicos. O presente trabalho mostrou que a refrigeração do fluido lubrificante reduziu o coeficiente de atrito em 28,26 % e 62,76 % para as cargas de 49,05 N e 98,1 N respectivamente. Portanto, a redução da temperatura resultou em uma maior viscosidade do fluido lubrificante, reduzindo o contato de asperezas da amostra e do anel.

Abstract

The use of lubricating fluid acts directly in reducing friction and wear between animated solid surfaces of relative motion through partial or complete separation of surfaces. This idea is not new, since records dating back to ancient Egypt on the use of oilseed substances are found in order to reduce friction between the blocks of stones used in the construction of pyramids. The lubrication efficiency of an oil is influenced by its properties, such as its composition, consistency and surface activity. However, the fundamental factor for the study of lubricant performance and efficiency is the understanding of the characteristics of the tribological system. Temperature is directly related to the viscosity of the lubricating fluid, which influences the tribological behavior of lubricated systems. The present work aims to analyze the effect of lubricant fluid cooling on the performance of lubricated block-on-ring tests. To cool the fluid, the heating system of the lubricant fluid of the Tribometer Falex® block on ring has been adapted to function as a radiator, thus preventing the heating of the lubricating fluid. Lubricated sliding wear tests were performed on ABNT 1045 compliant steel samples with loads 49.05 N and 98.1 N, in the presence of the refrigeration system. It is important to highlight that the tests performed during the work have as main reference the mechanical systems that use hydrodynamic bearings. The present work showed that the cooling of the lubricating fluid reduced the coefficient of friction by 28.26% and 62.76% for the loads of 49.05 N and 98.1 N, respectively. Therefore, the temperature reduction resulted in a higher viscosity of the lubricating fluid, reducing the contact of sample and ring roughness.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1: CONTATOS CONFORMES: (A) PLANOS OPOSTOS DESLIZANDO; (B) MANCAL DE DESLIZAMENTO RADIAL (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017A).....	3
FIGURA 2-2: CONTATOS NÃO CONFORMES: (A) DENTES DE ENGRENAGENS, (B) CAME E SEGUIDOR (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017A).....	4
FIGURA 2-3: TIPOS DE MOVIMENTOS RELATIVOS DE SUPERFÍCIES: (A) ROLAMENTO E (B) DESLIZAMENTO (ADAPTADO)	4
FIGURA 2-4: MECANISMOS MICROSCÓPICOS RELACIONADOS AO FENÔMENO DO ATRITO PARA SUPERFÍCIES METÁLICAS: (A) ADESÃO, (B) DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E (C) PRESENÇA DE TERCEIRO CORPO NA INTERFACE DE CONTATO. ADAPTADO DE INTERNATIONAL (1992).	6
FIGURA 2-5: TIPOS DE TESTES DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO: A) DISCO-DISCO B) FACE-FACE C) PINO-DISCO C) PINO-DISCO LATERALMENTE E) BLOCO-DISCO F) PINO-PLANO (HUTCHINGS, 1992).	8
FIGURA 2-6: REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO: (A) HIDRODINÂMICO; (B) MISTO; (C) LIMÍTROFE. HAMROCK E SCHMID (2004) (ADAPTADO).	9
FIGURA 2-7: CURVAS DE STRIBECK EM FUNÇÃO DE λ . (FARIAS, 2011)	10
FIGURA 2-8: DOIS PLANOS DENTRO DO FLUIDO, MOVENDO-SE RELATIVAMENTE COM VELOCIDADE v_0 SEPARADOS POR UMA DISTÂNCIA h (A). O GRÁFICO DO GRADIENTE DE VELOCIDADE (B). (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)	12
FIGURA 2-9: A VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA COM A TEMPERATURA PARA DOIS FLUIDOS (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).	14
FIGURA 2-10: TEMPERATURAS MÉDIAS DE ENSAIOS EM REGIME PERMANENTE: (A) 216,92 N; (B) 314,99 N. (RODRIGUES, 2018).	15
FIGURA 3-1: ESQUEMA DO ENSAIO BLOCO SOBRE ANEL, COM CORPO DE PROVA CONFORME, SEM REFRIGERAÇÃO.....	18
FIGURA 3-2: ESQUEMA DO ENSAIO BLOCO SOBRE ANEL, COM CORPO DE PROVA CONFORME, COM REFRIGERAÇÃO.....	19
FIGURA 3-3: CALIBRAÇÃO, TRIBÔMETRO FALEX® BLOCK ON RING TEST MACHINE.	20
FIGURA 3-4: DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA.....	21
FIGURA 3-5: PROPRIEDADES DO ÓLEO HIDRÁULICO BP68. (RODRIGUES, 2018)	23
FIGURA 3-6: ADAPTAÇÃO DO SUPORTE FALEX®.	24
FIGURA 3-7: CURVAS DE CALIBRAÇÃO DA TEMPERATURA: (A) AMOSTRA E (B) CÂMARA.	26
FIGURA 4-1 COEFICIENTE DE ATRITO PARA OS ENSAIOS COM CARGAS DE 49,05 N E 98,1 N: (A) SEM RESFRIAMENTO E (B) COM RESFRIAMENTO.	28
FIGURA 4-2: TEMPERATURA DA AMOSTRA: SEM REFRIGERAÇÃO (A) E COM REFRIGERAÇÃO (B), PARA CARGAS DE 49,05 N E 98,1 N E TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO (C), PARA O ENSAIO COM REFRIGERAÇÃO.	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: TESTE DAS SUBSTÂNCIAS ABRASIVA EM RELAÇÃO AO TEMPO.....	21
TABELA 2: PARÂMETROS SELECIONADOS PARA O ENSAIO TRIBOLÓGICO.....	27
TABELA 3: MÉDIA ARITMÉTICA DOS DADOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS COM E SEM REFRIGERAÇÃO.....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. ATRITO.....	4
2.1.1. Presença de terceiro corpo	5
2.1.2. Adesão.....	5
2.1.3. Deformação.....	6
2.2. DESGASTE.....	7
2.2.1. Desgaste por deslizamento	7
2.3. REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO.....	8
2.4. CURVA DE STRIBECK.....	10
2.4.1. Viscosidade.....	11
2.4.2. Influência da temperatura na viscosidade	13
2.4.3. Influência da velocidade.....	15
3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	17
3.1. EQUIPAMENTOS E ANÁLISES.....	17
3.1.1. Equipamentos utilizados nos ensaios (Tribômetro Falex®)	17
3.2. MATERIAIS E PREPARAÇÃO SUPERFICIAL.....	20
3.3. PROPRIEDAS DO ÓLEO LUBRIFICANTE	22
3.4. SUPORTE PARA O CORPO DE PROVA.....	23
3.5. calibração da aquisição das Temperaturas	25
4. RESULTADOS E DISCUSÕES	27
4.1. ENSAIO TRIBOLÓGICO BLOCO SOBRE ANEL.....	27
4.1.1. Coeficiente de Atrito	27
4.1.2. Temperatura.....	29
5. CONCLUSÕES	33
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	34
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Tribologia pode ser definida como a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo. Essa ciência recente, tem como um de seus principais objetivos a análise de fenômenos relacionado ao atrito, lubrificação e desgaste de sistemas que operam com dois corpos em movimento relativo. Desse modo, permite compreender a interação entre as superfícies e propor soluções para problemas fundamentais (TALA-IGHIL; FILLON; MASPEYROT, 2011).

O fluido lubrificante pode atuar diretamente na diminuição do atrito e do desgaste entre superfícies sólidas quando estão em contato e movimento relativo, através da separação parcial ou completa dessas superfícies. Essa ideia não é nova, uma vez que são encontrados registros que remontam ao Egito antigo sobre a utilização de substâncias oleaginosas com a finalidade de reduzir o atrito entre os blocos de pedras usados na construção das pirâmides. (RADI, 2007).

A eficiência de um fluido lubrificante depende de suas propriedades, como por exemplo a sua composição, viscosidade e atividade de superfície. Porém, o fator fundamental para o estudo, cujo objetivo é buscar melhorar a eficiência, é a compreensão das necessidades do sistema tribológico .

São fatores influentes para o desempenho de sistemas lubrificadas: a geometria das superfícies de contato; textura e rugosidade dessas superfícies; natureza do contato de rolamento versus deslizamento; carga de contato, pressão e temperatura do ambiente, outras condições ambientais, composição do material e as propriedades das camadas da superfície. Dessa maneira os parâmetros tribológicos que normalmente definem um ambiente de lubrificação são o atrito, a viscosidade do lubrificante, a velocidade relativa e a carga do equipamento (CARLOS, 2021).

Dessa forma, o objetivo desse trabalho de pesquisa é demonstrar o efeito do controle da temperatura no desempenho de fluidos lubrificantes. Foi recuperado e adaptado um sistema de refrigeração de lubrificante que opera em um teste de desgaste por deslizamento. Esse teste é instrumentado e permite o monitoramento do atrito e da temperatura durante o ensaio.

Para uma melhor visualização das análises do regime lubrificante, foi apresentado em forma de gráfico os parâmetros que caracterizam esse regime. O gráfico, mais conhecido como curva de Stribeck, ilustra o regime lubrificante em três regimes de lubrificação, a saber: regime hidrodinâmico, regime misto e regime limítrofe. As ordenadas do gráfico correspondem ao coeficiente de atrito em condições de regime permanente e a abcissa é representado pelo número de Hersey, que está em função de viscosidade do fluido, velocidade e carga.

Para a tribologia, um dos regimes fundamentais é a lubrificação hidrodinâmica. Pois, esse tipo, de lubrificação ocorre quando duas superfícies em movimento relativo são separadas completamente por uma película de um fluido, reduzindo o coeficiente de atrito e o desgaste entre as superfícies analisadas.

O presente trabalho tem como objetivo principal utilizar um aparato com o intuito de diminuir a temperatura do fluido e, conseqüentemente, reduzir o coeficiente de atrito, para as condições do contato bloco sobre anel com superfície conforme.

Uma vez que, observado o trabalho de Rodrigues (2018), no desgaste bloco sobre anel (não conforme), no qual utilizou superfícies texturizadas para melhorar o desempenho tribológico, os ensaios analisados resultaram em temperaturas elevadas. Dessa forma, modificando a geometria (conforme) das amostras e tendo um controle da temperatura do fluido, apresentará melhores condições e resultados do sistema.

De acordo com Profíto (2010), o entendimento do efeito da viscosidade em relação a temperatura é importante, uma vez que, as dimensões da espessura do filme lubrificante são influenciadas pela viscosidade dinâmica.

No fluido lubrificante, existem forças de interação intermoleculares e são elas quem determinam a viscosidade. Segundo Brunetti (2008) essas forças são diretamente proporcionais, ou seja, quanto mais fortes são as interações, mais viscoso é o óleo. A temperatura influencia diretamente a viscosidade, então com o aumento da temperatura, a agitação molecular aumenta e conseqüentemente a força de interação intermoleculares reduz, diminuindo a viscosidade dinâmica (GRANJEIRO et al, 2007).

Portanto, espera-se que modificando parâmetros como, por exemplo, a geometria da peça e o controle da temperatura ajude a melhorar as condições do sistema do bloco sobre anel utilizado por Rodrigues (2018).

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A tribologia é uma ciência que estuda superfícies interativas em movimento relativo (JOST, 1990). Com essa compreensão, permite prever o comportamento de sistemas físicos que são utilizados em sistemas mecânicos como por exemplo: atrito, desgaste, lubrificação e o contato mecânico entre as superfícies, de tal forma, que é possível propor soluções para melhorar o desempenho tribológico (TALA-IGHIL; FILLON; MASPEYROT, 2011).

