



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva**

**Análise do atrito e desgaste sob diferentes
condições de carga e lubrificação para um conjunto
pino/disco de aço SAE 1045**

**Autor: Natália Vilela Guimarães
Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga**

**Brasília, DF
2022**



Natália Vilela Guimarães

**Análise do atrito e desgaste sob diferentes condições de carga e lubrificação
para um conjunto pino/disco de aço SAE 1045**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga

**Brasília, DF
2022**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Guimarães, Natália Vilela.

Análise do atrito e desgaste sob diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino/disco de aço SAE 1045 / Natália Vilela Guimarães. Brasília: UnB, 2023. 91 p.: il.; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga.

1. Aço SAE 1045. 2. Indústria Automotiva. 3. Lubrificação.
4. Vida Útil. I. Cueva, Edison Gustavo. Prof. Dr. II.

CDU Classificação

- A ficha catalográfica oficial deverá ser solicitada à Biblioteca pelo aluno após a apresentação.



**Análise do atrito e desgaste sob diferentes condições de carga e lubrificação
para um conjunto pino/disco de aço SAE 1045**

Natália Vilela Guimarães

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva) da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação 03/04/2023) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga, UnB/ FGA
Orientador

Eng. João Carlos Wohlgemuth, UnB/ FGA
Membro Convidado

Eng. Allan Pereira Pacheco
Membro Convidado

Brasília, DF
2023

Esse trabalho é dedicado à Deus e ao
Imaculado Coração de Maria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, aos meus pais por sempre me apoiarem e estarem presentes em todos os momentos da minha vida, as minhas irmãs por sempre perguntarem se eu já tinha começado a escrever o meu TCC, me estimulando sempre a continuar. Agradeço ao meu namorado Mateus da Silva Mota, por me ajudar em todos os meus trabalhos da faculdade, a sogra a Maria das Graça da Silva por sempre rezar por mim e por sempre ter uma palavra de alento para me acalmar e ao meu orientador Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga por toda paciência, apoio e atenção durante a realização desse trabalho. E todos aqueles que me ajudam com mensagens, pensamentos e orações durante todo esse percurso.

Na verdade, tudo é Dele, por Ele, e para Ele.
A Ele, a Glória para sempre. Amém!
(Rm 11,36)

RESUMO

Esse trabalho teve como objeto o aço SAE 1045 utilizado na indústria, inclusive na automotiva. Teve como objetivo geral o estudo do comportamento do desgaste do Aço 1045, atritando contra si mesmo, por meio de ensaios do tipo pino sobre disco, utilizando uma velocidade tangencial constante de 3,3 m/s e diferentes condições de carga e lubrificação. Na indústria automotiva o problema do desgaste desse aço ainda é relevante, diminuindo, a citada vida útil desses materiais. Para a elaboração dessa monografia foi realizada uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados de alguns autores, além de busca de dados e informações em consulta a sítios eletrônicos de plataformas de trabalhos acadêmicos, além de livros e revistas especializadas. Foi feito um estudo de caso em que se analisou três situações de atrito desse material: em meio não lubrificado (como testemunha), lubrificado com óleo 5w40 e lubrificado com óleo 5w40+Militec-1, almejando fazer uma comparação entre elas. Para isso, foi necessária a preparação das superfícies dos corpos de prova com lixamento e polimento. Para a realização dos ensaios foi utilizado uma bancada de desgaste (tribômetro) equipada com sensores que mediram a força de atrito e a temperatura em cada um deles, tendo uma duração de 20 minutos cada. As cargas utilizadas nesse trabalho foram de 5 Newtons (N), 10N e 25N. Os dados de interesse para esse experimento foram a força de atrito e a temperatura, além do cálculo da massa perdida e análise do dano superficial causado pelo atrito. Percebeu-se que na revisão da literatura especializada, produzida por autores que trabalharam com esse tema, que a utilização do óleo 5w40+Militec-1 produziu os piores resultados, se comparado com o uso do óleo 5w40. Contrariamente, nos ensaios do estudo de caso, o óleo 5w40+Militec-1 produziu resultados melhores em relação à vida útil do referido aço. Concluiu-se que os ensaios produziram resultados opostos em relação aos dos autores referenciados, induzindo a necessidade da continuidade de mais pesquisas correlacionadas.

Palavras-chave: Desgaste. Aço SAE 1045. Indústria Automotiva. Lubrificação. Vida Útil.

ABSTRACT

This work had as object the SAE 1045 steel used in the industry, including the automotive one. Its general objective was to study the wear behavior of Steel 1045, rubbing against itself, through pin-on-disc type tests, using a constant tangential velocity of 3.3 m/s and different load and lubrication conditions. In the automotive industry, the problem of wear of this steel is still relevant, reducing the aforementioned useful life of these materials. For the preparation of this monograph, a bibliographic review of related works by some authors was carried out, as well as a search for data and information in consultation with electronic sites of academic work platforms, as well as books and specialized magazines. A case study was carried out in which three situations of friction of this material were analyzed: in a non-lubricated environment (as a witness), lubricated with 5w40 oil and lubricated with 5w40+militec-1 oil, aiming to make a comparison between them. For this, it was necessary to prepare the surfaces of the test specimens with sanding and polishing. To carry out the tests, a wear bench (tribometer) was used, equipped with sensors that measured the frictional force and the temperature in each one of them, with a duration of 20 minutes each. The loads used in this work were 5 Newtons (N), 10N and 25N. The data of interest for this experiment were the friction force and temperature, in addition to the calculation of the lost mass and analysis of the surface damage caused by friction. It was noticed that in the review of the specialized literature, produced by authors who worked with this theme, that the use of 5w40+Militec-1 oil produced the worst results, when compared to the use of 5w40 oil. On the contrary, in the case study tests, the 5w40+Militec-1 oil produced better results in relation to the useful life of the referred steel. It was concluded that the tests produced opposite results in relation to those of the referenced authors, inducing the need for further correlated research.

Keywords: Wear. SAE 1045 steel. Automotive industry. Lubrication. Lifespan.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma da estrutura do trabalho.	16
Figura 2 - Contato conforme e não conforme.	19
Figura 3 - Tipos de movimento relativo entre dois corpos.	21
Figura 4 - Lubrificação Hidrodinâmica.....	24
Figura 5 - Lubrificação Elastohidrodinâmica ou mista.	25
Figura 6 - Lubrificação Limítrofe.....	25
Figura 7 - Diversas formas de ocorrência do desgaste.....	27
Figura 8 - Esquemático do desgaste por deslizamento.	28
Figura 9 - Análise microscópica do Aço SAE 1045a seco temperado e revenido a 100°C.....	32
Figura 10 - Conjunto disco e pino.	33
Figura 11 - Lubrificante Lubrax 50w40 e condicionador de metais militec-1.....	34
Figura 12 - Demonstrativo do Tribômetro.....	35
Figura 13 - Contato entre pino e disco.....	35
Figura 14 - Sistema de lubrificação.	36
Figura 15 - Esquemático das medidas para o cálculo do volume perdido.....	37
Figura 16 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio a seco com 5N. ...	40
Figura 17 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio a seco com 10N.	43
Figura 18 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio a seco com 25N.	45
Figura 19 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 5N.....	52
Figura 20 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N.	55
Figura 21 - Superfícies desgastadas do disco e pino após o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 25N.	59
Figura 22 – Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio lubrificado com óleo 5w40 + Militec com 5N.	66
Figura 23 – Superfície desgastada disco e pino após ensaio lubrificado com Militec com 10N.....	70
Figura 24 – Superfície desgastada do disco e pino após o ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com 25N.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do Aço SAE 1045.....	18
Tabela 2 - Propriedade do Aço SAE 1045.	18
Tabela 3 - Tipos, funções e componentes de aditivos utilizados em lubrificantes automotivos.	23
Tabela 4 - Perda de massa do ensaio a seco com a carga de 5N.....	41
Tabela 5 - Perda de massa do ensaio a seco com a carga de 10N.	43
Tabela 6 - Perda de massa do ensaio a seco com a carga de 25N.	45
Tabela 7 - Comparação das superfícies desgastadas dos ensaios a seco.....	48
Tabela 8 – Perda de massa dos ensaios a seco.....	49
Tabela 9 - Perda de massa do ensaio lubrificado com óleo 5w40 com carga de 5N.....	52
Tabela 10 - Estimativa da Pressão de contato para ensaios lubrificados com óleo 5w40 e carga.5N.....	53
Tabela 11 – Perda de massa no ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 10N.....	56
Tabela 12 - Estimativa da Pressão de contato para ensaios lubrificados com óleo 5w40 e carga 10N.....	56
Tabela 13 – Perda de massa no ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 25N.....	59
Tabela 9. Tabela 14 - Estimativa da Pressão de contato para ensaios lubrificados com óleo 5w40 e carga 25N.	60
Tabela 15 - Comparação das superfícies desgastadas nos ensaios lubrificados com óleo 5w40.....	63
Tabela 16 – Perda de massa nos ensaios lubrificados com óleo 5w40.....	63
Tabela 17 – Perda de massa do ensaio lubrificado com Militec.....	67
Tabela 18 - Estimativa da Pressão de contato para ensaios lubrificados com Militec e carga 5N.....	67
Tabela 19 – Perda de massa do ensaio lubrificado com Militec.....	70
Tabela 20 - Estimativa da Pressão de contato para ensaio lubrificado com Militec e carga 10N.....	71
Tabela 21 – Perda de massa do ensaio lubrificado com Militec e carga de 25N.	74
Tabela 22 - Estimativa da Pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec e carga 10N.	74
Tabela 23 - Comparação das superfícies desgastadas no ensaio lubrificado com Militec.....	78
Tabela 24 – Perda de massa nos ensaios lubrificados com Militec.....	78
Tabela 25 - Comparação das superfícies desgastadas dos discos.....	85
Tabela 26 -Comparação das superfícies desgastadas dos discos.....	86
Tabela 27 - Comparativo da perda de massa entre os ensaios lubrificados.....	87

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo das forças de atrito com a carga de 5N.....	29
Gráfico 2 - Comparativo das forças de atrito com a carga de 10N.	30
Gráfico 3 -Comparativo das forças de atrito com a carga de 25N.	31
Gráfico 4 – Comparativo da perda de massa dos ensaios lubrificados.....	31
Gráfico 5 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 5N.	39
Gráfico 6 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 5N.	39
Gráfico 7 -Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 10N.	41
Gráfico 8 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com a carga de 10N.....	42
Gráfico 9 - Variação da força atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 25N.	44
Gráfico 10 -Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com a carga de 25N.	44
Gráfico 11 -Comparativo da força da força de atrito em função do tempo de ensaios. Ensaios a seco.	46
Gráfico 12 -Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaios a seco.....	47
Gráfico 13 -Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaios a seco.	47
Gráfico 14 - Comparativo da perda de massa dos ensaios a seco.....	49
Gráfico 15 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com carga de 5N.....	50
Gráfico 16 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 5N.....	51
Gráfico 17 - Pressão de contato em função do ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 5N.....	53
Gráfico 18 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com carga de 10N.....	54
Gráfico 19 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N.	55
Gráfico 20 - Pressão de contato do ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 10N.....	57
Gráfico 21 - Variação da força atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificante 5w40 e carga de 25N.	58
Gráfico 22 -Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 10N.....	58
Gráfico 23 - Pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 25N.	60
Gráfico 24 - Comparativo da força de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaios lubrificados com óleo 5w40.....	61
Gráfico 25 - Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaios lubrificados com óleo 5w40.....	62