É comum classificar a característica do contato existente entre superfícies como conforme (Figura 2-1) e não conforme (Figura 2-2). Superfícies conforme tem um grau elevado de conformidade geométrica entre as superfícies, ou seja, distribuem melhor as tensões e são mais uniformes, o que é benéfico para mancais de deslizamento, pois, leva a formação de filmes lubrificantes mais espessos. Já as superfícies de contato não conforme apresentam baixa conformidade geométrica, ou seja, podem apresentar perfis de distribuição de tensão mais acentuados e concentrados próximo ao contato, como é o caso das engrenagens (Hamrock e Anderson, 1983; Hutchings e Shipway, 2017).

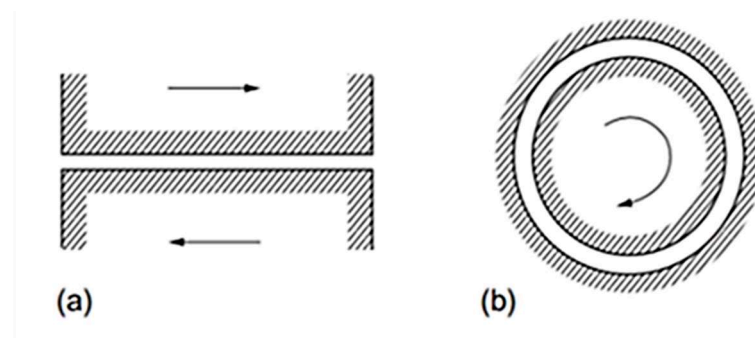


Figura 2-1: Contatos Conformes: (a) planos opostos deslizando; (b) mancal de deslizamento radial (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

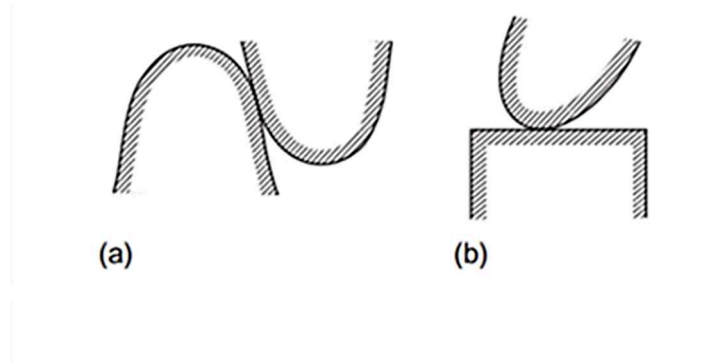


Figura 2-2: Contatos não Conformes: (a) dentes de engrenagens, (b) cames e seguidor (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a).

2.1. ATRITO

De acordo com PROFITO (2010), o atrito é genericamente utilizado para descrever e representar a dissipação de energia, onde ocorre o contato entre corpos e substância. Assim, um determinado objeto que se move em relação a outro corpo, pode-se observar que possui uma certa resistência. Em conformidade com Hutchings e Shipway (2017), essa resistência ocorre devido à força de atrito e com isso dois grupos podem ser definidos de acordo com o movimento, sendo eles: deslizamento e rolamento, que está representado na Figura 2-3.

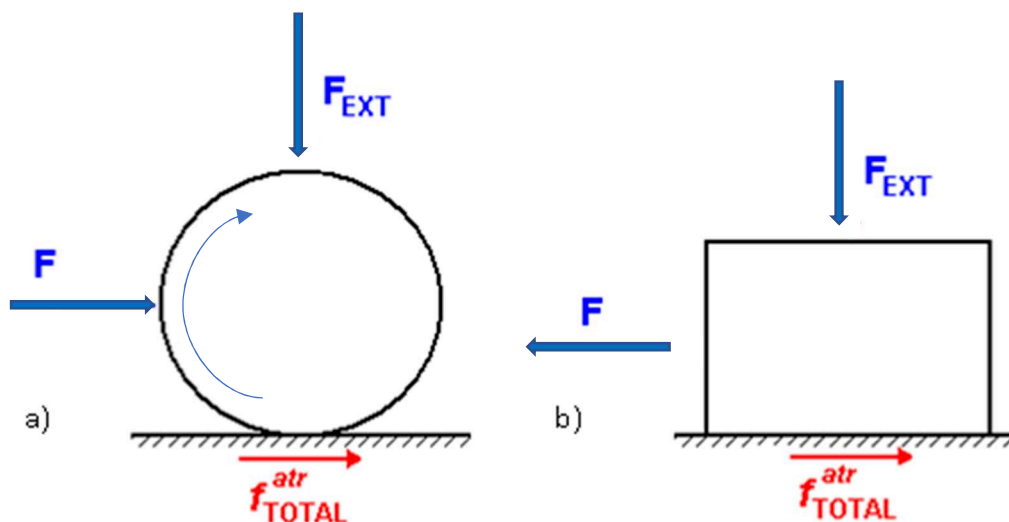


Figura 2-3: Tipos de movimentos relativos de superfícies: (a) rolamento e (b) deslizamento (adaptado)

Colomb em 1875 descreve que a força de atrito em sólidos não lubrificadas depende de três fatores: o tipo dos materiais que estão em contato, a força normal e coeficiente de atrito (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). O primeiro fator, mostra as características dos materiais, ou seja, se as superfícies estiverem “polidas” (baixa rugosidade) os objetos em contato, apresentará uma força de atrito mais elevado em relação as superfícies menos lisas (alta rugosidade). Já no segundo fator, representa a força normal aplicada na superfície onde o corpo está apoiado, dessa maneira, é influenciado pelo peso do objeto, quanto maior é a força normal, maior será a força de atrito.

Em superfícies metálicas, a ocorrência do atrito pode ser a causa dos seguintes mecanismos microscópios, como por exemplo: presença de terceiro corpo na interface de contato, adesão e deformação plástica (INTERNATIONAL, 1992).

2.1.1. Presença de terceiro corpo

Uma das causas do aumento do coeficiente de atrito pode ser relacionada com a presença de um terceiro corpo na interface de contato, isso ocorre devido ao aumento de deformações plásticas resultantes das interações destes corpos, essas partículas podem ser oriundas do próprio sistema, ocasionado pelo seu desgaste (OKTAY; SUH, 1992; SUH, 1986). Intensificando o processo de deslizamento na superfície, ocorre uma maior fragmentação de aspereza que se unem ao fragmento original, ocasionando ao aumento desse aglomerado e que posteriormente pode se separar da superfície. Kayaba e Kato (1979), explicam que esse fenômeno físico é devido ao fluxo plástico em uma aspereza que é seguido por um desprendimento da partícula originado do desgaste. Esse desprendimento é devido ao cisalhamento plástico de sucessivas camadas juntamente com a propagação de trincas de cisalhamento, possibilitando a separação do material.

2.1.2. Adesão

No desgaste adesivo, devido à pressão de contato exercida entre a rugosidade, que compõem a superfície, há forças interatômicas de atração geradas pelos átomos presentes nessa região, (LANDMAN et al., 1990). Sob as condições de atrito seco, as forças interatômicas de atração entre os átomos tem a capacidade de aderir no contato das asperezas, ou seja, o movimento relativo resulta em uma deformação plástica e conseqüentemente remove o material

de uma superfície e transfere para a outra. Podendo essa força variar de acordo com a proximidade entre as superfícies, carregamento e acabamento superficial. A adesão e transferência de material são favorecidos quando: a superfície é livre de óxidos e gases ou filmes adsorvidos; em condições de ultra vácuo e metais moles e dúcteis.

2.1.3. Deformação

Bowden e Tabor (1950), propõem que nas superfícies, as asperezas que estão em contato, podem sofrer deformações elásticas e plásticas, dessa forma, a tensão aplicada sobre as mesmas serão acomodadas. Como há uma interação entre as asperezas da superfície, ocorre a deformação plástica, resultando uma dissipação de energia. E se porventura as superfícies analisadas possuem durezas diferentes, a rugosidade oriunda da face com uma maior dureza ocasionará a formação sulcos visíveis na superfície com menor dureza (WILLIAMS, 2005).

Esses mecanismos citados anteriormente podem ser observados na representação da Figura 2-4.

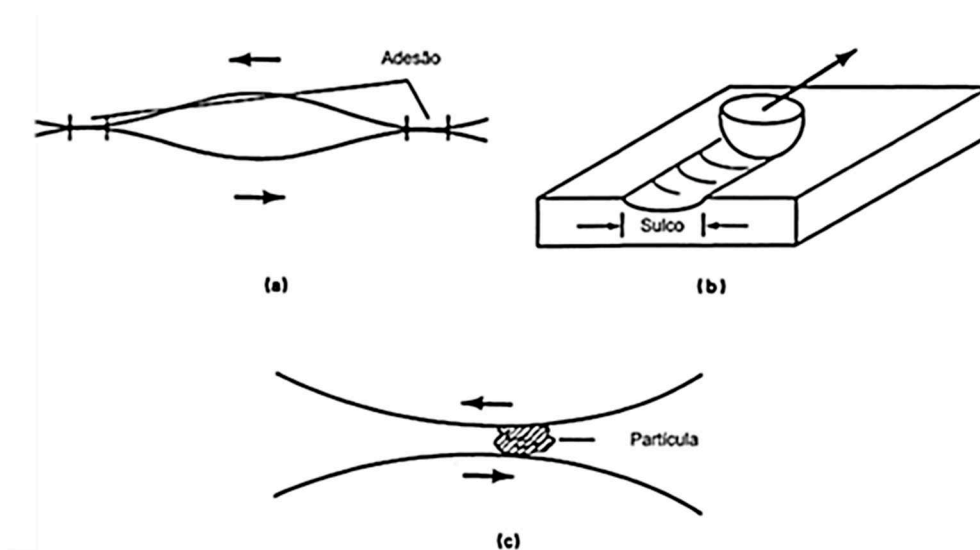


Figura 2-4: Mecanismos microscópicos relacionados ao fenômeno do atrito para superfícies metálicas: (a) adesão, (b) deformação plástica e (c) presença de terceiro corpo na interface de contato. Adaptado de International (1992).

2.2. DESGASTE

De modo geral, o desgaste pode ser definido com uma perda constante de material da superfície, que ocorre devido a interação dos movimentos entre as superfícies ou um meio no qual ela está exposta (WILLIAMS, 2005). O desgaste pode ser classificado através dos tipos de movimentos como por exemplo: deslizamento, rolamento, movimento oscilatório, impacto e movimento erosivo.

2.2.1. Desgaste por deslizamento

Pode ser definido quando duas superfícies sólidas deslizam entre si, causando danos devido a ocorrência da adesão, reação triboquímica, fadiga superficial e abrasão (ZUM GAHR, 1987). Os testes mais comuns de desgaste por deslizamento são disco sobre disco, onde o contato pode ocorrer ao longo de sua linha lateral Figura 2-5(a) ou contato face-face Figura 2-5(b), pino sobre disco, onde o contato pode ocorrer sobre a face do disco Figura 2-5(c) ou ao longo de sua linha lateral Figura 2-5(d), bloco sobre disco, onde o bloco desliza ao longo de sua linha lateral Figura 2-5(e) e pino sobre plano, onde o pino desliza ao longo de um plano Figura 2-5(f).

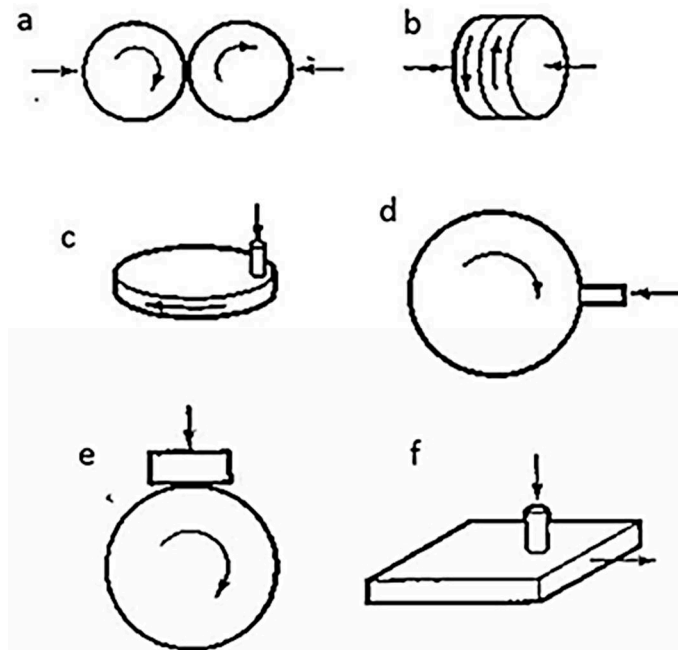


Figura 2-5: Tipos de testes de desgaste por deslizamento: a) disco-disco b) face-face c) pino-disco c) pino-disco lateralmente e) bloco-disco f) pino-plano (HUTCHINGS, 1992).

2.3. REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

O contato entre duas superfícies, os carregamentos externos que estão sendo aplicados sobre elas, são suportados pela interação das asperezas nas superfícies de contato. Devido a esse fator, a força tangencial correspondente para a iniciação do movimento relativo na interface se torna elevadas, e conseqüentemente o coeficiente de atrito, desgaste e danos superficiais, também aumentam (PROFITO, 2010; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Desse modo, a utilização de lubrificantes tem como objetivo reduzir estes esforços que são resistentes ao movimento, diminuindo as forças de resistência e as asperezas da superfície, na qual estão em contato (PROFITO, 2010).

O condicionamento de um regime lubrificado sofre a influência de determinados parâmetros como carregamento, velocidade de deslizamento, geometria de contato, propriedades do lubrificante e das características das asperezas da superfície envolvidas.

De acordo com Hamrock e Schmid (2004), para contatos conformes e não conformes é possível definir três regimes de lubrificação. No contato conforme e não conforme, Figura 2-1 e Figura 2-2, ambos são possíveis a observação de um filme contínuo separando as superfícies em um regime misto ou um regime limítrofe. No entanto, a diferença entre os contatos é que no contato não conformes é utilizado o termo lubrificação elasto-hidrodinâmica, na qual a

deformação elástica das superfícies de contato e as alterações da viscosidade do lubrificante, correlacionadas com elevadas pressões e elevadas taxas de cisalhamento geradas pelo contato, é de fundamental importância para o entendimento desse regime e do fenômeno associado, já no contato conforme o termo utilizado é lubrificação hidrodinâmica (HAMROCK; SCHMID; JACOBSON, 2004; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). No contato conforme, a lubrificação em três regimes são hidrodinâmico, mista e limítrofe, representados na Figura 2-6 respectivamente.

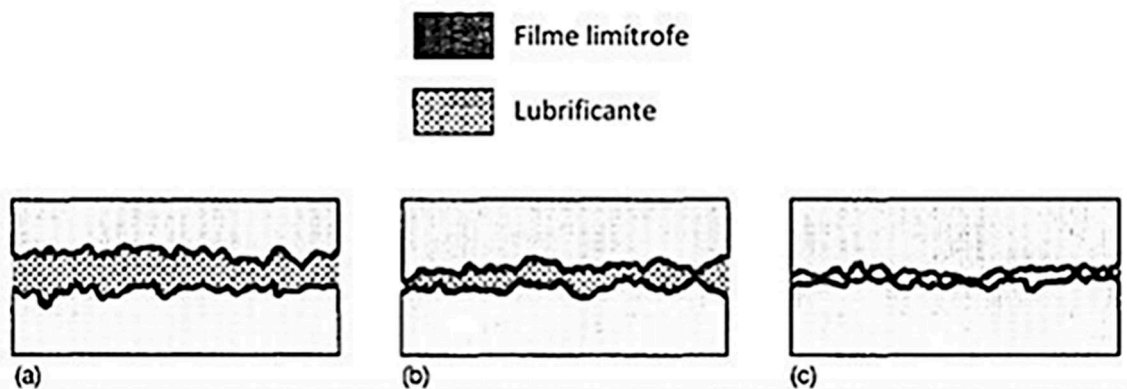


Figura 2-6: Regimes de lubrificação: (a) Hidrodinâmico; (b) Misto; (c) Limítrofe. Hamrock e Schmid (2004) (adaptado).

A seguir o detalhamento de cada um dos regimes de lubrificação do contato conforme.

- Hidrodinâmica: as superfícies com movimento relativo são separadas por uma camada de filme de fluido lubrificante, que evitam o contato entre as rugosidades da superfície. Dessa maneira, o carregamento externo é suportado pela pressão hidrodinâmica do fluido. Geralmente a magnitude das pressões geradas nesse tipo de regime não ocasionam deformações elásticas significativas, ou seja, as superfícies podem ser adotadas como rígidas e podem ser desprezadas os efeitos da pressão na viscosidade (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017a), Figura 2-6(a);
- Mista: descreve a insuficiência da separação das asperezas entre superfícies, desse modo, parte do carregamento é suportado por um file lubrificante e a outra parte é suportado pelas asperezas. Consequentemente, os níveis de atrito também serão intermediarias ao comparar com os outros dois regimes (Hidrodinâmica e Limítrofe), Figura 2-6(b);
- Limite ou limítrofe: nesse regime de lubrificação, as forças hidrodinâmicas não são suficientes para manter um filme de fluido lubrificante, devido as elevadas pressões ou baixa velocidade de deslizamento. De tal modo que o fluido lubrificante está aderindo na

interface com dimensões moleculares. Então, todo o carregamento é suportado pelo contato das asperezas e pela camada molecular tribológica formado, Figura 2-6(c).

2.4. CURVA DE STRIBECK

Para a compreensão melhor dos regimes de lubrificação, a curva de Stribeck tem como objetivo o auxílio e a compreensão das propriedades que afeta diretamente os regimes. Na Figura 2-7, mostra os tipos de regimes para contato conformes e não conformes. O eixo da ordenada do gráfico corresponde ao coeficiente de atrito (condição regime permanente), enquanto a abcissa representa a espessura do filme lubrificante sobre a rugosidade média. No entanto, a abcissa pode ser representada pela relação adimensional do número de Hersel, $H = \eta * w / P$, sendo η a viscosidade do fluido lubrificante, w a velocidade e P a carga.

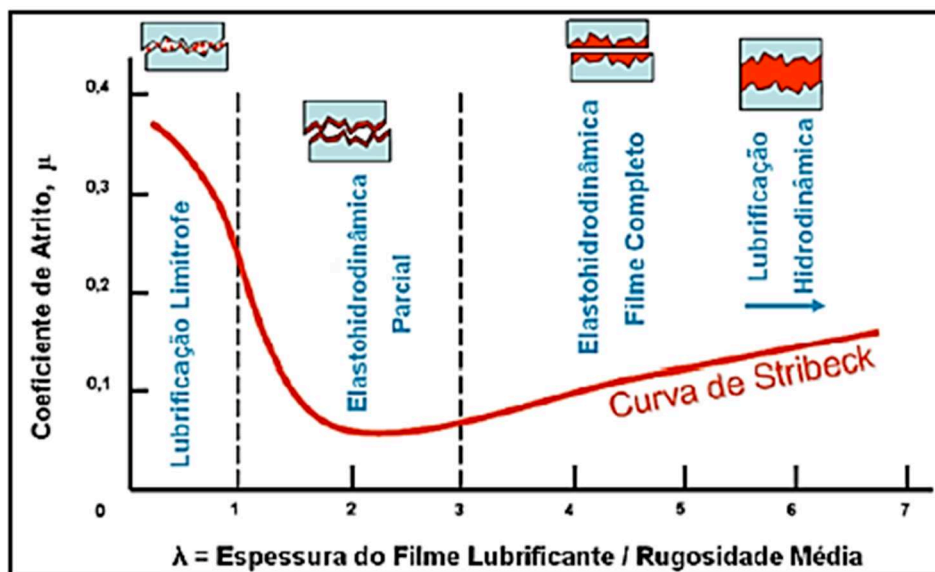


Figura 2-7: Curvas de Stribeck em função de λ . (FARIAS, 2011)

É comum a utilização de parâmetros na separação dos regimes de lubrificação, $\lambda = hmín / \sigma$, onde $hmín$ é a espessura mínima de filme lubrificante e σ o valor combinado do desvio padrão das alturas das asperezas das superfícies em contato $\sigma = (\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2})$.

Por meio desse parâmetro, podemos definir os três regimes de lubrificação para contatos conformes:

- $\lambda < 1$: Regime de lubrificação limítrofe. Nas condições de baixas velocidades e elevada carga, as características dos efeitos hidrodinâmicos são inibidas, apresentando elevados valores de coeficiente de atrito e elevado desgaste;
- $1 < \lambda < 3$: Regime de lubrificação misto. Ocorre devido ao aumento da velocidade e/ou redução da carga imposta. Nessa condição, os efeitos hidrodinâmicos são significativos, ocasionando uma separação entre as superfícies, sendo assim, uma redução no contato entre asperezas da superfície;
- $\lambda > 3$: Regime hidrodinâmico. Os efeitos hidrodinâmicos são intensificados, resultando na formação de uma camada esפה de filme lubrificante, ocasionando uma separação total das superfícies. Devido a isso, à ausência do contato de asperezas.

No entanto, os intervalos de valores de λ , do contato conforme não podem ser considerados para o tipo de contato não conforme, pois de acordo com o Zhu e Wang (2012), os valores de λ mudam.

Conforme mencionado, as principais funções do fluido lubrificante são reduzir o atrito entre as superfícies em contato, amenizar o desgaste e minimizar o calor de fricção. Os parâmetros tribológicos que geralmente definem um ambiente de lubrificação são o atrito, a viscosidade do lubrificante, a velocidade, carga do equipamento e a temperatura.

2.4.1. Viscosidade

A viscosidade fornece uma medida da resistência de um fluido ao fluxo de cisalhamento, e pode ser definida como o estresse do cisalhamento em um plano dentro do fluido, por gradiente de velocidade de unidade normal para esse plano.

A viscosidade possui um papel fundamental na determinação da forma do escoamento, sendo a responsável pelo surgimento de forças entre o fluido e os contornos sólidos de corpos que entram em contato com o escoamento.

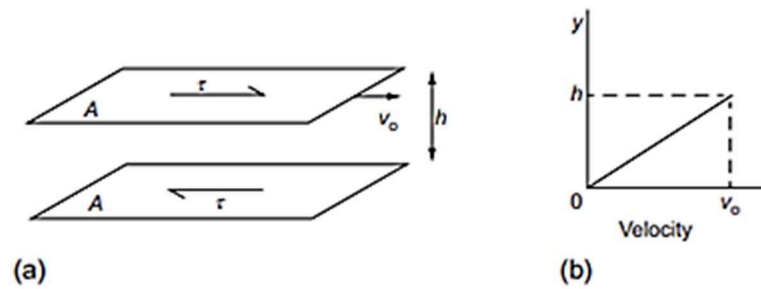


Figura 2-8: Dois planos dentro do fluido, movendo-se relativamente com velocidade v_0 separados por uma distância h (a). O gráfico do gradiente de velocidade (b). (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)

A Figura 2-8(a), ilustra duas superfícies paralelas dentro de um fluido que se movem com uma velocidade relativa v_0 . Já na Figura 2-8(b), o gradiente da de velocidade dv/dy no fluido é considerado constante e uniforme entre os dois planos e é dado pela equação:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{v_0}{h} \quad (1)$$

Sendo que a tensão de cisalhamento entre os planos é τ . Enquanto a viscosidade η é definida pela relação:

$$\tau = \eta * \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

A equação acima também pode ser descrita equivalentemente como:

$$\tau = \eta * \frac{d\gamma}{dt} = \eta * \dot{\gamma} \quad (3)$$

Na qual γ representa a deformação de cisalhamento no fluido. Segundo Hutchings e Shipway (2017), um fluido não possui resistência ao cisalhamento, ou seja, não suporta nenhuma tensão de cisalhamento estático. No entanto, a sua viscosidade possui uma tensão de cisalhamento dinâmico τ , que é proporcional ao gradiente de velocidade, de acordo com a equação 2, ou, equivalentemente, à taxa de variação da deformação de cisalhamento $\dot{\gamma}$ (taxa de cisalhamento), descrito pela equação 3. Nas equações há uma constante de proporcionalidade, sobre o qual remete a viscosidade do fluido η (tensão de cisalhamento por unidade de taxa de cisalhamento). Sendo que a viscosidade dinâmica possui dimensões de massa, comprimento e tempo.