Gráfico 26 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificados com óleo 5w40.	62
Gráfico 27 - Comparativo da perda de massa de ensaios lubrificados com óleo 5w40.	64
Gráfico 28 - Comparativo da pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificados com óleo 5w40.	64
Gráfico 29 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com carga de 5N.	65
Gráfico 30 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec a carga de 5N.	66
Gráfico 31 - Pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com a carga de 5N.	68
Gráfico 32 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com carga de 10N.	69
Gráfico 33 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec a carga de 10N.	69
Gráfico 34 - Pressão de contato em função do tempo do ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com a carga de 10N.	71
Gráfico 35 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com carga de 25N.	72
Gráfico 36 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec a carga de 25N.	73
Gráfico 37 - Pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com a carga de 25N.	75
Gráfico 38 - Comparativo da força de atrito em função do tempo de ensaios lubrificados com Militec.	76
Gráfico 39 - Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaios. Ensaio lubrificados com Militec.	76
Gráfico 40 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaios lubrificados com Militec.	77
Gráfico 41 - Comparativo da perda de massa de ensaios lubrificados com Militec. ...	79
Gráfico 42 - Comparativo da pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificados com Militec.	79
Gráfico 43 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio com carga de 5N.	81
Gráfico 44 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio com carga de 10N.	81
Gráfico 45 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio com carga de 25N.	82
Gráfico 46 -Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaios lubrificados. Ensaio com carga de 5N.	83
Gráfico 47 -Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaios lubrificados. Ensaio com carga de 10N.	83
Gráfico 48 - Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaios lubrificados. Ensaio com carga de 25N.	84
Gráfico 49 - Comparativo da massa perdida.	87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 AÇOS	17
2.1.1 AÇO SAE 1045.....	17
2.2 CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES.....	18
2.2.1 CONTATOS CONFORME E NÃO-CONFORME	19
2.3 TRIBOLOGIA	20
2.3.1 ATRITO	20
2.3.2 LUBRIFICANTE	21
2.3.2.1 ADITIVOS PARA LUBRIFICANTES	22
2.3.2.1.1 LUBRIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	24
2.3.2.1.2 LUBRIFICAÇÃO ELASTOHIDRODINÂMICA OU MISTA	24
2.3.2.1.3 LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE.....	25
2.3.3 DESGASTE	26
2.3.3.1 DESGASTE POR DESLIZAMENTO	27
2.4 DESGASTE DO AÇO SAE 1045.....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 MATERIAIS	33
3.2 MÉTODOS.....	34
3.2.1 TRIBÔMETRO.....	34
3.2.2 ENSAIOS.....	35
3.2.3 CÁLCULO DO VOLUME PERDIDO.....	36
3.2.4 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO – REGIME DE LUBRIFICAÇÃO... 37	
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1 ENSAIOS A SECO	38
4.1.1 CARGA NORMAL: 5N	38
4.1.2 CARGA NORMAL: 10N	41
4.1.3 CARGA NORMAL: 25N	43
4.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS A SECO	45
4.2 ENSAIOS LUBRIFICADOS COM ÓLEO 5W40.....	50
4.2.1 CARGA NORMAL: 5N	50
4.2.2 CARGA NORMAL: 10N	54
4.2.3 CARGA NORMAL: 25N	57
4.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS LUBRIFICADOS COM ÓLEO 5W40.....	61
4.3 ENSAIOS LUBRIFICADOS COM MILITEC.....	65
4.3.1 CARGA NORMAL: 5N	65
4.3.2 CARGA NORMAL: 10N	68
4.3.3 CARGA NORMAL: 25N	72
4.3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS LUBRIFICADOS COM MILITEC.....	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
5.1 COMPARATIVO ENTRE OS ENSAIOS: A SECO, LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40 E LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40+MILITEC	80
6 CONCLUSÃO.....	88
7 TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	90

1 INTRODUÇÃO

Desde 1908, quando a Ford lançou o modelo T (*The Universal Automobile*), o aço vem sendo utilizado dentro do setor automotivo e se tornou uma das principais matérias primas para o desenvolvimento de automóveis, devido a sua versatilidade e vida útil. Um dos principais aços utilizados é o SAE 1045 devido, principalmente, a sua boa relação custo-benefício. (DIFERRO, 2021)

O aço SAE 1045 é uma das principais ligas metálicas, com médio teor de carbono, utilizado na indústria mecânica por causa da sua boa soldabilidade, usinabilidade, além de apresentar ótima resistência e propriedades de impacto. Esse aço é empregado na produção de eixos, parafusos, engrenagens leves, colunas, entre outros. (GIASSSI, 2023)

Uma das relevantes preocupações na utilização de aços é a sua resistência ao desgaste. Para melhorar essa propriedade muitas vezes é necessário submetê-los a tratamentos térmicos visando aprimorar alguns aspectos específicos do material. (HEBERLE, 2019)

O desgaste é um fenômeno natural que consiste na perda progressiva de material e o surgimento de danos superficiais. Ele pode ser classificado de diversas formas, desde o aparecimento de marcas, que podem ser causadas por corrosão, polimento, lascamento e por atrito, até mecanismos de remoção de material, que pode ocorrer por adesão, erosão, oxidação e abrasão. Com isso, o desgaste será sempre descrito como a perda de massa, resultante de alguma deterioração. (HEBERLE, 2019)

Para proporcionar um melhor desempenho tribológico dos aços, ou seja, melhorar seu comportamento em condições de atrito e desgaste, são utilizados lubrificantes. Os lubrificantes são substâncias: líquidas, sólidas ou gasosas, que são introduzidas entre as superfícies deslizantes e que tem uma resistência ao cisalhamento menor do que as próprias superfícies em contato ou suas interfaces. (TRINDADE, 2014)

Os óleos lubrificantes são utilizados em partes móveis de motores, sendo fundamental para melhorar seu desempenho e para aumentar o tempo de vida útil destes.

O estudo do comportamento do desgaste do Aço SAE1045, em condições lubrificadas, faz-se necessário, considerando sua abrangência de utilização no setor automotivo. (CIDADE, 2016)

Para melhorar o desempenho dos óleos lubrificantes utilizam-se aditivos, que são compostos químicos que têm como objetivo principal de atribuir novas propriedades ao lubrificante ou melhorar as já existentes. O uso de aditivos vem sendo impulsionado em relevante parte pelas modernas especificações técnicas de máquinas e equipamentos automotivos sempre na tentativa de prolongar sua vida útil. (CIDADE, 2016)

Além dessa classe que aditivos, tem-se ainda os chamados condicionadores de metais, cuja utilização permitiria uma melhor acomodação entre os anéis do pistão e as paredes do cilindro, reduzir a oxidação, o atrito e a corrosão dos componentes, sem afetar a viscosidade do óleo. Condicionadores de metais como o Millitec-1, por exemplo, permanecem adsorvidos nas superfícies metálicas, evitando que contaminantes e partículas se depositem nelas e dessa forma, melhorando o desempenho e a vida útil do motor. (MILITEC-1, 2021)

O desgaste de metais em meios lubrificadas, utilizando o Condicionador de Metais Millitec-1, é uma linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida desde 2017, no Laboratório de Tribologia da Faculdade UnB-Gama. Ensaio de desgaste do tipo pino contra disco, usando o Aço AISI 304, foram realizados por Clemente e Cueva (2017) e Lemos (2018) Antunes (2020). Pacheco (2020) fez estudos semelhantes com o Aço SAE 1045.

As atividades desenvolvidas nesse TCC deram continuidade ao trabalho realizado por Pacheco (2020), que em seus ensaios de desgaste utilizou uma velocidade tangencial de 1,25 m/s. Este trabalho objetivou fazer uma análise da influência da velocidade tangencial sobre o desgaste, sendo usada uma velocidade de 3,3 m/s.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho teve como objetivo geral realizar um estudo do comportamento do desgaste do Aço SAE 1045, atritando contra si mesmo, por meio de ensaios do tipo pino sobre disco, usando uma velocidade tangencial constante de 3,3 m/s e diferentes condições de carga e lubrificação.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar o comportamento do desgaste do aço 1045, atritando contra si mesmo, no sistema pino sobre disco com três cargas diferentes, 5N, 10N e 25N e sobre as seguintes condições de lubrificação:

- Ensaios a seco (ausência de lubrificante);
- Ensaio lubrificado com óleo SAE 5W40;
- Ensaio lubrificado com óleo SAE 5W40 com adição do aditivo Millitec-1.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do que será abordado no presente trabalho.

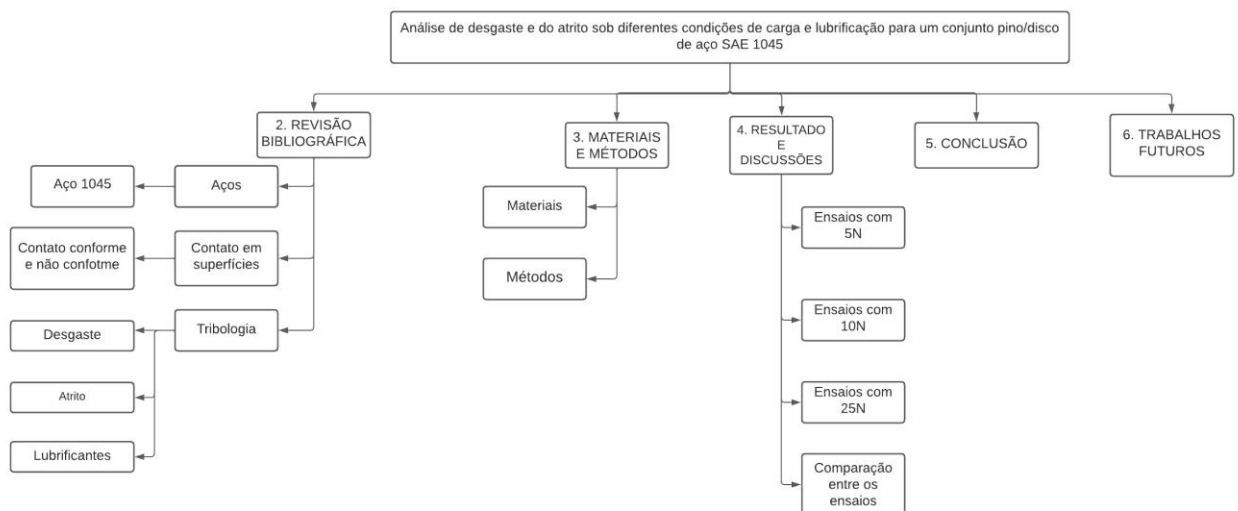


Figura 1 - Fluxograma da estrutura do trabalho.
Fonte: Autoria própria, 2023.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS

Os aços são ligas metálicas ferrosas que possuem ferro-carbono e outros elementos de liga em sua composição. Os aços mais comuns podem ser classificados devido à presença de diferentes concentrações de carbono, que são: baixo, médio e elevado. (CALLISTER, 2002)

Atualmente, o que é produzido em maior quantidade são os aços de baixo teor de carbono, possuindo menos de 0,3% Carbono (C). São materiais que possuem grande ductilidade e tenacidade, são bons para extenso trabalho mecânico e que os tornam requisitados para diversas aplicações, como: carcaças de automóveis, algumas formas estruturais, chapas, tubulações e peças de grandes dimensões em geral e materiais não temperáveis. (CALLISTER, 2002)

Já os aços de médio teor de carbono, possuem concentrações entre 0,3% a 0,70% de C. São aços que apresentam acréscimos de cromo, níquel e molibdênio para melhorar as suas propriedades mecânicas e, quando, temperados e revenidos conseguem atingir boa tenacidade e resistência. Normalmente são aplicados em rodas, engrenagens, virabrequins e para peças que necessitam de alta resistência. (CALLISTER, 2002)

Os aços com alto teor de carbono, apresentam em sua estrutura uma concentração maior que 0,7%. São materiais que possuem maior dureza e resistência depois de temperados. Apresentam boa resistência ao desgaste abrasivo, por esta razão, são usados para a fabricação de ferramentas de corte, molas e arames de alta resistência. (CALLISTER, 2002)

2.1.1 AÇO SAE 1045

O Aço SAE 1045 é um aço de médio teor de carbono, e além de carbono, possui outros elementos de liga em sua composição, como apresentado na Tabela 1. Este aço é bastante utilizado na indústria mecânica, pois apresenta várias características consideradas importantes como, alta resistência à corrosão, facilidade de conformação mecânica e de soldagem, suporta forças de alto impacto, além de

ter boa resistência mecânica e à fadiga. Algumas das propriedades do Aço SAE 1045 são apresentadas na Tabela 2. (MARTINELLI, 2023; LUZ, 2013)

Tabela 1 - Composição química do Aço SAE 1045.