Para o cálculo da viscosidade que pode ser medida de diversas maneiras, o método mais simples é medir o tempo que um certo volume de óleo leva para fluir por um orifício / tubo

capilar, de geometria fixa, sob a relação da gravidade. De acordo com Hutchings e Shipway (2017), a relação entre a viscosidade dinâmica e a densidade é importante e por sua vez esse método mede a viscosidade cinemática diretamente. Atualmente, os valores das viscosidades são geralmente realizados por um instrumento de medição, na qual mede-se o torque atuante em um corpo rotativo separado de um corpo fixo por uma lacuna de geometria conhecida, sendo que o fluido está presente nessa lacuna.

A viscosidade dinâmica pode ser representada como uma relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a velocidade de deformação no fluido.

2.4.2. Influência da temperatura na viscosidade

A viscosidade de todos os óleos cai rapidamente com o aumento da temperatura. A variação da viscosidade com a temperatura pode ser representada pela equação de MacCoull-Walther.

$$\log_{10} * \log_{10}(\text{viscosity in cSt} + 0,7) = A - B * \log_{10} T \quad (4)$$

Sendo que T é a temperatura absoluta (Kelvin). Para um determinado óleo mineral, as constantes A e B possuem determinados valores. Embora essa equação seja desenvolvida para óleos minerais, segundo Hutchings e Shipway (2017), estudos mostraram que pode ser aplicado para óleos sintéticos.

A equação 4 permite estimar a viscosidade do lubrificante para qualquer temperatura, desde que seja conhecido duas outras temperaturas. Hutchings e Shipway (2017) pode observar que diferentes lubrificantes mostrarão diferentes dependências da temperatura e da viscosidade.

Além do mais, demonstrou que para determinados óleos com a mesma viscosidade, em uma determinada temperatura sofrem efeitos diferentes em relação a sua viscosidade, ou seja, para um fluido lubrificante A, com o aumento da temperatura, a viscosidade cai vagarosamente em relação ao um outro fluido B, demonstrando que o índice de viscosidade do lubrificante A é maior do que o lubrificante B, como pode ser observado na Figura 2-9.

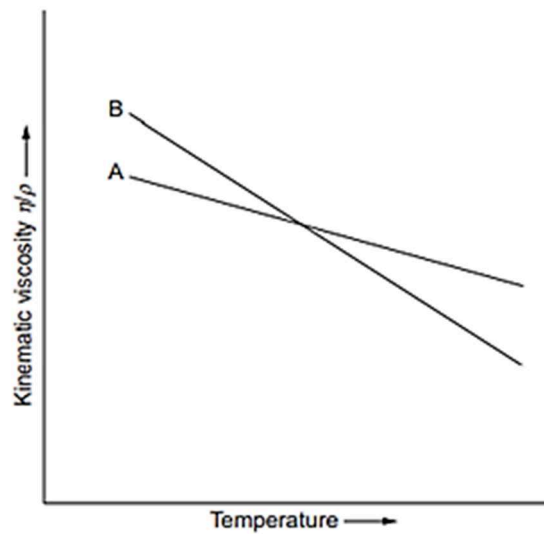


Figura 2-9: A variação da viscosidade cinemática com a temperatura para dois fluidos (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

No trabalho de Rodrigues (2018), avaliou o efeito do controle da topografia na eficiência de contatos lubrificadas (regimes limítrofe e misto) por meio do ensaio bloco-sobre-anel com amostras não conformes, no qual, obteve-se efeitos benéficos da texturização superficial, reduzindo o coeficiente de atrito.

No entanto, mesmo obtendo coeficientes de atrito menores em relação ao ensaio sem texturização, a temperatura média dos ensaios teve valores elevados por não ter um controle desse parâmetro, o que possibilitou uma redução da espessura do filme lubrificante, como pode observar na figura 2-10.

Dessa mesma maneira, de acordo com Profito (2010), o entendimento comportamental da viscosidade em relação a temperatura é importante, pois a viscosidade influencia nas dimensões da espessura mínima do filme lubrificante, possibilitando a separação das superfícies que estão em contato e influenciando o coeficiente de atrito.

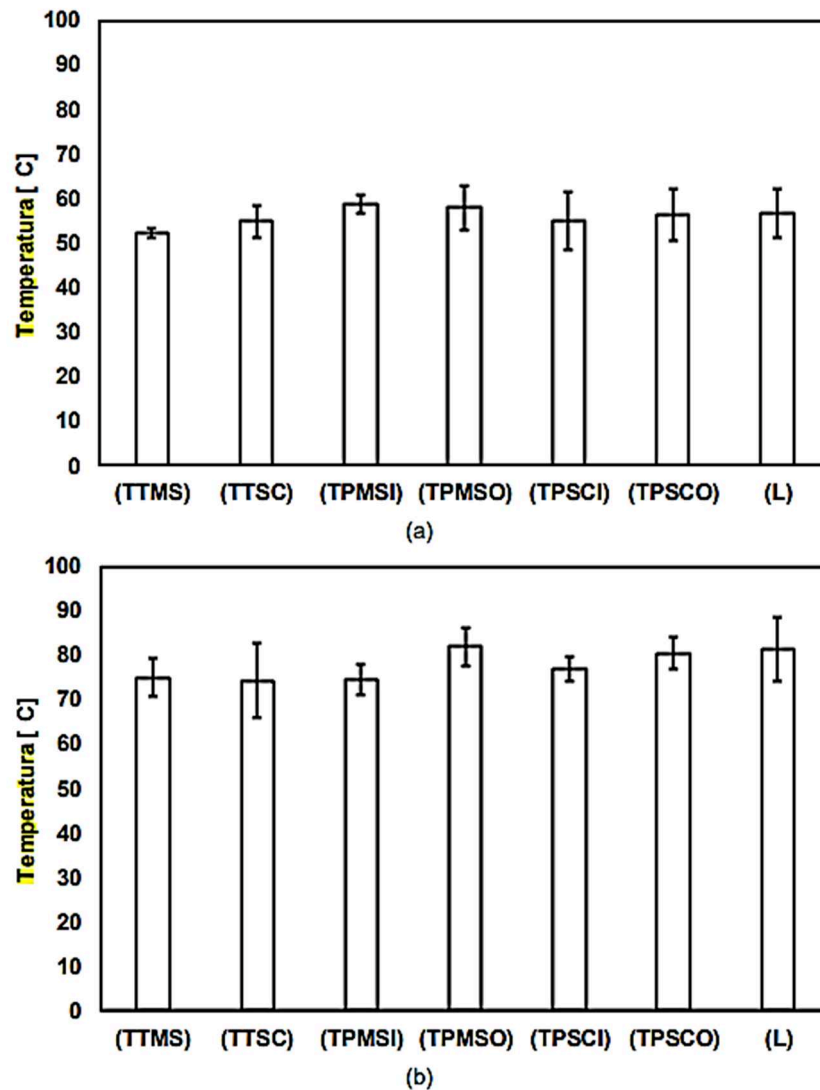


Figura 2-10: Temperaturas médias de ensaios em regime permanente: (a) 216,92 N; (b) 314,99 N. (Rodrigues, 2018).

2.4.3. Influência da velocidade

Em 1880, três pesquisadores conhecidos como Petrov, Tower e Reynolds, desenvolveram a equação para o mecanismo de lubrificação hidrodinâmica. Desta maneira, eles perceberam que o processo de lubrificação está fundamentado na dinâmica do filme lubrificante que separa as superfícies.

Primeiramente Petrov percebeu que a propriedade mais importante para o fluido lubrificante é a sua viscosidade, pois antes dessa análise suspeitavam que a densidade do óleo

era uma característica fundamental. Além do mais, compreendeu que a existência do atrito em mancais de rolamento é devido ao cisalhamento do óleo e não da interação das superfícies.

Posteriormente, Tower complementa, explicando a capacidade dos mancais de suportar cargas. O experimento foi desenvolvido a partir de sensores de pressão ao longo da pista de contato. Com os valores do sensor, foi possível integrar a pressão em relação a área do contato no mancal, que por sua vez resultou nas forças suportadas.

Por fim, Reynolds obteve a formulação para um fluido de determinada viscosidade (μ). E com o equacionamento (Eq. 5) foi possível obter as condições necessárias para a formação de um regime hidrodinâmico, sendo elas a existência de um fluido viscoso, a velocidade relativa e a convergência geométrica entre as superfícies.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu \left[(U_0 - U_i) \frac{dh}{dx} + 2 \frac{dh}{dt} \right] \quad (5)$$

Desse modo a equação de Reynolds mais a curva de Stribeck fica evidente como o atrito muda com o aumento da velocidade. E torna-se mais claro ao analisar o regime hidrodinâmico, no qual representa as melhores condições de lubrificação para um sistema, uma vez que os contatos entre as superfícies são nulos. Desse modo, o coeficiente de atrito é determinado pela viscosidade do lubrificante, no qual só aumentará nos casos de rompimento das camadas do fluido, o que é intensificado pela velocidade relativa entre as superfícies e o lubrificante.

De acordo com o exposto a temperatura é um parâmetro fundamental para o desempenho tribológico de um fluido lubrificante. Dessa forma, o presente trabalho propõe o controle da temperatura no desempenho de fluido lubrificantes a fim de demonstrar o seu efeito em relação ao coeficiente de atrito para as condições do contato bloco sobre anel com superfície conforme. Então, modificando os parâmetros da geometria da peça, do controle da temperatura e do regime de lubrificação hidrodinâmico, existe a possibilidade de melhorar as condições do sistema.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é apresentado os materiais utilizados para o ensaio tribológico e também descreve as medidas tomadas para a funcionalidade desse novo sistema com refrigeração. Além disso, também será mostrado os erros que ocorreram e como foi sua solução durante o experimento.

3.1. EQUIPAMENTOS E ANÁLISES

3.1.1. Equipamentos utilizados nos ensaios (Tribômetro Falex®)

Para a realização dos testes de atrito, utilizou-se o tribômetro *Falex® Block on Ring test machine* Model 6100B, para avaliar a influência da temperatura em relação ao atrito e desgaste de materiais para mancais de deslizamento lubrificados, ou seja, os experimentos foram feitos em 2 etapas utilizando a máquina, sendo elas: sem refrigeração e com refrigeração do fluido lubrificante. Para a refrigeração do fluido, a máquina possui um aparato para bombear o óleo no sistema e um equipamento para refrigerar por meio do fluxo d'água. Para o teste em questão, foi utilizado um corpo de prova conforme, imerso em um óleo.

Para medir a temperatura no sistema foram utilizados dois termopares do tipo J (Ferro - Constantan). Um localizado o mais próximo da superfície da amostra enquanto o outro foi posicionado no sistema de refrigeração. Nas Figuras 3-1 e 3-2, estão esquematizados os ensaios sem refrigeração e com refrigeração, respectivamente.