Elemento	Nomenclatura	Concentração (%)
Carbono	C	0,43 a 0,50
Manganês	Mn	0,60 a 0,90
Silício	Si	0,10 a 0,60
Enxofre	S	0,05 (máx.)
Fósforo	P	0,04 (máx.)

Fonte: Martinelli, 2023.

Tabela 2 - Propriedade do Aço SAE 1045.

Nº SAE	Densidade (g/cm ³)	Limite de resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza Rockwell "C" (HRC)
1045	7,87	585	450	190	57

Fonte: Luz, 2013.

2.2 CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES

Segundo Hutchings (1992), quando duas superfícies são aproximadas suavemente, o contato ocorrerá, inicialmente, em apenas alguns pontos. À medida que a carga normal aumenta, as superfícies se aproximam e um número maior de asperezas nas duas superfícies entram em contato. Já que essas asperezas fornecem os únicos pontos em que as superfícies se tocam, elas são responsáveis por suportar a carga normal na superfície e por gerar quaisquer forças de atrito que atuem entre elas.

Uma compreensão da maneira como as asperezas, de duas superfícies, interage sob cargas variadas é essencial para qualquer estudo de atrito e desgaste. O conceito de contato de aspereza fornece uma explicação física para muitas observações tribológicas comuns. As distribuições de tensões elásticas macroscópicas que resultam quando as superfícies são carregadas umas contra as outras também são úteis para considerar a deformação subsuperficial e os danos causados por mecanismos como deformação plástica, fratura ou fadiga. (HUTCHINGS, 1992)

Segundo Sampaio e Noronha (2009), o contato entre superfícies depende de diversos fatores, como: temperatura, deformações elásticas e plásticas, rugosidade da superfície, propriedade químicas e físicas.

2.2.1 CONTATOS CONFORME E NÃO-CONFORME

Um contato é tido como conforme quando a superfície potencial de contato, entre os dois sólidos, está exatamente ajustada num estado sem carregamento, isso quer dizer que o contato entre as superfícies se ajusta de forma completa. A característica desse tipo de contato é que o tamanho da área de contato independe do carregamento, tornando o histórico de carregamento desprezível e ao final a superfície de contato se conserva. (SAMPAIO, 2009)

No contato “não-conforme” não existe uma superfície de contato específica, o contato acontece em uma área nominal muito pequena como em algum ponto ou em uma linha. Nesta condição, mesmo com cargas muito moderadas, a pressão de contato resultante pode ser muito alta. O histórico de carregamento neste caso é relevante, a área de contato muda conforme a aplicação do carregamento, tendendo a aumentar. (SAMPAIO, 2009)

Na Figura 2, é mostrada a diferença entre o contato conforme e o não-conforme.

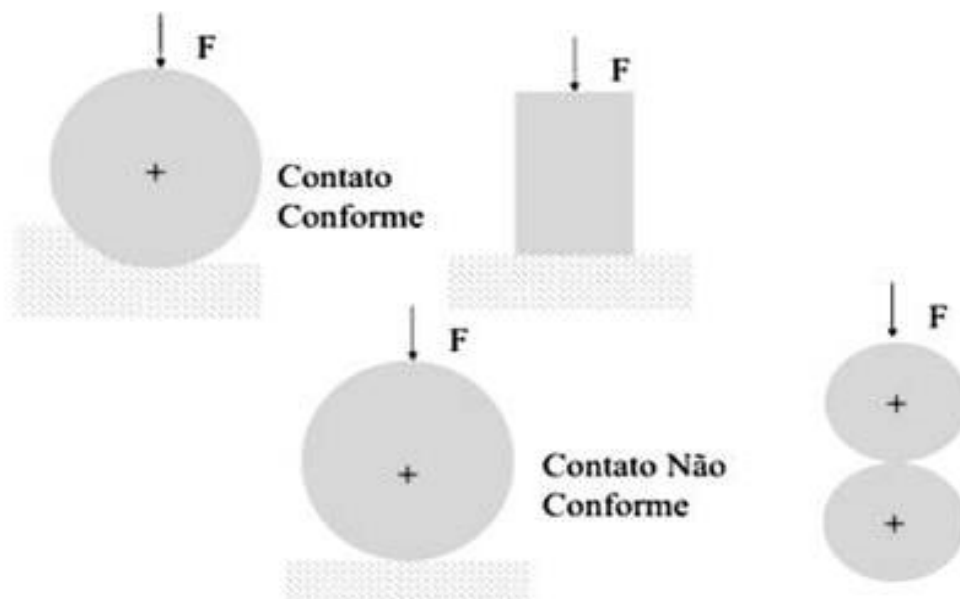


Figura 2 - Contato conforme e não conforme.
Fonte. Lemos, 2018.

2.3 TRIBOLOGIA

De acordo com Hutchings (1992), “Tribologia é a ciência e a tecnologia das interações de superfícies em movimento relativo e que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação dessas superfícies”. Além disso, a Tribologia é uma ciência multidisciplinar, pois reúne diversas áreas de conhecimentos para poder explicar e prever os comportamentos de sistemas físicos que são utilizados em sistemas mecânicos. (RADI *et al.*, 2007)

2.3.1 ATRITO

O atrito pode ser definido como a dissipação de energia de corpos ou substâncias que se movem em relação a outras ou como a resistência encontrada no corpo quando este se movimenta em contato com outro corpo. O atrito abrange duas classes importantes do movimento relativo: o rolamento e o escorregamento (deslizamento). O atrito é como uma força tangencial resistiva que age na direção oposta ao movimento de um corpo sobre o outro. (HUTCHINGS,1992)

Segundo o Blau (1992), as leis do atrito são enunciadas da seguinte maneira:

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

A primeira lei, segundo Hutchings (1992), pode ser descrita como pela Equação 1:

$$F = \mu * N, \text{ Equação (1)}$$

Na qual, μ é o coeficiente de atrito e N é a carga normal. Para Hutchings (1992), essa lei apenas não é válida para algumas situações não lubrificadas e para polímeros. A segunda lei não foi tão estudada quanto a primeira lei do atrito, mas observou-se que ela não se aplica também para os polímeros. Pode-se inferir que a força de atrito é maior quando inicia o movimento, do que com o movimento já iniciado, sendo assim o coeficiente de atrito estático (μ_e) é maior que o coeficiente de atrito dinâmico (μ_d).

O atrito dinâmico ainda pode ser dividido em duas situações: atrito de rolamento e atrito de deslizamento, como ilustrado na Figura 3, a seguir apresentada. (PROFITO, 2010)

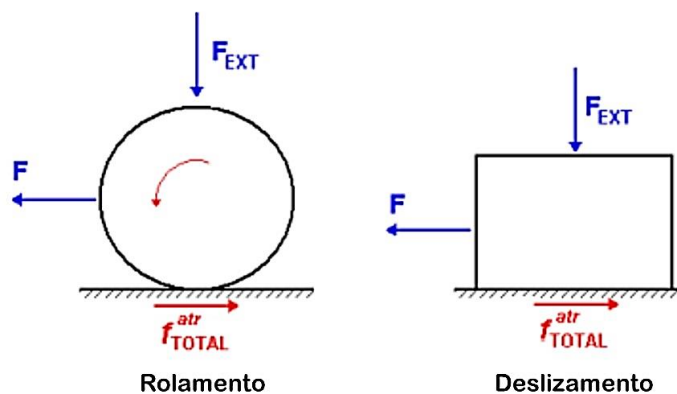


Figura 3 - Tipos de movimento relativo entre dois corpos.
Fonte: Profito, 2010.

O atrito em superfícies secas é regido pelas leis da mecânica clássica. Em uma análise microscópica, as forças interatômicas atuam nos pontos de contato entre as superfícies, e a quantidade de pontos depende fortemente da força normal, entre as superfícies, e das suas rugosidades superficiais. Durante o contato, pode ocorrer adesão entre os materiais e, com o movimento relativo entre eles, essas adesões podem ser rompidas gerando vibrações, calor e ondas sonoras. A adesão entre os materiais é dependente de aspectos como a presença de oxidação e fluidos lubrificantes, que podem tanto contribuir quanto evitar o atrito. (LEMOS, 2018)

2.3.2 LUBRIFICANTE

A lubrificação é introduzida, entre dois sólidos deslizantes, para reduzir o atrito e o desgaste. Os lubrificantes apresentam uma resistência ao cisalhamento menor do que a própria superfície em contato e além de remover o calor, os detritos e diminuir os ruídos que podem ser gerados durante o processo de deslizamento. (BLAU, 1992)

Os processos de lubrificação podem assumir muitas formas diferentes, pois depende da geometria dos corpos em contato, da rugosidade, da textura das superfícies deslizantes, da carga de contato, da pressão e da temperatura, das velocidades de rolamento ou deslizamento, das condições ambientais, das propriedades físicas e químicas do lubrificante, da composição do material e das propriedades da camada próxima à superfície. (BLAU, 1992)

Em contatos conformes a lubrificação ocorre normalmente por um filme de lubrificante que separa as superfícies sólidas em movimento. As principais propriedades para contatos conformes lubrificadas são a viscosidade e o coeficiente de temperatura-viscosidade. (BLAU, 1992)

Já os contatos não conformes lubrificadas ocorrem em áreas pequenas de contato e com filmes de lubrificantes muito finos. Neste tipo de contato a pressão exercida pelo lubrificante é muito alta e o seu desempenho é afetado pela deformação elástica da superfície em atrito. A viscosidade em função da pressão e da temperatura possui influência na eficácia do lubrificante. (BLAU, 1992)

Os lubrificantes podem ser classificados como óleos, graxas e sólidos. Os óleos lubrificantes são substâncias utilizadas para reduzir o ruído, calor e desgaste, aumentando assim a vida útil de componentes móveis. Eles podem ser de origem animal ou vegetal (óleos graxos), derivados de petróleo (óleos minerais), produzidos em laboratório (óleos sintéticos) e misturas de dois ou mais tipos - óleos compostos. As graxas são consideradas compostos sólidos ou pastosos, que podem ser de origem mineral ou sintético mais a adição de um agente espessante (como por exemplo o sabão). Apresentam resistência a sair para fora do contato, são eficientes para formar filmes por ação de *squeeze*¹ e atuam como vedação. (GALÁGARRA, 2019)

2.3.2.1 ADITIVOS PARA LUBRIFICANTES

Os aditivos são compostos químicos que tem como função melhorar o desempenho dos óleos lubrificantes, atribuindo-lhes novas propriedades ou melhorando as já existentes. O uso de aditivos tem sido impulsionado pelo aumento das especificações técnicas de máquinas e equipamentos, com o intuito de prolongar a vida útil e diminuir o consumo de lubrificantes. (CIDADE, 2016)

Os principais aditivos acrescentados aos óleos lubrificantes são detergentes, dispersantes, emulsificantes, antioxidantes, anticorrosivos, antidesgaste, melhoradores do índice de viscosidade, entre outros. Na Tabela 3, são mostrados alguns tipos de aditivos, indicando também, seus principais componentes e suas funções. Além disso, os lubrificantes automotivos comerciais podem conter várias

¹ *Squeeze* significa compressão.

categorias de aditivos, dependendo das exigências e dos requisitos para o seu melhor desempenho. (CIDADE, 2016)

Tabela 3 - Tipos, funções e componentes de aditivos utilizados em lubrificantes automotivos.

Tipo de aditivo	Componentes principais	Funções
Melhorador de índice de viscosidade	Polialquimetacrilatos, Copolímeros de Olefinas	Reduzir a tendência de variação da viscosidade com a variação da temperatura
Redutor de ponto de fluidez	Polimetacrilatos, Poliacrilamidas	Impedir que os óleos congelem, mantendo sua fluidez sob baixas temperaturas
Antiespumante	Siliconas, Polímeros sintéticos	Minimizar a formação de espumas que tendem a se formar devido a agitação dos óleos lubrificantes
Antioxidante	Ditiofosfatos de zinco Fenóis	Retardar a oxidação dos óleos lubrificantes
Detergente/Dispersante	Sulfonatos, Fosfonatos	Impedir a formação de depósitos de produtos de combustão e oxidação, mantendo-os em suspensão no próprio óleo
Anticorrosivo	Ditiofosfatos de zinco Sulfonatos	Neutralizar os ácidos que se formam durante a oxidação e que provocam a corrosão de superfícies metálicas

Fonte. Lima, 2016.