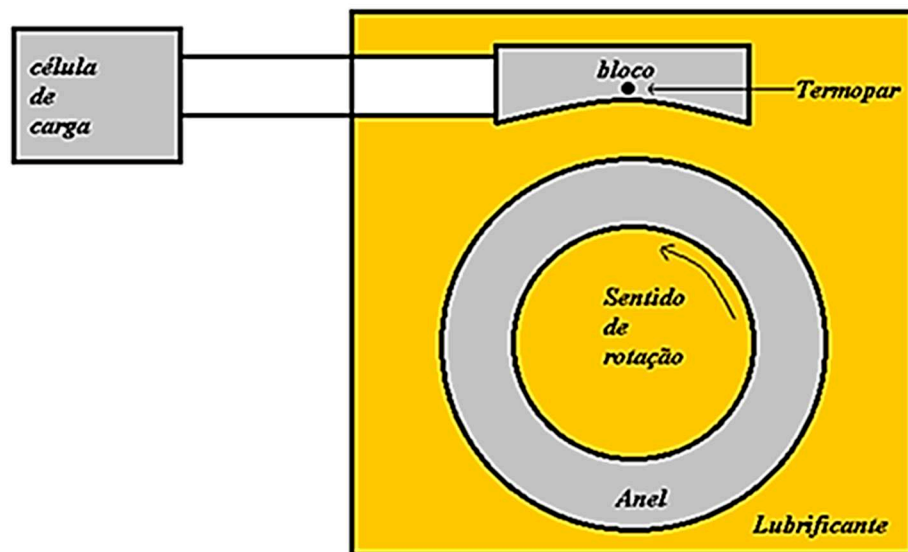


Figura 3-1: Esquema do ensaio bloco sobre anel, com corpo de prova conforme, sem refrigeração.

Nos ensaios com refrigeração, os aparatos fundamentais para o seu funcionamento são: bomba de óleo e um recipiente para refrigerar esse óleo. A bomba de óleo é responsável pela circulação do fluido lubrificante em todo o sistema, como pode ser observado no esquema da Figura 3-2. Então, o óleo entra no refrigerador, passa por um trocador de calor que utiliza água para reduzir a temperatura. Após esse processo, o óleo refrigerado sai do recipiente e entra dentro do suporte, onde está localizado o bloco e o anel, passando entre as superfícies. Devido ao constante atrito das superfícies, o fluido entre eles aquece. Porém, o fluido estando sempre em circulação, faz com que o óleo retorne para o recipiente, repetindo o processo. Esse sistema tem como objetivo reduzir o coeficiente de atrito em função da temperatura do lubrificante, uma vez que influencia diretamente a viscosidade.

No ensaio com refrigeração (figura 3-2), o fluxo de água entra (representado pela letra X) no refrigerador e sai do mesmo (representado pela letra O). É importante ressaltar que a água utilizada em nenhum momento entra em contato com o fluido lubrificante.

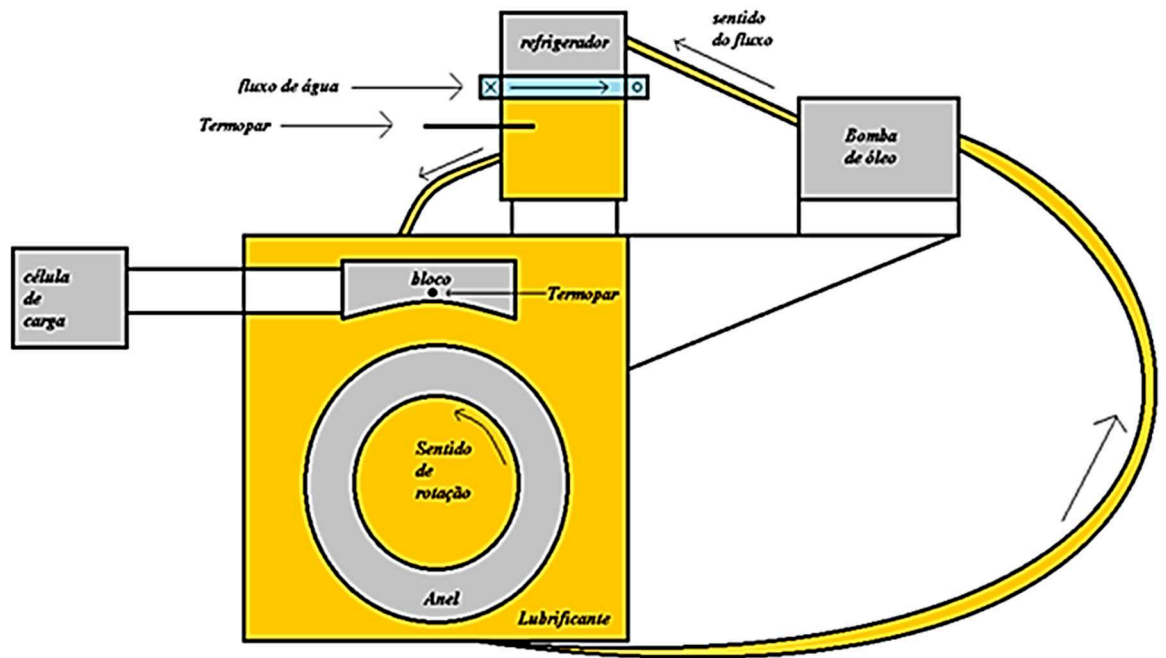


Figura 3-2: Esquema do ensaio bloco sobre anel, com corpo de prova conforme, com refrigeração.

Durante os testes preliminares, foi identificado a presença de ruídos e interferências nas leituras feitas pela célula de carga. Assim, buscou-se identificar a origem da interferência, através de uma varredura completa no sistema eletrônico do equipamento.

Durante a análise, foi identificada falha de aterramento do equipamento, sendo necessária realizar a substituição das fiações do equipamento. Além disso, foi necessário realizar a substituição do conector DB25 (Macho) e cabos para conexão do equipamento no computador.

Através de um sistema de polias e cargas conhecida foi possível a realização da calibração da célula de carga, sendo seu modelo SM-100 da Interface[®]. A calibração foi realizada em temperatura ambiente de 22 °C. Foram utilizadas massas de 100 g a 3000 g, na qual, acrescidas de 100 g para cada medição como pode ser observado na Figura 3-3. A célula de carga apresenta comportamento linear para a faixa de trabalho com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,993.

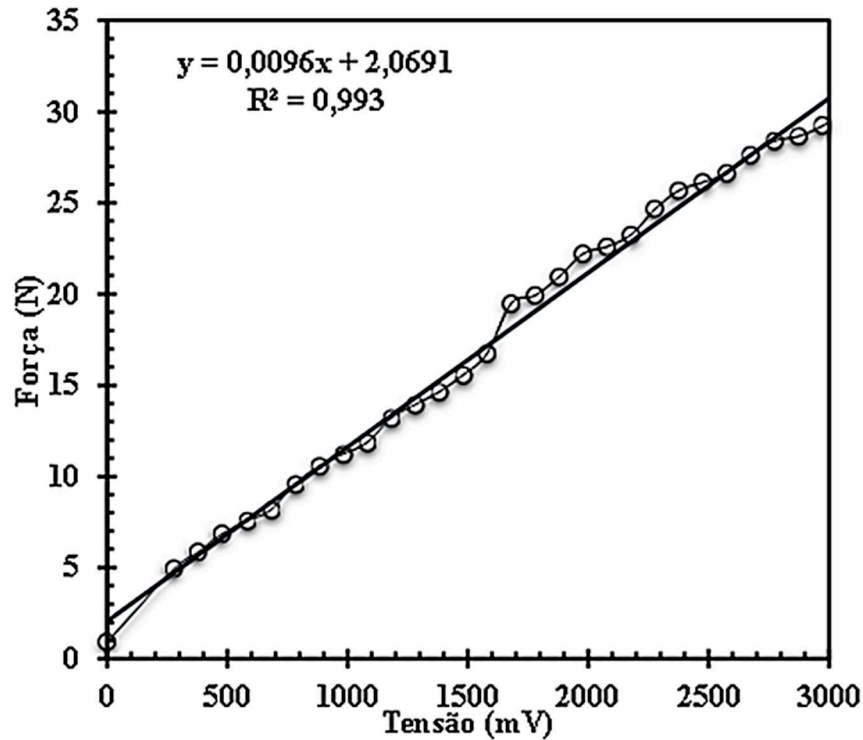


Figura 3-3: Calibração, tribômetro Falex® Block on Ring test machine.

O equipamento utilizado para lixar e polir os corpos de provas foi a micro retífica da marca Dremel 4 000, bivolt, de velocidade variável (5 000 a 35 000 rpm). Foi escolhida a rotação de 10 000 rpm. A rotação abaixo do escolhido, não foi o suficiente para lixar as amostras.

Para a limpeza das amostras foi utilizado banho ultrassônico. Esse processo foi feito antes e depois de lixar e polir as amostras e antes de serem ensaiadas no tribômetro Falex® Block on Ring.

3.2. MATERIAIS E PREPARAÇÃO SUPERFICIAL

Foram fabricados corpos de prova de aço ABNT 1045, com módulo de elasticidade 210 GPa, dureza de $2,942 \pm 0,108$ GPa e coeficiente de Poisson 0,3 (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Os corpos de provas com geometria conforme foram fabricados segundo especificações da norma ASTM D271 94 (2014), tendo 6,35 mm de largura, 15,76 mm de comprimento, 10 mm de altura e 17,50 mm concavidade de raio na superfície, conforme desenho apresentado na Figura 3-4.

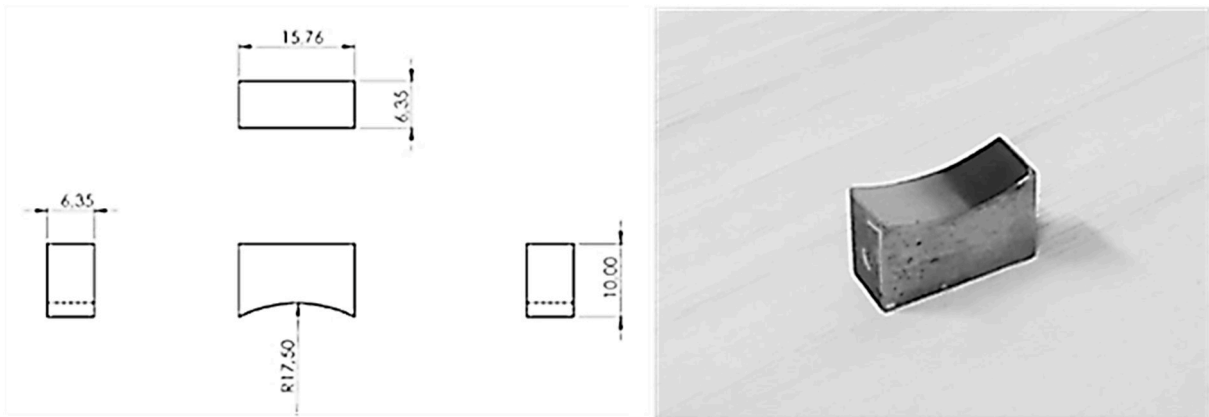


Figura 3-4: Dimensões do corpo de prova.

Antes de preparar a superfície da amostra foram realizados pré-testes para selecionar o tipo de abrasivo mais adequado, dentre os quais foram analisados: dióxido de silício (SiO_2 , com $0,25 \mu\text{m}$ e $0,04 \mu\text{m}$ de tamanho de partícula abrasiva), e pasta de alumina (Al_2O_3 com $1 \mu\text{m}$ de tamanho de partícula abrasiva). Então, ao iniciar os testes para a escolha ideal dos abrasivos, cada grupo foi submetido a três tempos (tempo polimento) sendo: 1 min, 2 min e 3 min. Em seguida foi utilizado o perfilômetro da Taylor Hobson®, modelo Form Talysurf Intra, que utiliza o software Ultra Surface Finish V5 para analisar a rugosidade, como pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1: Teste das substâncias abrasiva em relação ao tempo.