Um dos aditivos multifuncionais utilizados na indústria automotiva é o Militec-1, segundo o site da marca (MILITEC-1, 2021), ele é o primeiro lubrificante condicionador de metais, pois é o único que possui a tecnologia exclusiva “*Dry Impregnated Lubrication*”.

O Militec-1 atua nas superfícies metálicas em atrito e nos pontos críticos de calor dentro do equipamento. As suas moléculas de Militec-1 se fixam na superfície metálica por meio da adsorção. Isso ocorre entre 38°C e 66° C, dependendo das condições de atrito e de carga. O Militec-1 reduz drasticamente o atrito, melhorando o aproveitamento de energia, resultando no aumento de potência ou diminuição do consumo, além de reduzir as emissões de gases poluentes. (MILITEC-1, 2021)

Segundo diversos autores (HUTCHINGS, 1992; BAYER 1994), a lubrificação de superfícies pode ocorrer de três maneiras diferentes: lubrificação hidrodinâmica, mista e limítrofe.

2.3.2.1.1 LUBRIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA

A lubrificação hidrodinâmica ocorre quando se forma um filme lubrificante que separa completamente as superfícies que estão em movimento, como mostrado na Figura 4, a seguir apresentada.

O filme é gerado pela velocidade relativa entre as superfícies e sua presença reduz o atrito e o desgaste. Este tipo de lubrificação normalmente ocorre em contatos conformes, onde a pressão de contato é relativamente baixa. A formação dessa camada de lubrificação só é possível devido a convergência entre os ângulos das superfícies. A viscosidade do óleo é a propriedade mais relevante na determinação do filme e do atrito. (BLAU, 1992; HUTCHINGS,1992)

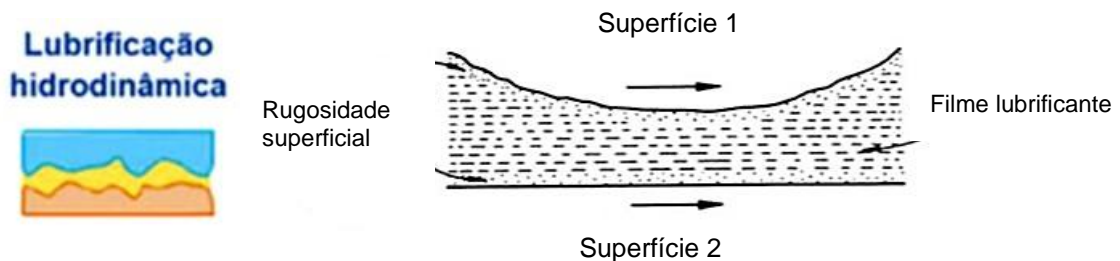


Figura 4 - Lubrificação Hidrodinâmica.
Fonte: Adaptado de Neale, 2001.

2.3.2.1.2 LUBRIFICAÇÃO ELASTOHIDRODINÂMICA OU MISTA

A lubrificação elastohidrodinâmica pode ser definida como uma forma de lubrificação hidrodinâmica, mas onde localizadamente ocorre contato entre as superfícies, como mostrado na Figura 5. O contato promove uma deformação elástica das superfícies, assim como mudanças na viscosidade do óleo provocadas pelo aumento da pressão. (BLAU, 2019)

Segundo Hutchings (1992), o contato não-conforme envolve uma interação pontual ou em linha entre as superfícies e por conta disso a pressão sobre essa área é bastante elevada. Essas altas pressões provocam dois efeitos, o primeiro é o achatamento elástico local e o segundo é o aumento da viscosidade de várias magnitudes na região de contato.

Hutchings (1992) afirma que o módulo de elasticidade dos materiais influencia na lubrificação nas interfaces. A partir do momento em que se tem uma deformação elástica, a área de contato aumenta, distribuindo assim a pressão exercida no local. E para materiais com elevados módulos de elasticidade, essa lubrificação ocorre em

escala micrométrica. Esse tipo de lubrificação está presente em engrenagens, cames, rolamentos, entre outros.

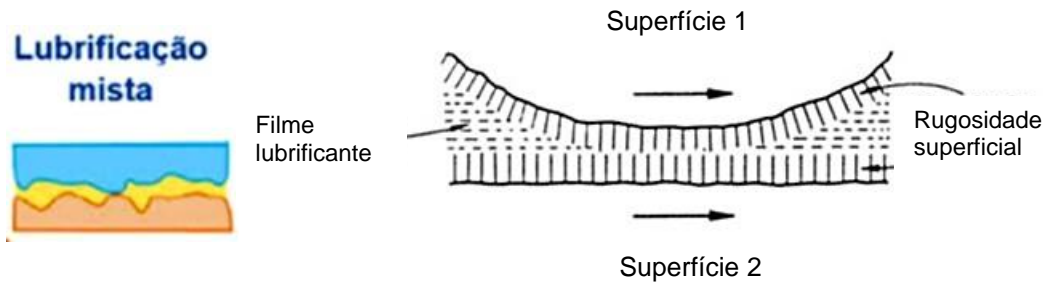


Figura 5 - Lubrificação Elastohidrodinâmica ou mista.
Fonte: Adaptado de Neale, 2001.

2.3.2.1.3 LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE

Segundo Hutchings (1992), sob pressões de contato muito altas, ou em velocidades de deslizamento muito baixas, as forças hidrodinâmicas são insuficientes para manter um filme lubrificante contínuo entre as superfícies deslizantes, e o contato direto ocorrerá entre as asperezas. Altas taxas de atrito e desgaste ocorrerão na partida, a menos que as superfícies sejam protegidas de alguma forma. Vários aditivos conhecidos como modificadores de fricção, aditivos antidesgaste e aditivos EP são geralmente incorporados em óleos e graxas para proteger as superfícies neste regime que é denominado lubrificação limítrofe.

A lubrificação limítrofe não depende apenas da viscosidade do óleo, mais também da sua lubricidade ou oleosidade. Nessa lubrificação ocorre a adsorção ou formação por reação química de moléculas de lubrificação na superfície do material, como ilustrado na Figura 6. De acordo com Hutchings (1992), ao interagirem com a superfície, a carga normal dos corpos é suportada pelo lubrificante adsorvido e não pelo material sem a lubrificação.

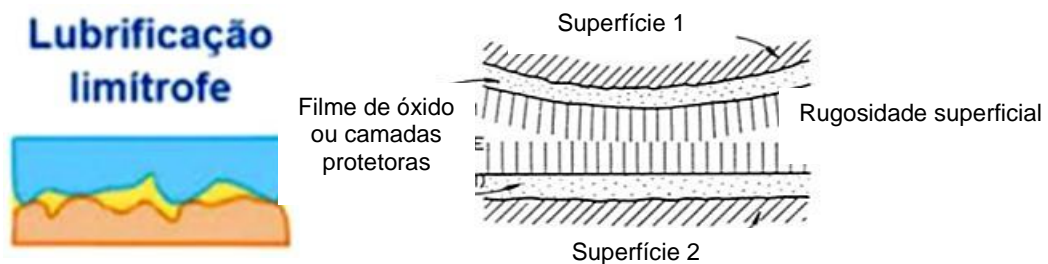


Figura 6 - Lubrificação Limítrofe.
Fonte: Adaptado de Neale, 2001.

2.3.3 DESGASTE

O desgaste pode ser definido como danos na superfície de um sólido, que pode ser causado pela remoção ou alteração do material devido a ação de um outro sólido, líquido ou até mesmo um gás em contato. Normalmente esse fenômeno acontece na superfície do material, mas a constante remoção ou alteração do material pode levar a outros problemas, como falhas por desgaste. (BOTH, 2011)

Segundo Bayer (1994), existe três maneiras de se identificar desgaste em uma superfície:

- Trilha de desgaste: podem ser encontrados quando duas superfícies sólidas em estão em contato, aparecendo arranhadas, riscadas ou até mesmo que o material foi polido;
- Condições que ocorrem o desgaste: analisar se o desgaste ocorreu lubrificado, a seco, metal-metal ou em elevadas temperaturas;
- Remoção de material: quando e como ocorre a remoção de material, definem quais foram os agentes que trouxeram danos ao material.

O desgaste pode ocorrer de diversas formas, como explicado pela Figura 7.

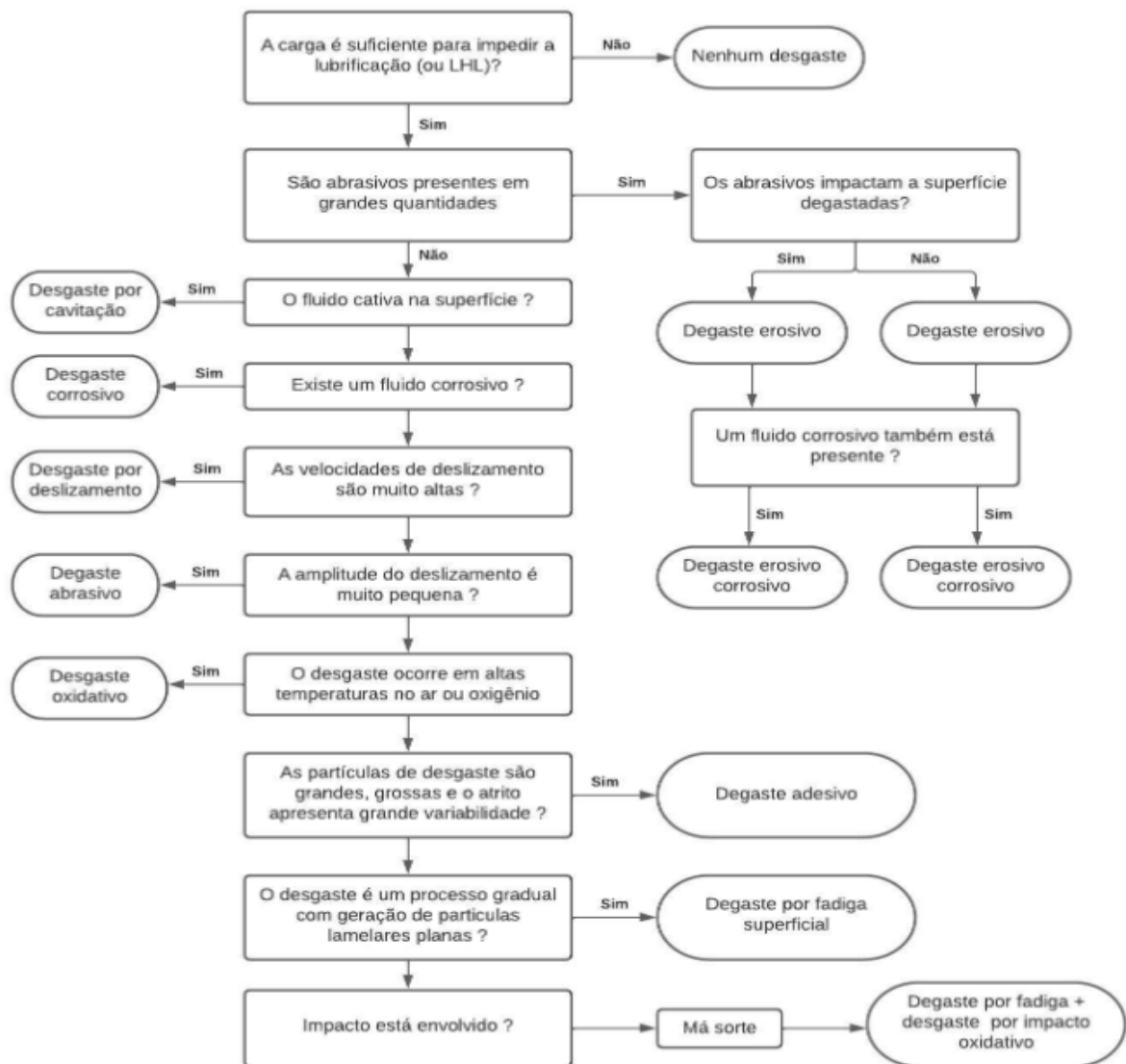


Figura 7 - Diversas formas de ocorrência do desgaste.
Fonte: Stachowiak; Batchelor, 2005.