Substância abrasiva	Tempo [s]	Rugosidade média (μm)
Teste 1: SiO_2 ($0,25 \mu\text{m}$)	1 min	$0,863 \pm 0,155$
	2 min	$0,850 \pm 0,246$
	3 min	$1,090 \pm 0,211$
Teste 2: SiO_2 ($0,04 \mu\text{m}$)	1 min	$0,976 \pm 0,350$
	2 min	$1,440 \pm 0,472$
	3 min	$1,219 \pm 0,453$
Teste 3: Al_2O_3 ($1 \mu\text{m}$)	1 min	$0,877 \pm 0,302$
	2 min	$1,019 \pm 0,408$
	3 min	$0,956 \pm 0,391$

Após o polimento da superfície das amostras, com o objetivo de analisar as rugosidades (tabela 1), foi observado que para o teste 2 e teste 3, mesmo após a limpeza de sua superfície, resultou em uma crosta da substância abrasiva, fazendo com que a oxidação ocorra, para qualquer tempo de exposição da mesma, o que gerou em um aumento da rugosidade. Com base nos resultados, foi escolhido como abrasivo o dióxido de silício, com tempo de polimento de 2 minutos.

Assim, a preparação da superfície cilíndrica da amostra foi definida da seguinte forma: 1- lixamento, com lixa d'água de granulometria 600 e 1200 mesh; 2- polimento com Dióxido de Silício ($0,25 \mu\text{m}$) por 2 minutos.

A limpeza das amostras foi realizada utilizando o álcool absoluto 99,5% (99,3 INPM) da marca PROLINK no limpador ultrassônico. Antes de cada teste feito no tribômetro Falex®, o circuito de óleo foi limpo com o objetivo de retirar ao máximo todas as impurezas (debris) geradas no ensaio anterior. Esse procedimento é fundamental pois a presença de impurezas pode comprometer os resultados. Então, utilizando o álcool absoluto e deixando circular por 5 minutos no sistema com a rotação da máquina ao máximo (1800 rpm), garante essa limpeza.

3.3. PROPRIEDAS DO ÓLEO LUBRIFICANTE

Nos ensaios tribológicos lubrificado, o óleo utilizado é o BP 68, que é um óleo lubrificante mineral indicado para lubrificação de sistemas hidráulicos e sistemas circulatórios que operem em condições de baixa pressão e temperatura, (abaixo de 1800 rpm e pressões abaixo de 1500 Lbs) (LUBRIMAQ, 2021). Rodrigues (2018) analisou as propriedades reológicas do fluido, obtendo uma viscosidade(η) que variou de 185,03 cSt a 20 °C até 9,86 cSt a 100 °C. Na figura 3-5, representa as propriedades do óleo em função da temperatura.

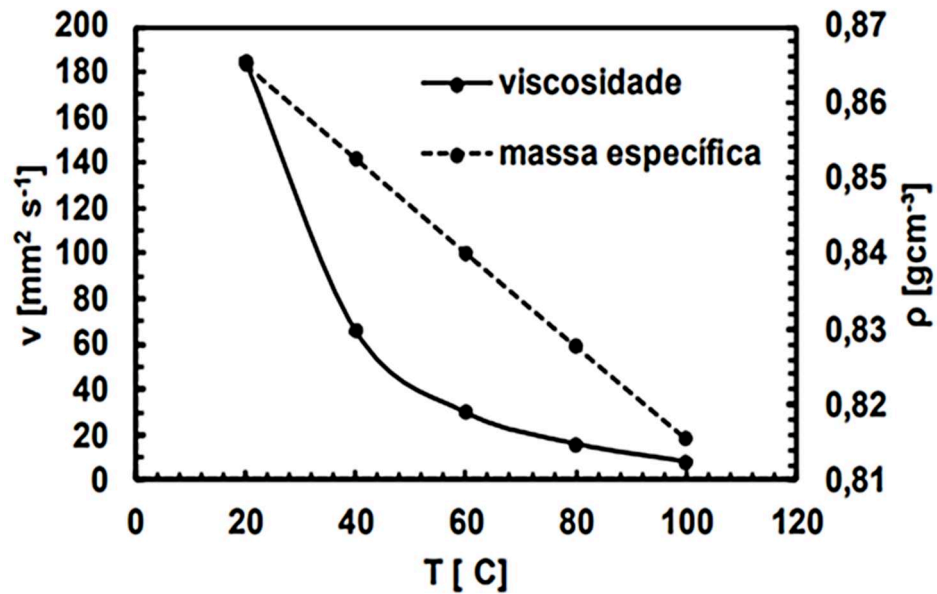


Figura 3-5: Propriedades do óleo hidráulico BP68. (Rodrigues, 2018)

Na Figura 3-5, é possível verificar as propriedades do óleo utilizado nos ensaios em determinadas temperaturas. Dessa maneira, para maiores valores da temperatura, menores serão os valores da viscosidade. O entendimento do efeito da temperatura na viscosidade é de grande importância, uma vez que a viscosidade influencia na espessura da camada gerada entre a superfície de contato que conseqüentemente determina o tipo de regime de lubrificação que o sistema analisado está. Então, a compreensão da propriedade do óleo BP68 em relação a temperatura é fundamental para entender a relação com o coeficiente de atrito.

3.4. SUPORTE PARA O CORPO DE PROVA

Para as condições de ensaio selecionadas, observou-se que as amostras se soltavam do suporte no decorrer dos ensaios. Por esse motivo, o suporte do tribômetro Falex®, foi adaptado conforme mostrado na figura 3-6.

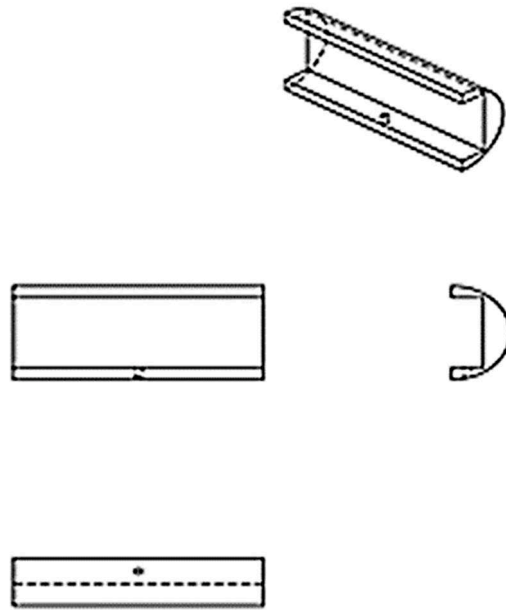


Figura 3-6: Adaptação do suporte Falex®.

Antes de iniciar o experimento foram fixados 4 parâmetros: 1 - velocidade de rotação da máquina; 2 - o tempo do ensaio; 3 - a temperatura do ambiente e a 4 - força normal. A velocidade de rotação e a carga determinam a espessura do fluido lubrificante, então foi selecionado uma rotação de 1000 rpm.

Os ensaios realizados foram separados em: com sistema de refrigeração e sem sistema de refrigeração. Para ambos os sistemas foram selecionadas as cargas de 49,05 N e 98,1 N. Todos os ensaios foram realizados com temperatura da sala em 22 °C.

A velocidade de rotação da máquina e a carga foram escolhidas através de pré-testes. No qual, para cargas inferiores a 49,05 N o sensor da célula de carga não era sensível o suficiente para fazer a leitura e para rotações abaixo de 1000 rpm o sistema era instável em relação ao coeficiente de atrito.

O tempo selecionado foi de acordo com os testes feitos antes de iniciar os ensaios, sendo assim, um tempo de 15 minutos (900 segundos) é o suficiente para garantir a estabilização das condições ensaiadas e observando também a estabilização térmica do sistema.

Com os dados obtidos durante cada ensaio é possível fazer a análise da superfície em relação a refrigeração do fluido lubrificante, sendo assim, gráficos do coeficiente de atrito em função do tempo e temperatura foram traçados.

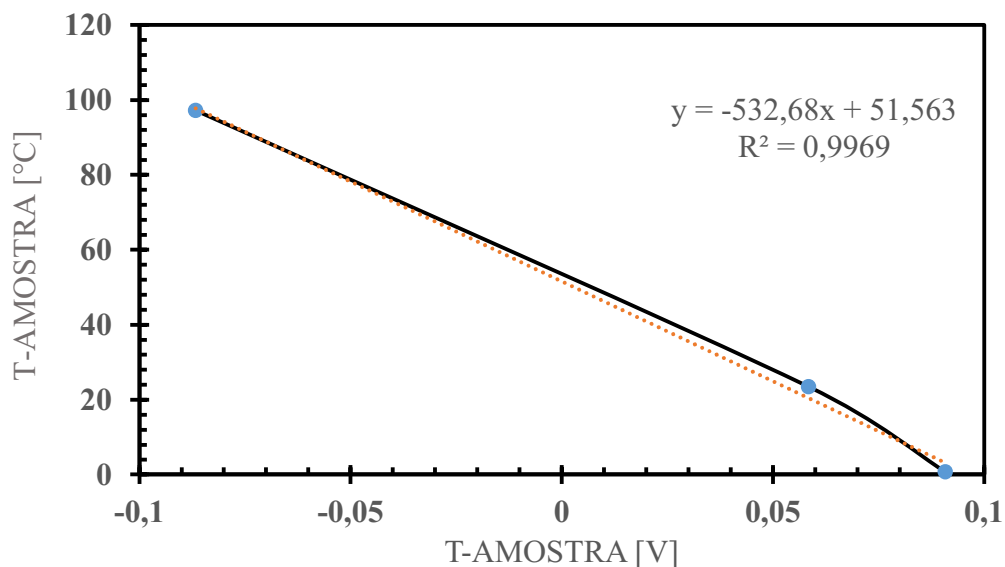
3.5. CALIBRAÇÃO DA AQUISIÇÃO DAS TEMPERATURAS

Para a calibração dos termopares dos tipo J, foram utilizados três pontos conhecidos de temperatura para água destilada., sendo essas: temperatura de solidificação, temperatura ambiente e temperatura de ebulição, que são respectivamente 0 °C, 23 °C e 97,05 °C, para as condições de Uberlândia (0,9988 atm). O processo de calibração consistiu em fazer medições da força eletromotriz gerada para os valores conhecidos da temperatura. Para determinação dessa temperatura, foi utilizado um termômetro de referência, da marca INCOTERM.

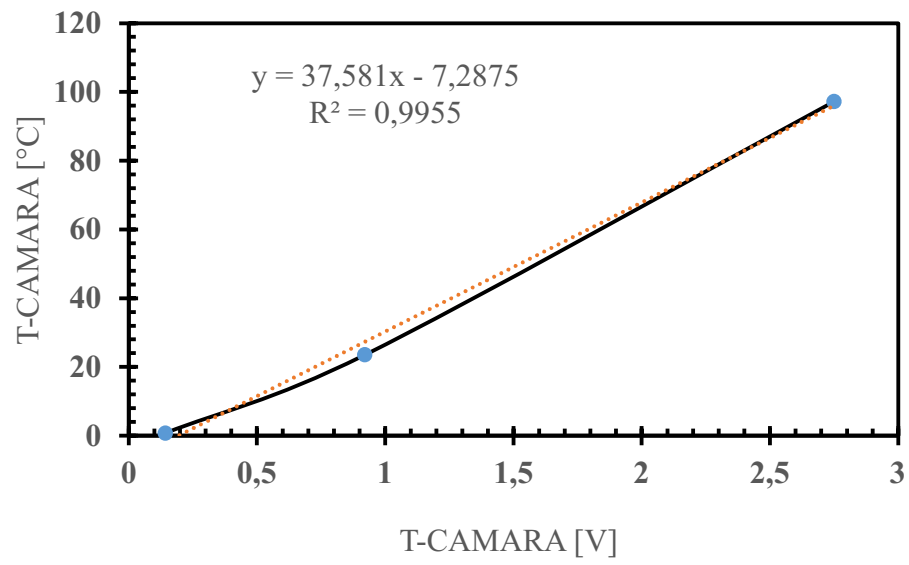
Em um recipiente refratário, foi aquecido cerca de 500 ml de água destilada com o ebulidor. Ao atingir a ebulição, foi medido a temperatura da água com o termômetro de referência e com os termopares, e com isso, foi medido a diferença de potencial.

Em seguida, foi medido a diferença de potencial no termopar para o valor da temperatura da água ao atingir 23 °C, ao acrescentar água fria. Feito essa medição, foi acrescentado gelo para atingir a temperatura de congelamento, na qual, foram feitas mais medições. As etapas anteriores foram repetidas por mais cinco vezes.

Após a obtenção dos resultados, foram feitas as curvas de calibração da temperatura da amostra e da câmara, como pode ser observado na Figura 3-7 item (a) e (b). Com o termopar calibrado, utilizou-se para medir a temperatura de cada ensaio.



(a)



(b)

Figura 3-7: Curvas de Calibração da Temperatura: (a) Amostra e (b) Câmara.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSÕES

A seguir são apresentados e discutidos os resultados referentes aos ensaios com refrigeração e sem refrigeração, a fim de avaliar o parâmetro temperatura, do fluido lubrificante e da amostra e sua influência em relação a viscosidade, resultando em uma alteração do coeficiente de atrito.

4.1. ENSAIO TRIBOLÓGICO BLOCO SOBRE ANEL

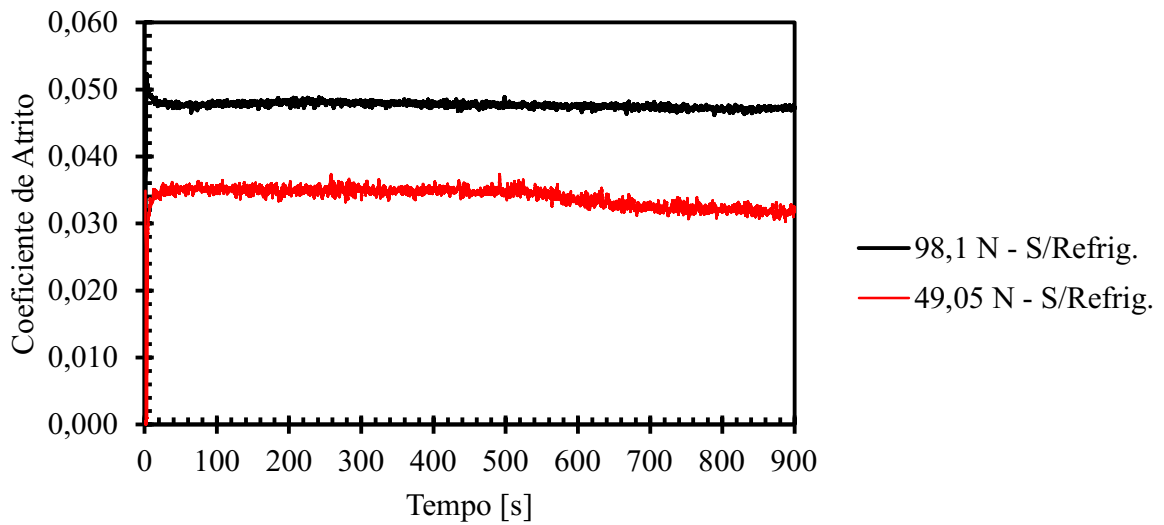
Os ensaios tribológicos, foram separados em dois grupos: com e sem refrigeração do fluido lubrificante, para as cargas de 49,05 N e 98,1 N. Durante os ensaios, foram fixados os seguintes parâmetros: tempo de ensaio; volume de fluido lubrificante e velocidade de rotação da máquina mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros selecionados para o ensaio tribológico.

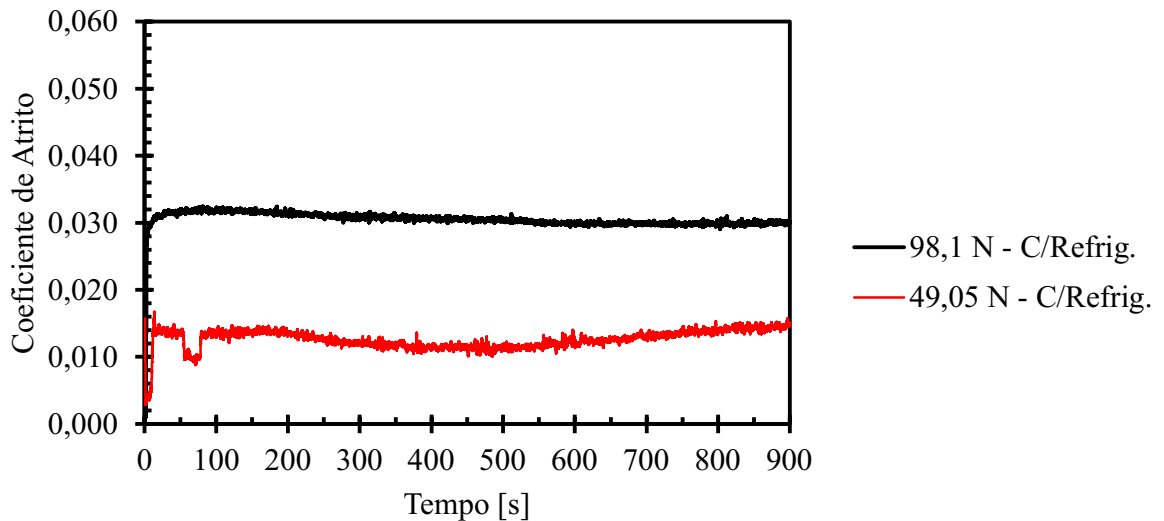
Tempo [s]	Velocidade [rpm]	Volume do óleo [mL]
900	1000	250

4.1.1. Coeficiente de Atrito

A partir dos dados obtidos, determinou-se graficamente a curva do coeficiente de atrito para cada ensaio, como representado na Figura 4-1.



(a)



(b)

Figura 4-1 Coeficiente de atrito para os ensaios com cargas de 49,05 N e 98,1 N: (a) sem resfriamento e (b) com resfriamento.

A curva do coeficiente de atrito é fundamental pois permitem analisar em que momento do ensaio o estado estacionário foi alcançado. A Figura 4-1, mostra uma estabilização alcançada de forma rápida, já que os coeficientes de atrito são baixos, em relação aos outros regimes, e praticamente constante ao longo do tempo. Esses fatores podem ser alcançados devido ao regime hidrodinâmico. Essa condição de baixo atrito é devido a separação total da camada formada de fluido lubrificante entre as superfícies. Dessa forma, a carga normal é suportada pela pressão hidrodinâmica do fluido. [Rodrigues, 2018]

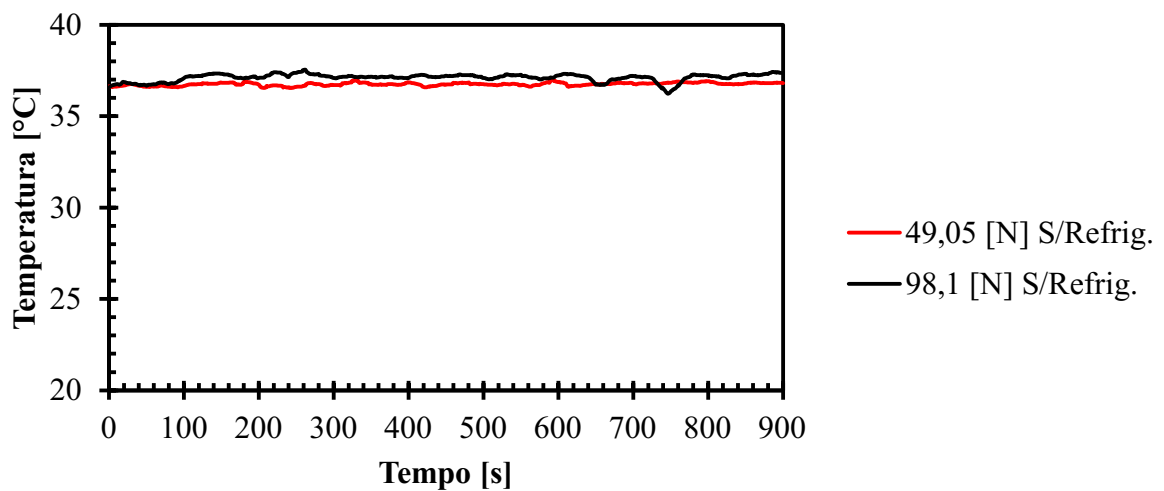
Analisando ainda a figura 4-1 é possível observar que com o aumento da carga resultou no aumento do coeficiente de atrito. Isso se deve ao fato de que com aumento da força normal

influenciou diretamente na redução da espessura de filme lubrificante, intensificando a probabilidade da ocorrência do contato de asperezas.

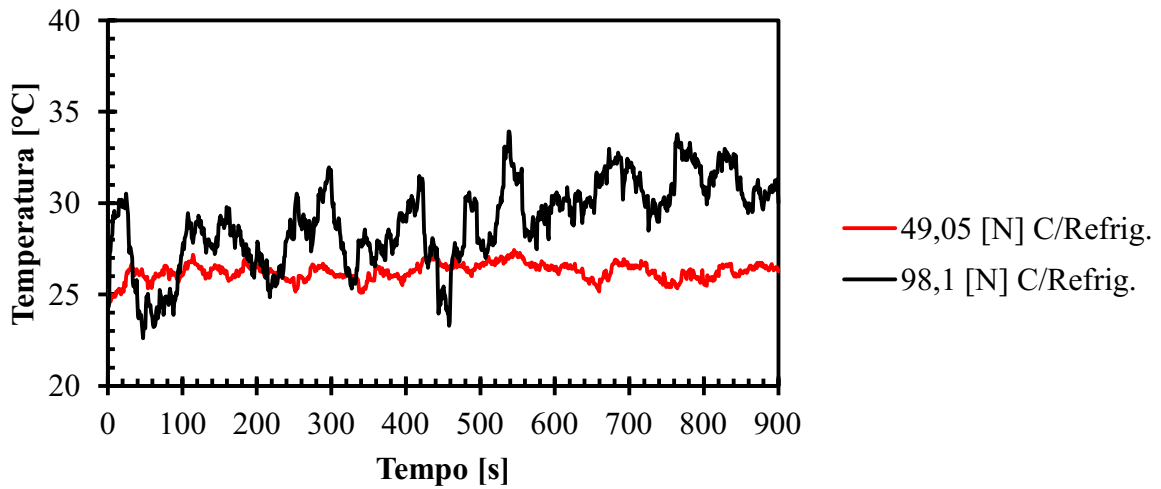
A análise comparativa dos gráficos do coeficiente de atrito, para os sistemas com e sem resfriamento para as mesmas cargas só é possível de compreender ao analisar as temperaturas do sistema.