2.3.3.1 DEGASTE POR DESLIZAMENTO

Apesar das diversas formas de desgaste, neste trabalho será retratado o desgaste por deslizamento. Ele é definido como a interação entre as asperezas das superfícies em contato e pode ocorrer por diversos fatores, como por tensões mecânicas, oxidações e temperatura. (LTAD, 2023)

Existem alguns fatores que aumentam a severidade do desgaste por deslizamento, entre eles está a utilização de cargas maiores porque aumentam a concentração de tensões. Essa concentração de tensões e a velocidade que ocorre o desgaste interfere na temperatura na interface do material. A taxa de transferência de calor está relacionada diretamente a velocidade com que ocorre o atrito, já que

em baixas velocidades o calor gerado é dissipado por condução tendo um sistema isotérmico e já em velocidades maiores existe uma diminuição na troca de calor e a temperatura vai aumentando até que o sistema possa ser considerado adiabático. (PINTO, 2013, *apud* HUTCHINGS, 1992)

No desgaste por deslizamento a remoção de material pode ser realizada por meio de quatro mecanismos, apresentados na Figura 8.

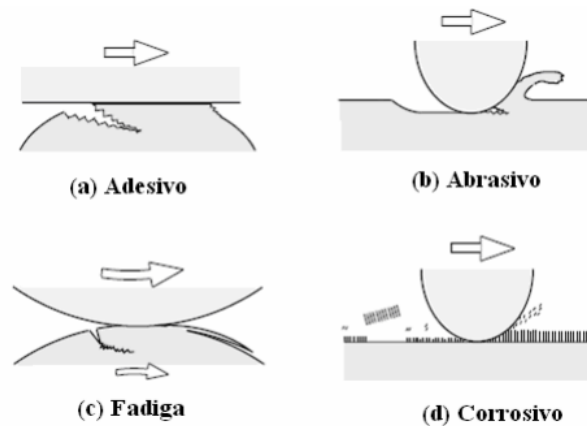


Figura 8 - Esquemático do desgaste por deslizamento.
Fonte: Radi *et al.*, 2007.

(a) Desgaste Adesivo é definido como a transferência de material de uma superfície para a outra quando está em movimento relativo causado pela soldagem entre as superfícies, impedido o deslizamento. O resultado desse tipo de desgaste são deformações plásticas, possível criação de trincas e a transferência do material. (BOTH, 2011)

(b) Desgaste abrasivo ocorre a remoção do material, ocasionado por partículas ou protuberâncias duras que são movimentadas entre duas superfícies. (RADI *et al.*, 2007)

(c) Desgaste por fadiga é quando ocorre a remoção do material por variações cíclicas de tensões, ocasionando o início de uma trinca e sua propagação, pode acontecer na superfície do material ou logo abaixo dela, podendo causar fraturas e desprendimento de material. (BOTH, 2011)

(d) Desgaste Corrosivo ocorre por meio de processos erosivos, líquidos ou gasosos, onde a perda de material é causada pelo impacto repetitivo de partículas nas

superfícies. O desgaste acontece pela redução ou afinamento da superfície do material, com o aumento da rugosidade e ausência de ranhuras. (BOTH, 2011)

2.4 DESGASTE DO AÇO SAE 1045

O desgaste do Aço SAE 1045 foi analisado por Pacheco (2021). Em seus experimentos foi utilizado um conjunto disco contra pino confeccionados em Aço SAE 2045 e ensaiados em quatro situações: a seco (sem lubrificação), lubrificado com óleo sintético Selenia 5w40, lubrificado com óleo 5w40+condicionador de metais Militec-1 e lubrificado com óleo 5w40+Militec, após tratamento térmico superficial. Em cada situação de ensaio foram usadas três cargas normais 5N, 10N e 25N, com uma velocidade tangencial de 1,25 metros por segundo (m/s) e com duração de 20 minutos. Essas condições de ensaio foram muito parecidas com o que foi realizado neste presente trabalho.

Nos ensaios da força de atrito com 5N, o “ensaio a seco” mostrou se inicialmente parecido com os ensaios lubrificados indicando que uma possível camada de óxido tenha agido no sistema com um lubrificante sólido, evitando assim o contato metal-metal, mas após a quebra dessa camada o ensaio se mostrou bastante severo em relação aos lubrificados. O ensaio lubrificado com óleo 5w40 apresentou resultados melhores em comparação aos usados com Militec, conforme o Gráfico 01 a seguir apresentado. (PACHECO, 2021)

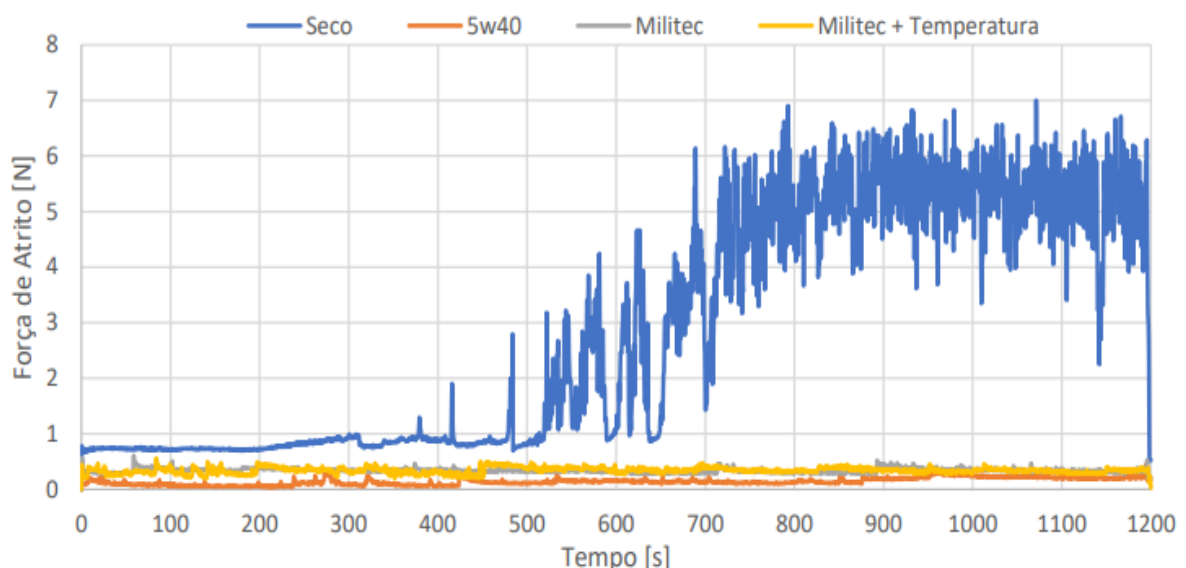


Gráfico 1 - Comparativo das forças de atrito com a carga de 5N.
Fonte: Pacheco, 2021.

Já nos ensaios com 10N a utilização do Militec apresentou melhores resultados quando analisados com os outros lubrificadores, agindo no aço como uma camada protetora que diminuiu as ações da força de atrito. O “ensaio a seco” mostrou-se o mais severo entre os quatro ensaios, evidenciando a importância de lubrificação para melhorar a vida útil dos materiais, além disso ele apresentou nos primeiros 50 segundos (s) de ensaio uma curva semelhante aos sistemas lubrificados, indicando assim, novamente, a presença de uma camada de óxido, conforme o Gráfico 02, a seguir apresentado. (PACHECO, 2021)

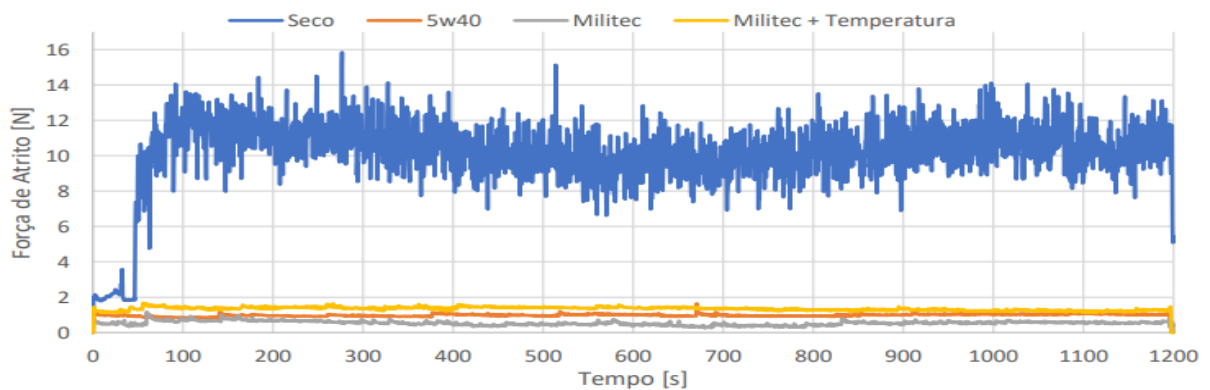


Gráfico 2 - Comparativo das forças de atrito com a carga de 10N.
Fonte: Pacheco, 2021.

O ensaio a seco, com carga de 25N, se apresentou como nos ensaios anteriores, controlada inicialmente por uma camada de óxido e depois da quebra dessa camada o ensaio se tornou o mais severo entre as cargas de 5N e 10N. O tratamento térmico superficial realizado com o óleo 5w40 e o condicionador de metais apresentou os piores resultados quando comparados com os ensaios lubrificados, aumentando a ação da força de atrito e consequentemente o desgaste do material. Além disso, verificou-se que o uso de Militec com óleo 5w40 não trouxe melhorias quando analisado com o ensaio lubrificado 5w40, se mantendo com forças de atrito parecidas, conforme o Gráfico 03, a seguir apresentado. (PACHECO, 2021)

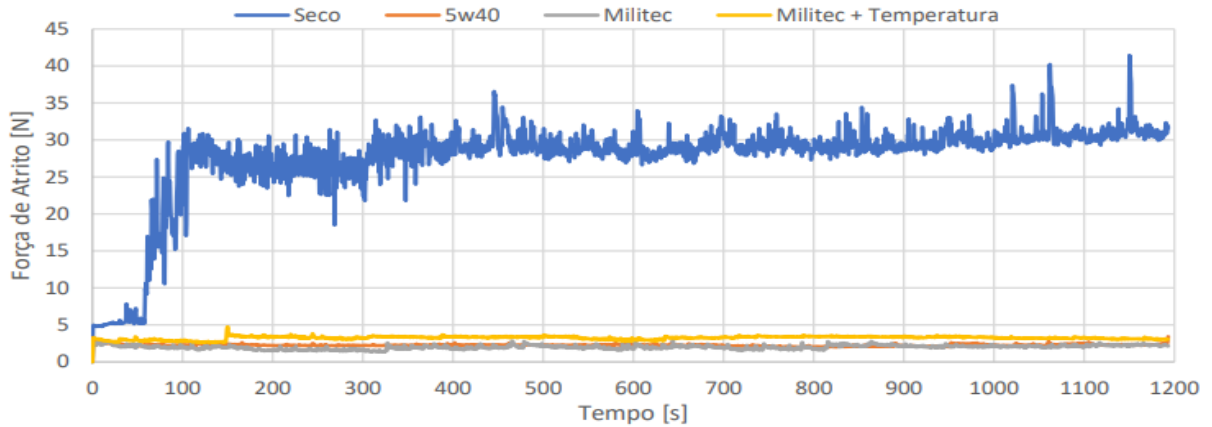


Gráfico 3 -Comparativo das forças de atrito com a carga de 25N.
Fonte: Pacheco, 2021.

Pacheco (2021) ainda analisou o desgaste das superfícies dos pinos para melhor comprovar o que foi analisado na força de atrito e chegou-se à resultados de que os ensaios utilizando o condicionador de Militec apresentaram relevantes perdas de massa e de desgaste quando comparados apenas com o óleo 5w40, como visto no Gráfico 04, a seguir apresentado, e essa maior perda de massa mostrou-se prejudicial à superfície do material.

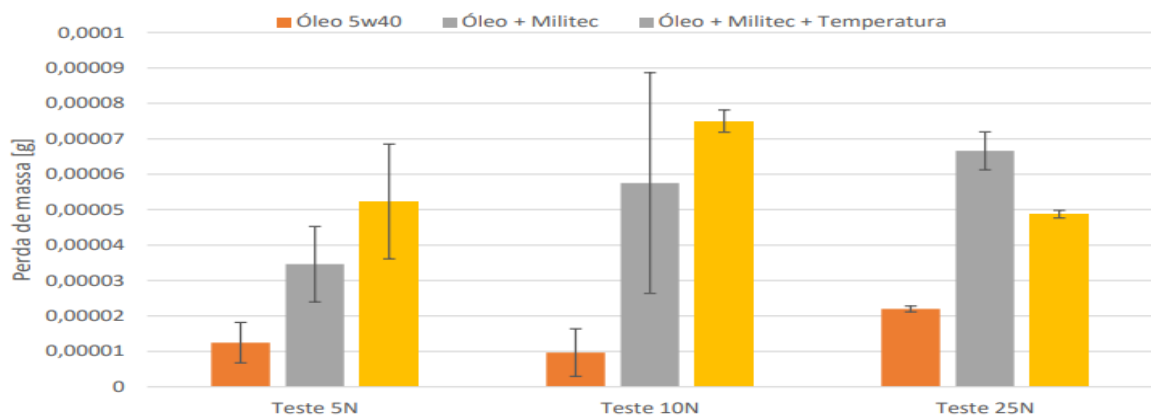


Gráfico 4 – Comparativo da perda de massa dos ensaios lubrificadas.
Fonte: Pacheco, 2021.

A análise da resistência ao desgaste do Aço SAE 1045 também foi investigada por Castro, Santos e Pacheco (2015). Em seu estudo foi analisado o comportamento desse aço em diferentes condições microestruturais, sem lubrificação e lubrificadas com biodiesel B100, óleo diesel B50 e o óleo diesel comercial B7. Além disso, foram utilizadas 3 amostras de Aço SAE 1045, na qual duas das amostras foram realizados o tratamento térmico de têmpera e depois

revenidas, uma em 100°Celsius (C) e a outra em 300°C. Os ensaios foram realizados em tribômetro de tipo pino-sobre-disco, com carga normal de 15N, rotação de 300 rotações por minuto (rpm) e um distância de 4400 metros (m).

O ensaio a seco com o Aço SAE 1045 temperada e revenido a 100°C, analisado por Castro, Santos e Pacheco (2015), indicaram a condição mais severa para o desgaste. Foram realizadas também análises microscópicas desse aço, Figura 9, a seguir apresentada, e foram encontrados sulcos e escoriações no sentido do deslizamento e que indicam mecanismos abrasivos de desgaste e apresentaram também microcraterações que são decorrentes da fadiga devido a tensões cíclicas que são impostas no ensaio. E nos ensaios lubrificados concluiu-se que a utilização do lubrificante biodiesel B100 se mostrou eficiente para a diminuição do desgaste quando comparados com o biodiesel puro.

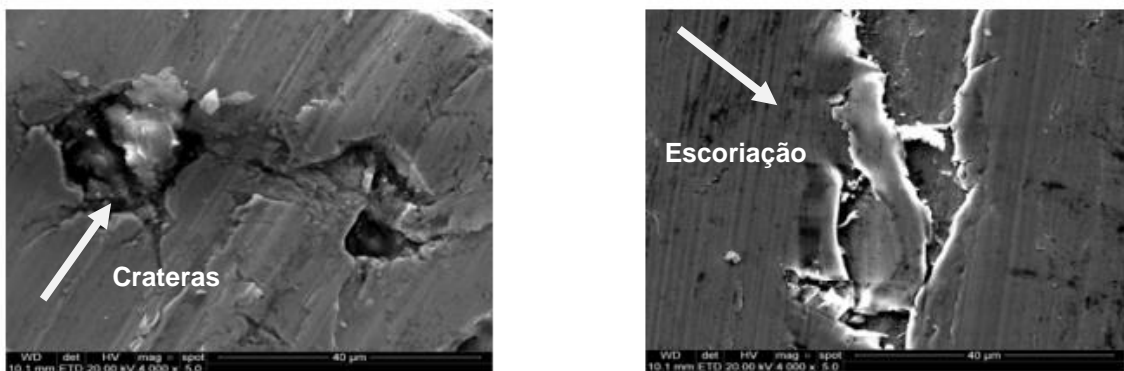


Figura 9 - Análise microscópica do Aço SAE 1045a seco temperado e revenido a 100°C.
Fonte. Castro, Santos; Pacheco, 2015.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para a realização dos ensaios foram utilizados conjuntos de pino e disco confeccionados em Aço SAE 1045. Os pinos foram feitos com 19 milímetros (mm) de diâmetro por 20 mm de comprimento, e os discos com 60 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, como visto na Figura 10, a seguir apresentada.



Figura 10 - Conjunto disco e pino.

Fonte: Pacheco, 2021.

Para os ensaios lubrificados, foi utilizado o óleo sintético Lubrax supera 5W40 – API SN da marca Petrobrás. E para os ensaios lubrificados com óleo e condicionador de metais, foi utilizado o óleo sintético citado acima mais o condicionador de metais da marca Militec-1, como visto na Figura 11, a seguir apresentada.



Figura 11 - Lubrificante Lubrax 50w40 e condicionador de metais militec-1.

Fonte: Autoria própria, 2023.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 TRIBÔMETRO

Os ensaios tipo pino sobre disco foram realizados no laboratório de Tribologia da Universidade de Brasília, com o auxílio de uma bancada de ensaios de desgaste, projetada e construída por Clemente e Cueva (2017) seguindo as normas da ASTM G99.

O tribômetro é composto por um motor de indução elétrico de $\frac{1}{2}$ cv da marca WEG. Um sistema de polias é utilizado para transmitir o movimento de rotação até o disco de ensaio. O tribômetro conta também com uma célula de carga contrapesos para equilibrar as cargas e um local para posicionar a carga normal a ser utilizada nos ensaios. Na Figura 12, a seguir apresentada, mostra um esquemático da bancada.

A bancada é equipada com sensores que permitem a coleta de informações de temperatura, vibração do sistema e força de atrito, em tempo real. A instrumentação da bancada contou com o auxílio de célula de carga de 5Kg que mede os valores da força de atrito resultante da interação do pino sobre o disco e de um termopar do “tipo k”, para medir a temperatura no pino. Os dados foram coletados com a ajuda de um Arduino conectado ao computador, como esquematizado na Figura 12, a seguir apresentada.



Figura 12 - Demonstrativo do Tribômetro.
Fonte. Clemente e Cueva, 2017

3.2.2 ENSAIOS

Antes da realização dos ensaios, foi necessário a preparação das superfícies dos discos e dos pinos. Os discos foram lixados inicialmente com a lixa granulometria 80 até a lixa com granulometria 2500 e logo em seguida polidos com massa de polir automotiva nº1. E os pinos foram lixados inicialmente também com lixa de granulometria 80, mas foram a até a lixa de granulometria 400. Após a preparação das superfícies foram realizados análise superficiais com o auxílio de um microscópio, para garantir a padronização de todos os ensaios.

As condições de ensaios realizados no presente trabalho foram:

- A seco, sem a presença de lubrificação;
- Lubrificado com óleo 5w40; e
- Lubrificado com óleo 5w40 + o condicionado de metais Militec-1.

O arranjo experimental utilizado para a realização dos ensaios de desgaste à seco é visualizado na Figura 13, a seguir apresentada.



Figura 13 - Contato entre pino e disco.
Fonte. Clemente e Cueva, 2017.

E para os ensaios lubrificados foi utilizado um reservatório de óleo localizado na parte inferior do disco, no qual a rotação do disco, por arraste, acaba lubrificando a região de contato entre o disco e o pino, como visto na Figura 14, a seguir apresentada.

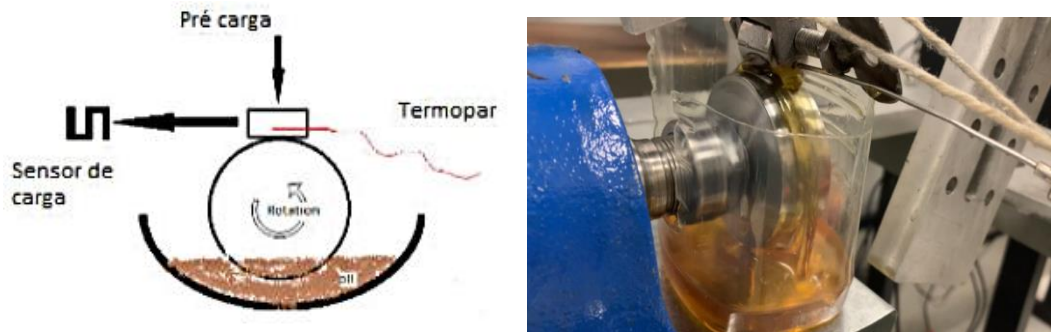


Figura 14 - Sistema de lubrificação.
Fonte: Pacheco, 2021.

Para os ensaios lubrificados com o aditivo Militec-1, foi necessário realizar uma mistura que seguiu as recomendações do fabricante, na qual foi adicionado 2,4 mililitro (ml) de Militec-1 para cada 60 ml de óleo. E as soluções foram preparadas imediatamente antes de cada ensaio.

Para cada condição de ensaio de lubrificação foram utilizados cargas normais de 5N, 10N e 25N. Foram realizados pelo menos três ensaios para cada condição de lubrificação e carga, totalizando dezoito ensaios. A velocidade tangencial utilizada nos experimentos foi mantida constante em 3,3 m/s. E cada teste de desgaste foi realizado nas 3 condições, a seco, lubrificado com óleo 5w40 e lubrificado com óleo 5w40+Militec-1, e cada ensaio teve a duração de 20 min no total.

3.2.3 CÁLCULO DO VOLUME PERDIDO

O cálculo da perda de material nos pinos foi realizado de forma geométrica, com base no volume perdido pois as marcas de desgaste são pequenas e apresentam um formato semelhante à metade de um elipsoide, utilizando a Equação 2 e o esquemático ilustrado na Figura 15, a seguir apresentada, na qual são mostradas as medidas usadas nos cálculos. Foi considerado o valor de 7,87 g/cm³ de densidade para o Aço SAE 1045. As medidas r e R foram coletas utilizando o próprio microscópio juntamente com o programa *ToupView*.

$$V = \frac{r * R * h}{3}, \quad \text{Equação (2).}$$

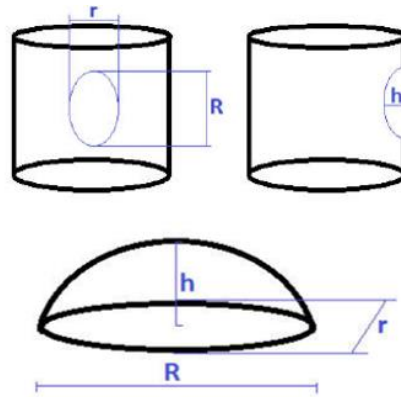


Figura 15 - Esquemático das medidas para o cálculo do volume perdido.
Fonte: Pacheco, 2021.

3.2.4 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO – REGIME DE LUBRIFICAÇÃO

O regime de lubrificação foi determinado por meio do cálculo da pressão de contato entre o pino e o disco. É possível achar a pressão final de contato pela seguinte Equação 3:

$$P = \frac{F}{A}, \text{ Equação (3)}$$

Na qual:

P = pressão de contato [Pa];

F = Força normal [N];

A = Área de contato [m²].