4.1.2. Temperatura

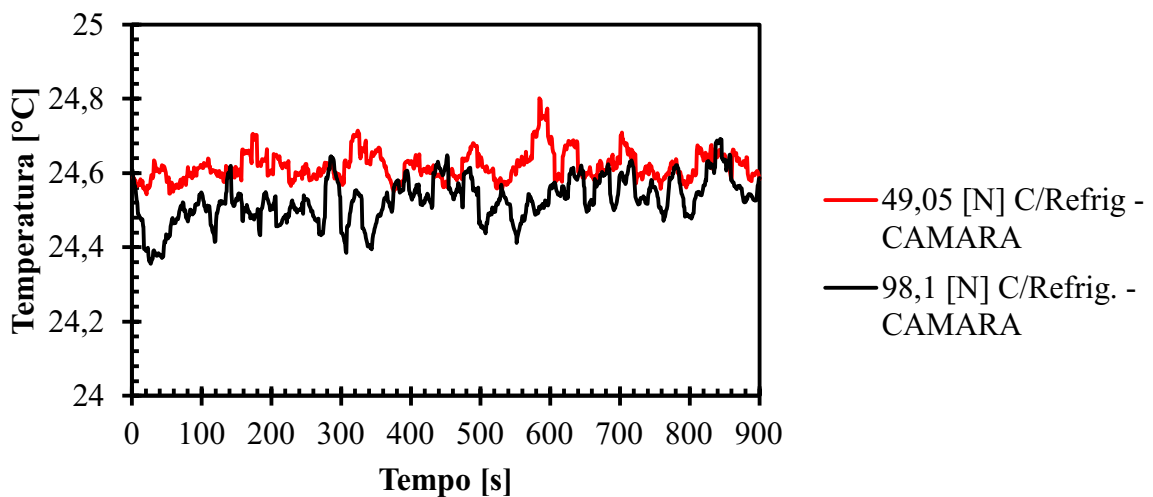
O atrito gerado entre as superfícies e o fluido, pode resultar no aquecimento do meio, pois o atrito é a energia que está sendo utilizada para o rompimento de ligações químicas. Quando o corpo é friccionado um sobre o outro, a ruptura dessas ligações químicas libera calor. Devido a esse comportamento, a temperatura do fluido lubrificante na saída do reservatório foi medida, conforme mostrado na Figura 4-2.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-2: Temperatura da Amostra: sem refrigeração (a) e com refrigeração (b), para cargas de 49,05 N e 98,1 N e Temperatura do Reservatório (c), para o ensaio com refrigeração.

Evidentemente, com o aumento da carga em cada etapa, possibilitou em uma elevação da temperatura da amostra, o que influencia para o aumento do coeficiente de atrito. Para reduzir essa influência, o aparato aprimorado, tem como objetivo controlar a temperatura do sistema. Então, para os sistemas com refrigeração as temperaturas das amostras reduziram significativamente. Uma vez que, ao passar pelo trocador de calor (Figura 4-2 item (c)), a temperatura do fluido era reduzida consideravelmente, em relação ao fluido que estava entre as superfícies (Figura 4-2 item (b)).

Na Figuras 4-1 item (a) e (b) e figura 4-2 item (a) e (b), representada pelo coeficiente de atrito de cada ensaio e suas respectivas temperatura entre as superfícies, mostraram que para os ensaios com refrigeração do fluido os coeficientes de atrito gerados foram menores em relação ao sistema sem refrigeração.

Esse resultado, de acordo com Oliveira Barros e Rossi (2009), demonstra que a temperatura influencia na viscosidade dinâmica, pois a força de interação molecular de um fluido é diretamente proporcional a sua viscosidade, ou seja, quanto maior é essa força, mais viscoso será o fluido. Porém, com o aumento da temperatura, a força de atração do fluido reduz e conseqüentemente a sua viscosidade (Brunneti, 2008).

Com a análise de dados de cada gráfico, desenvolveu-se uma tabela com os valores médio do coeficiente de atrito, da temperatura da amostra e da temperatura do reservatório, representado na Tabela 3.

Tabela 3: Média aritmética dos dados obtidos para os ensaios com e sem refrigeração

Carga [N]	Ensaio	Temp. Amostra [°C]	Temp. Camara [°C]	Coef. Atrito
49,05	S/REFRIG.	36,746±0,084	-	0,03389±0,00224
	C/REFRIG.	26,252 ±0,451	24,618±0,039	0,01262±0,00145
98,1	S/REFRIG.	37,109±0,209	-	0,04759±0,00194
	C/REFRIG	28,972±2,302	24,527±0,060	0,03053±0,00129

Para condição sem refrigeração, com uma maior carga normal resultou em uma temperatura da amostra 0,988 % maior. Essa elevação da temperatura reduz a viscosidade do óleo e aumenta o contato entre as superfícies, amplificando o coeficiente de atrito (40,42 %). Com o sistema de refrigeração, o aumento da carga também apresentou um aumento na temperatura da amostra em 10,36 % e o coeficiente de atrito em 141,92 %.

A atuação do sistema de refrigeração, mostrou-se eficaz, uma vez que cumpriu com o seu objetivo, reduzindo a temperatura do fluido e conseqüentemente amenizando o coeficiente de atrito, ao comparar com os ensaios sem refrigeração para as mesmas cargas. Com a carga de 49,05 N, evidenciou uma redução da temperatura cerca de 28,56 %, o que influenciou na

diminuição do coeficiente de atrito que foi em torno de 62,76 %. Já para a carga de 98,1 N a temperatura reduziu cerca de 21,93 %, o que ocasionou em diminuição do coeficiente de atrito em aproximadamente 35,85 %.

O meio mais eficaz de se controlar atrito e desgaste é a lubrificação. Compreender o desempenho do contato entre superfícies em condições lubrificada sobre a influência da temperatura é de extrema importância, pois o controle desse parâmetro é possível entender o funcionamento e o comportamento desse mecanismo, a fim de propor soluções para melhorar as condições do sistema, como por exemplo a durabilidade e a confiabilidade dos mancais.

Dessa forma, nota-se que mesmo para variações pequenas da temperatura entre as superfícies, gerou em elevadas variações do coeficiente de atrito, mostrando a importância do seu estudo. Então a variação da condição do fluido lubrificante devido a temperatura mostra que a aplicação dos conceitos tribológicos pode preservar a superfície dos materiais decorrente da diminuição do desgaste e da dissipação de energia devido ao atrito.

Então, o investimento em ensino, pesquisa e aplicação desse conceito, trazem benefícios, como a diminuição de custos e perdas nas indústrias, redução do consumo de energia por meio da redução do atrito, diminuição de investimentos por meio do aumento da vida útil de máquinas e redução de custos de manutenção e reposição.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Com base nos resultados discutidos nesse trabalho, foi possível concluir que:

- A temperatura influencia diretamente na viscosidade do fluido, o que é a causa da alteração do coeficiente de atrito, pois a viscosidade do fluido é fundamental para a formação da espessura da camada. Quanto menor for essa espessura, ocorre uma maior chance de contato entre as superfícies
- Os resultados mostram que uma variação mínima da Temperatura é o suficiente para resultar em uma alteração considerável do coeficiente de atrito. Nos ensaios com e sem refrigeração para a carga de 49,05 N, ao reduzir a temperatura em aproximadamente 28,56 % o coeficiente de atrito diminuiu em 62,76 %. Já para a carga de 98,1 N, a temperatura reduziu em torno de 21,93 % e conseqüentemente uma redução no coeficiente de atrito em 35,85 %.
- O aparato desenvolvido, para refrigerar o fluido, teve resultados positivos; Apesar das modificações feitas, o equipamento resfriou o fluido significativamente. Para as cargas de 49,05 N e 98,1 N, o fluido lubrificante reduziu em torno de 28,56 % e 21,93 %, respectivamente.
- O aperfeiçoamento da aquisição dos dados, modificando, como por exemplo o DB25, as fiações elétricas do equipamento que transmite o sinal da Falex para o computador e o aterramento da máquina, resultaram em uma melhora na obtenção dos resultados.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere para trabalhos futuros:

- Avaliação da Texturização superficial das amostras, em um sistema com refrigeração;
- Avaliar a influência dos tipos de fluido de refrigeração para o aparato desenvolvido;
- Análise de desgaste;
- Análise dos particulados;
- Análise do fluido lubrificante após os ensaios.

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The Friction and Lubrication of Solids**. [s.l.] Oxford, 1950. BRAUN, D. et al. **Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication**. *Tribology International*, v. 77, p. 142–147, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.04.012>.

BRUNETTI, F. *Mecânica dos Fluidos*. Pearson Education, São Paulo, 2008. 431 p.

CARLOS C. P., LUIS. **Curva de Stribeck**. *Manutenção em Foco*, 2021. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/curva-de-stribeck/>>. Acesso em: 19/11/2021.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. **Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions**. *Tribology International*, v. 40, n. 8, p. 1227–1238, 2007.

FARIAS, Aline Cristina Mendes de. **Análise da lubrificidade do biodiesel brasileiro de ésteres etílicos de soja e girassol**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal.

GRANJEIRO, A. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; MATA, M. E. R. M. C. **Viscosidades de polpas concentradas de figo-da-Índia**. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.13, n.2, p.219-224, 2007.

HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R. **Fundamental of Fluid Film Lubrication Second Edition**. [s.l: s.n.].

HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R.; JACOBSON, B. O. **Fundamentals of Fluid Film Lubrication - Second Edition**. 2004. <https://doi.org/10.1201/9780203021187>.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. **Tribology Friction and Wear of Engineering Materials. Second Edition**. ed. [S. l.]: Elsevier, 2017. 388 p.

INTERNATIONAL, A. **ASM Handbook: Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology**. [s.l: s.n.].

JOST, H. P. **Tribology — Origin and future**. *Wear*, v. 136, n. 1, p. 1–17, fev. 1990. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90068](https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90068).

KAYABA, T.; KATO, K. **The analysis of adhesive wear mechanism by successive observations of the wear process in SEM.** *Proc. Int. Conf. on Wear of Materials*, p. 45–56, 1979.

LANDMAN, U. et al. **Atomistic Mechanisms and Dynamics of Adhesion, Nanoindentation, and Fracture.** *Science*, v. 248, n. 4954, p. 454–461, 27 abr. 1990. <https://doi.org/10.1126/science.248.4954.454>.

OKTAY, S. T.; SUH, N. P. **Wear Debris Formation and Agglomeration.** *Journal of Tribology*, v. 114, n. 2, p. 379, 1992. <https://doi.org/10.1115/1.2920897>.

PROFITO, F. J. **Modelagem Unidimensional Do Regime Misto De Lubrificação Aplicada 77 a Superfícies Texturizadas.** [s.l.] Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2010.

RADI, Polyana Alves et al. Tribologia, conceitos e aplicações. **ANAIS DO 13º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA (XIII ENCITA). XIII., São José dos Campos. Anais [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.**

RODRIGUES, T. A. **Efeito do controle da topografia na eficiência de contatos lubrificados: avaliação experimental.** [s.l.] Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology.** [s.l.] Elsevier Science, 2013.

SUH, N. P. **Tribophysics.** [s.l.] Prentice-Hall, 1986.

TALA-IGHIL, N.; FILLON, M.; MASPEYROT, P. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing. *Tribology International*, v. 44, n. 3, p. 211–219, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.10.003>

WILLIAMS, J. **Engineering Tribology.** Cambridge: Cambridge University Press, 2005. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805905>.

ZHU, D.; WANG, Q. J. On the λ ratio range of mixed lubrication. *Journal of Engineering Tribology*, v. 1996, 2012.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and Wear of Materials.** Tribology Series, v. 10, n. Ccc, p. 1–560, 1987.

FUNDAMENTOS DE LUBRIFICAÇÃO: LUBRIFICAÇÃO. Fluid Analysis Technology, 2021. Disponível em: <https://www.fluidanalysistech.com.br/trocando_ideias/lubrificacao.php>. Acesso em: 19/11/2021.

ÓLEO HIDRÁULICO 68 – HIDRA 68. LUBRIMAQ do Brasil, 2021. Disponível em:
< <http://www.lubrimaq.com.br/loja/oleo-hidraulico-68.php>>. Acesso em: 21/11/2021.

TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA MECÂNICA EM ENERGIA TÉRMICA.
Unesp, Disponível em: 2021. < <https://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/mec35.htm>>.
Acesso em: 01/12/20021.