E para descobrir o momento de mudança entre os regimes de lubrificação elastrohidrodinâmica para o hidrodinâmico foi preciso fazer divisões no tempo final e da área final de contato até chegar ao início do teste. Essa divisão foi necessária para estimar o momento em que a pressão de contato fica abaixo de 50 MPa, condição a partir da qual, o regime de lubrificação é considerado como hidrodinâmico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados e discussões sobre os ensaios de desgaste realizados neste trabalho.

4.1 ENSAIOS A SECO

4.1.1 CARGA NORMAL: 5N

Força de atrito: Analisando a curva de força de atrito apresentada no Gráfico 5, observa-se uma região onde a força de atrito aumenta rapidamente, nos instantes iniciais do teste, e logo em seguida apresenta uma oscilação, esta é chamada de região de running. Ela dura um pouco mais de 100s de ensaio. Essa relevante variação na força de atrito pode ser explicada pelo assentamento entre as duas superfícies (período de acomodação). Deve ser considerado também, que o contato entre o pino e o disco é do tipo “não conforme”. Nesta condição, a geometria de contato inicial é apenas uma linha (Área de contato \approx zero); e que com o decorrer do ensaio, as superfícies vão se desgastando e aumentando sua área de contato.

Após o running, a força de atrito se estabiliza em valores próximos de 2 N, mas com uma leve tendência a aumentar até a finalização do ensaio.

Temperatura: A temperatura inicialmente cresce muito rápido em um curto período acompanhando o desenvolvimento da força de atrito, como visto no Gráfico 05. Após esse período a temperatura continua aumentando de forma gradativa, mesmo que a força de atrito tenda a encontrar a estabilidade em valores próximos de 60 °C, isso ocorre porque a geração de calor é muito maior do que a dissipação, fazendo que o sistema acumule mais energia.

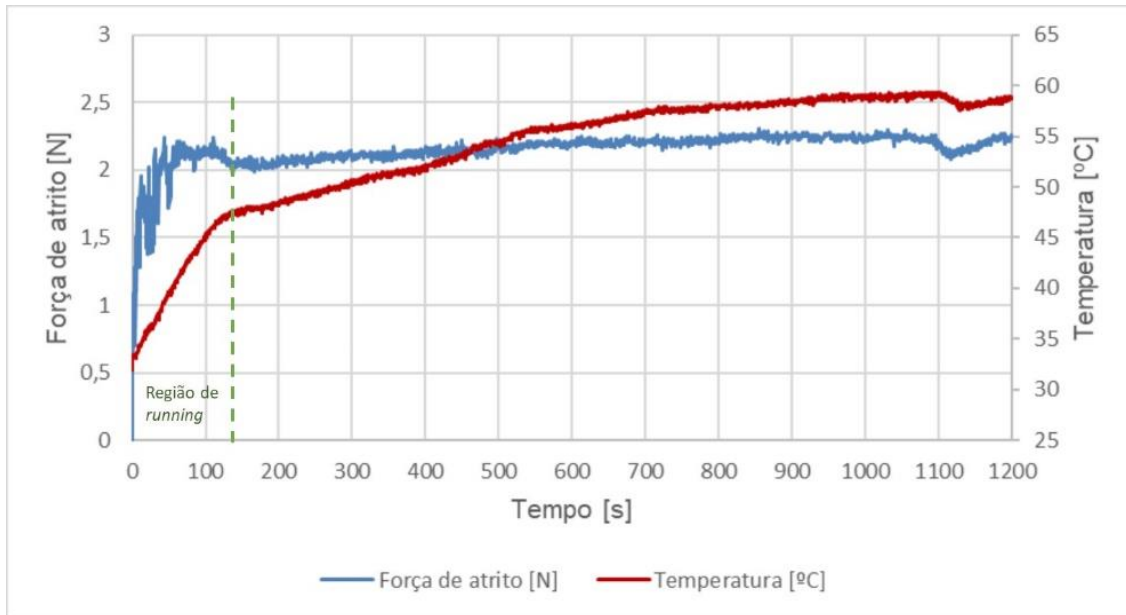


Gráfico 5 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 5N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 06 são apresentados os valores calculados do coeficiente de atrito do ensaio a seco com 5N e apesar da curva ser parecida com a força de atrito elas tem um significado completamente diferente. O coeficiente de atrito (μ) é um valor adimensional.

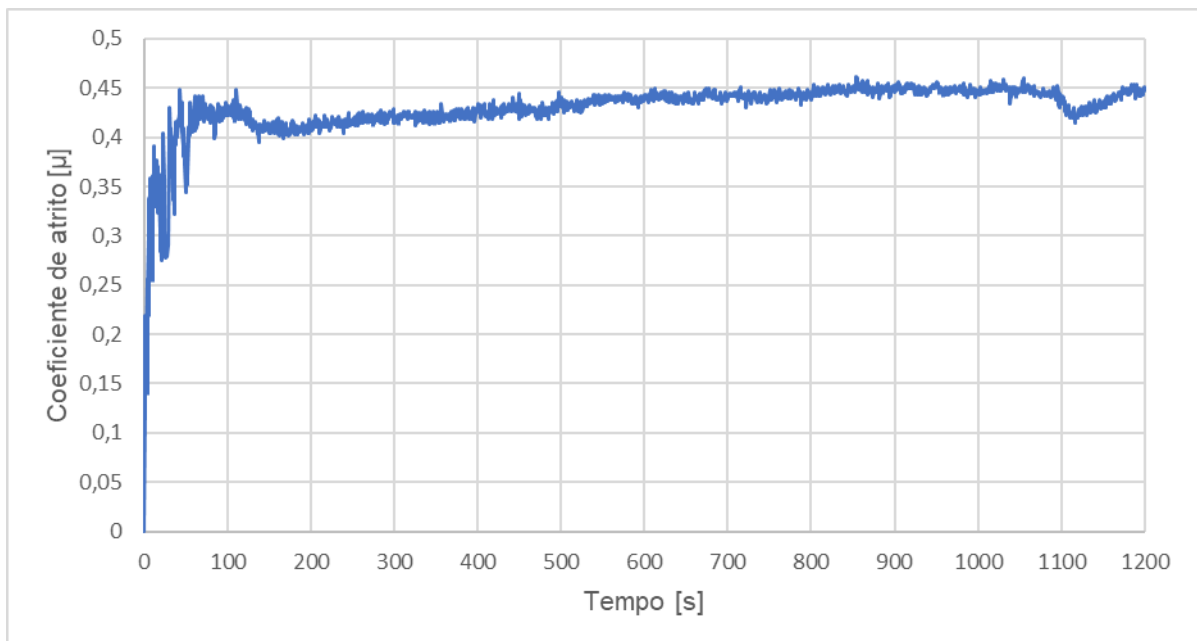


Gráfico 6 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 5N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na Figura 16 são apresentadas as superfícies do disco e do pino, após o ensaio de desgaste a seco. Na superfície do disco é observada uma trilha de desgaste apresentando ranhuras no sentido de deslizamento, gerados por mecanismos abrasivos e são observadas crateras, que são decorrentes da fadiga superficial ocasionadas por tensões cíclicas.

Na superfície do pino são observados sulcos que evidenciam a ação por desgaste abrasivo, causado por partículas duras formadas pelo encruamento do material que foi transferido e, em determinados momentos, acabaram riscando as superfícies. Além disso, a superfície do pino apresenta uma propagação extensa e bem profunda de trincas por fadiga na direção do movimento, além de apresentar rebarbas frágeis, causadas por deformações plásticas.

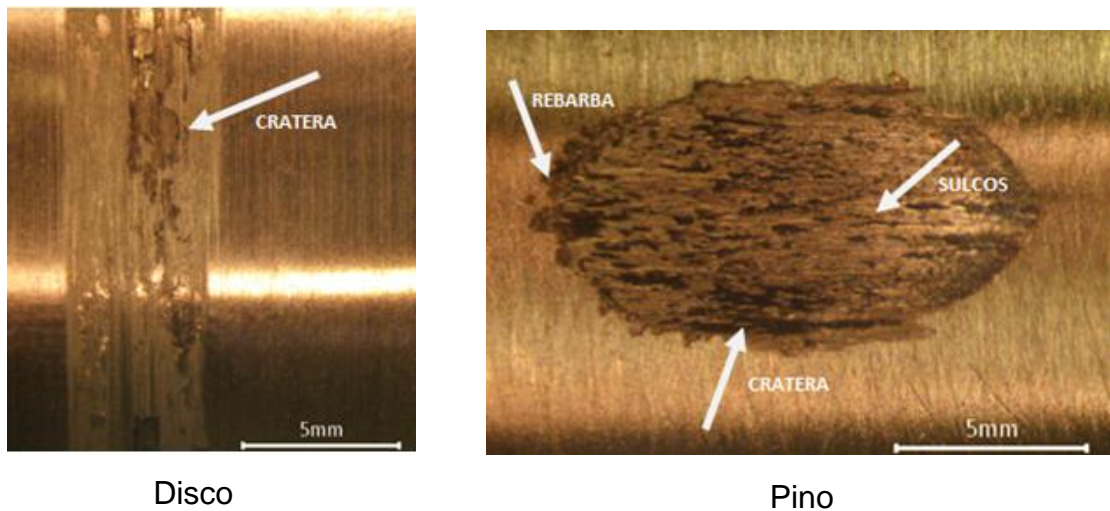


Figura 16 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio a seco com 5N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: Utilizando a Equação 2, foi calculado o volume perdido durante o ensaio, e depois realizada a transformação para massa utilizando a densidade do aço SAE 1045. Na Tabela 4 é apresentado o quanto de massa foi perdida durante o ensaio a seco com uma carga normal de 5N.

Tabela 4 - Perda de massa do ensaio a seco com a carga de 5N.

Ensaio a seco	Massa [10^{-3} g]
5N	140 ± 10

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.1.2 CARGA NORMAL: 10N

Força de atrito: Na curva de força de atrito apresentada no Gráfico 07, do ensaio a seco com a carga de 10N, é possível notar um rápido crescimento da força de atrito, nos primeiros 2s de ensaio, seguido de um período com valores oscilantes até aproximadamente os 200s de ensaio, onde seria completada a região de *running*. Depois desta região, a força de atrito encontra a estabilidade em valores próximos de 4N.

Temperatura: Observa-se ainda no Gráfico 07 que a temperatura apresenta um rápido crescimento inicial, acompanhando o crescimento da força de atrito, e depois vai aumentando de forma menos acentuada, com expectativa de chegar a uma estabilização em valores próximos de 95 °C. Esse lento crescimento da temperatura sugere que a geração de calor provocado pelo atrito, seja maior que a capacidade de dissipação de calor do sistema mecânico como um todo.

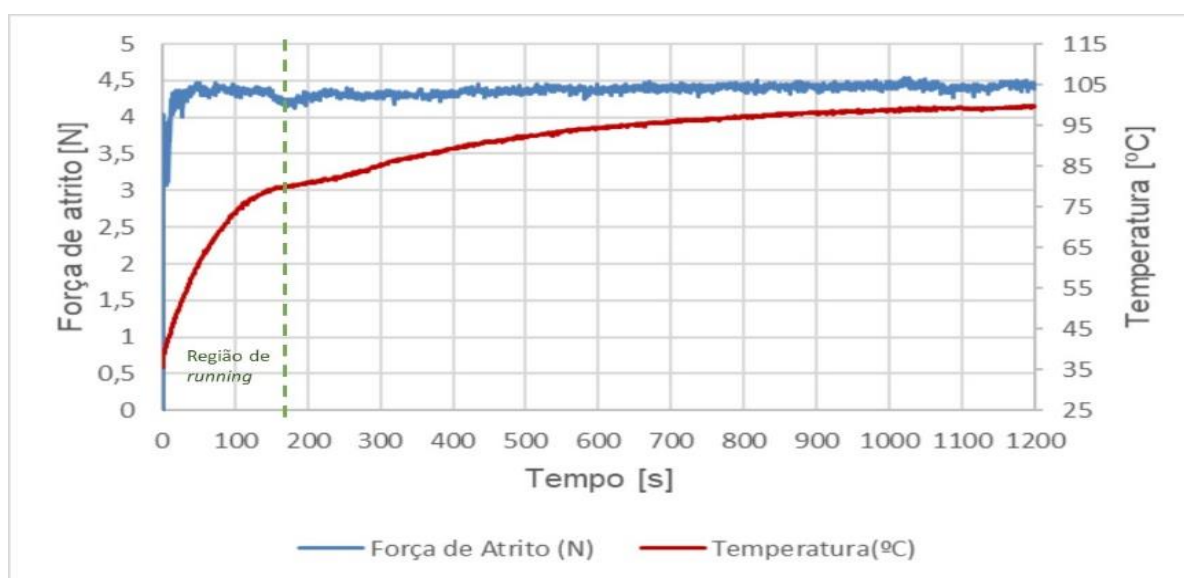


Gráfico 7 -Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 10N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 08 são apresentados os valores de coeficiente de atrito calculados a partir dos resultados de força de atrito. Nesta observa-se que a curva alcança a estabilidade, após o período de *running*, em valores próximos de 0,45.

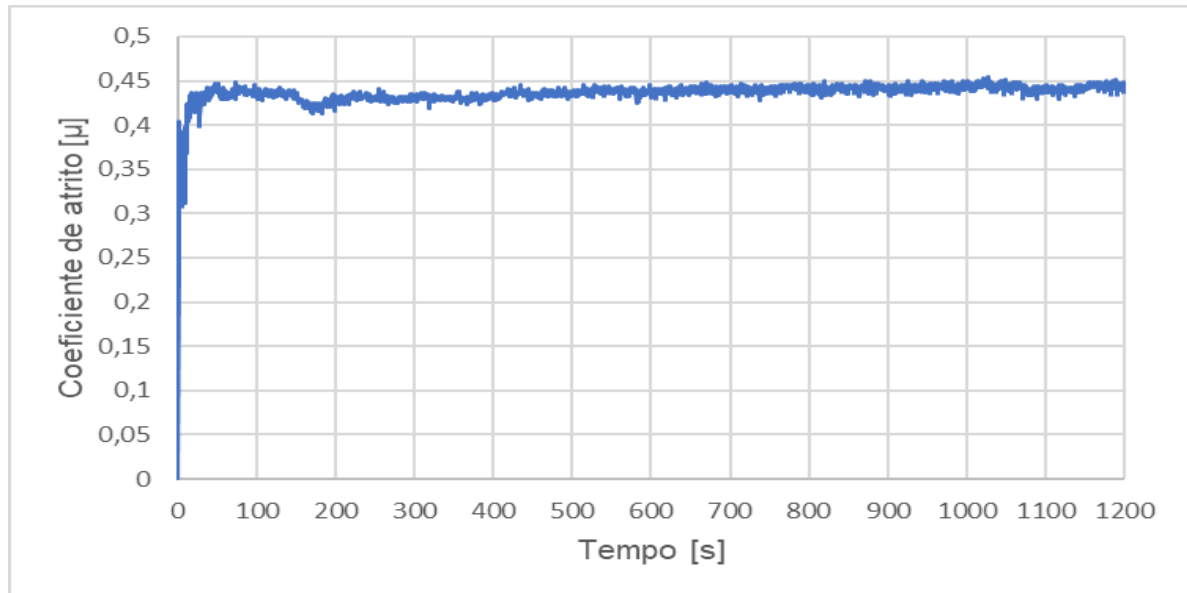


Gráfico 8 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com a carga de 10N
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: A Figura 17, a seguir apresentada, evidencia que o disco (imagem à esquerda) e o pino (imagem à direita) após o “ensaio a seco” com 10N. Na superfície do pino é possível analisar a presença de crateras, que são encontradas a partir de mecanismos de desgaste por fadiga, devido a tensões cíclicas. Já na superfície do pino, encontra-se marcas típicas de desgaste controlado por mecanismos adesivos e de deformação plástica, apresentadas pelas rebarbas.

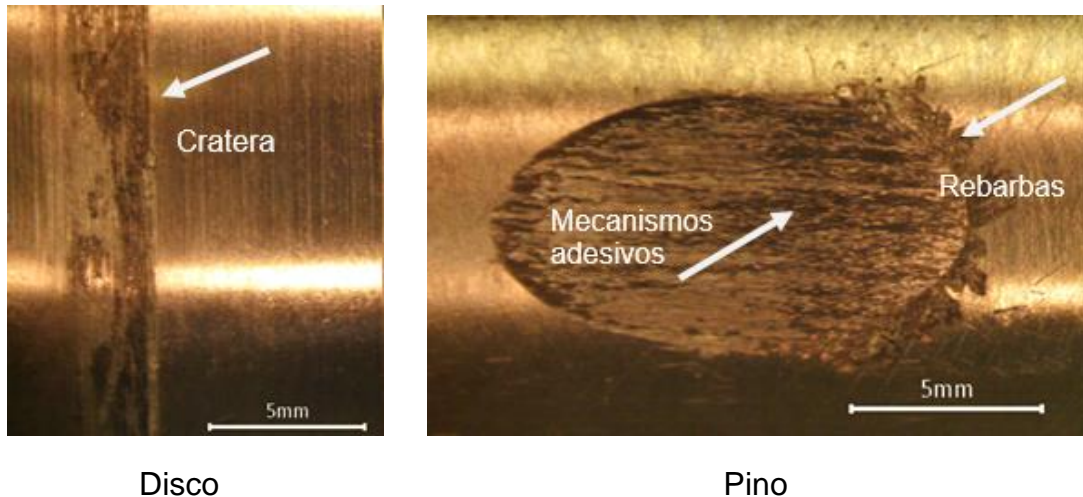


Figura 17 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio a seco com 10N
 Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: Na Tabela 5 é apresentada a perda de massa que ocorreu durante o ensaio de 10N a seco.

Tabela 5 - Perda de massa do ensaio a seco com a carga de 10N.

Ensaio a seco	Massa [10^{-3} g]
10N	145 ± 10

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.1.3 CARGA NORMAL: 25N

Força de atrito: No Gráfico 09, a seguir apresentado, encontram-se os valores de força de atrito do ensaio a seco com a carga de 25N. Como nos ensaios anteriores, apresentou um rápido crescimento inicial de força de atrito, seguido por um período de oscilação até completar o período de *running* (após 200 s de ensaio) e depois encontrando uma estabilidade em valores próximos de 10N.

Temperatura: Igual aos ensaios anteriores, a temperatura também aumenta rapidamente no início, acompanhando a tendência de crescimento da força de atrito, como mostrado no Gráfico 9. Depois do período de *running*, a temperatura continua a aumentar só que mais lentamente, e parece se estabilizar em valores próximo de 155 °C ao final do ensaio.

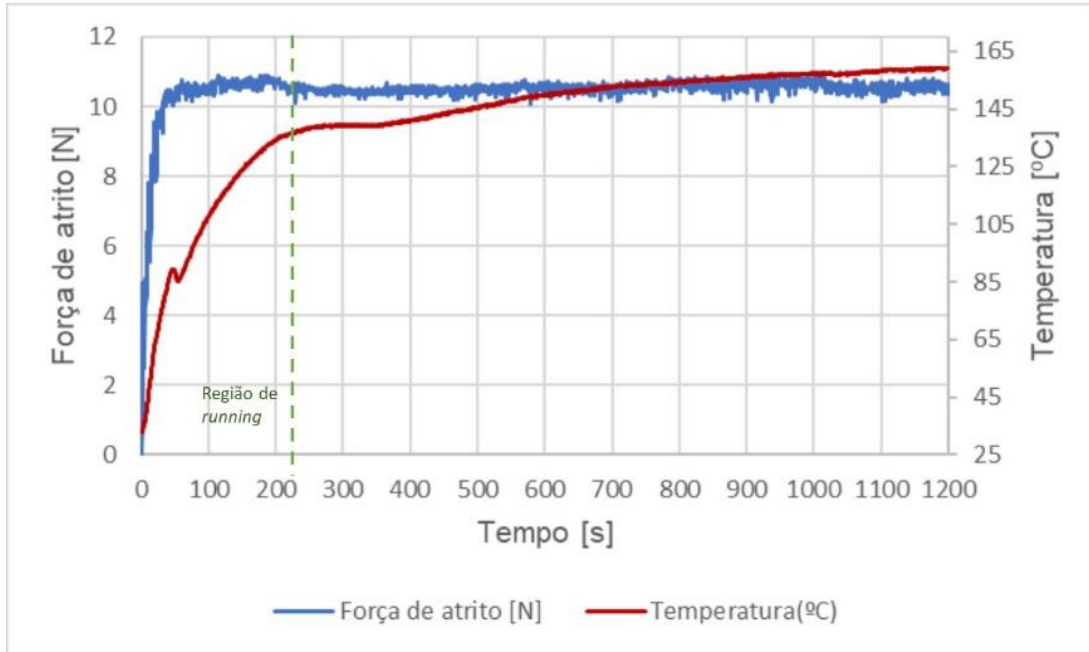


Gráfico 9 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com carga de 25N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 10 são apresentados os valores calculados do coeficiente de atrito. Observa-se que após o running, os valores se estabilizam em torno de 0,44.

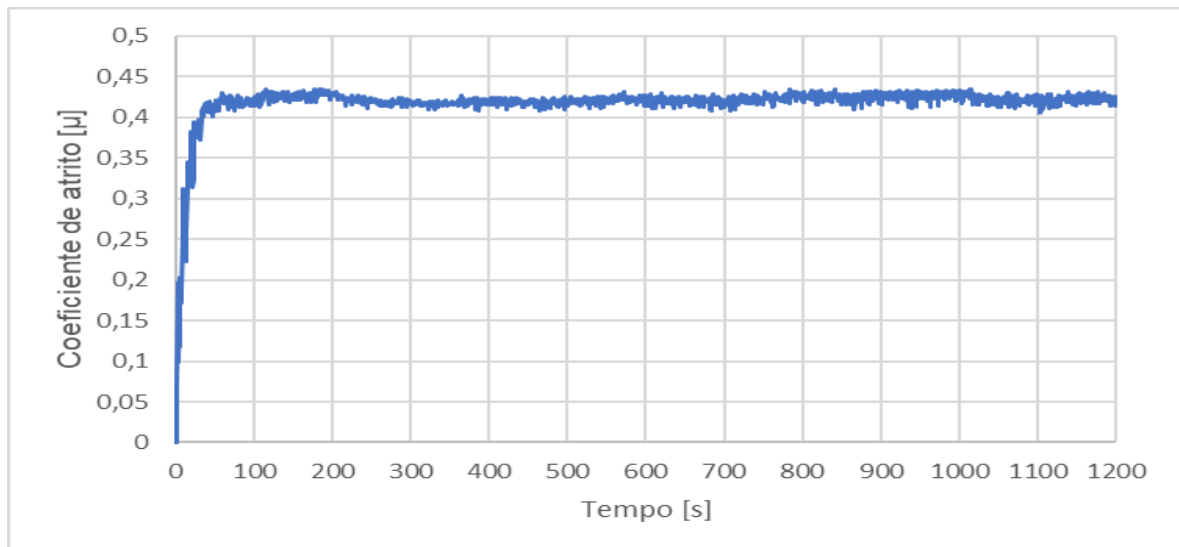


Gráfico 10 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio a seco com a carga de 25N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: As superfícies desgastadas do disco e pino são identificadas na Figura 18. Como apresentado anteriormente, o ensaio a seco com 25N apresentou um desgaste mais severo no dano superficial, mostrando características de mecanismos abrasivos, deformação plástica e desgaste por fadiga. Na superfície do disco é possível visualizar crateras e sulcos, ocasionado por desgaste abrasivo e por fadiga, já na superfície do pino nota-se a presença de rebarbas de natureza frágil e de sulcos profundos, também evidenciando mecanismos de desgaste abrasivo e de deformação plástica.

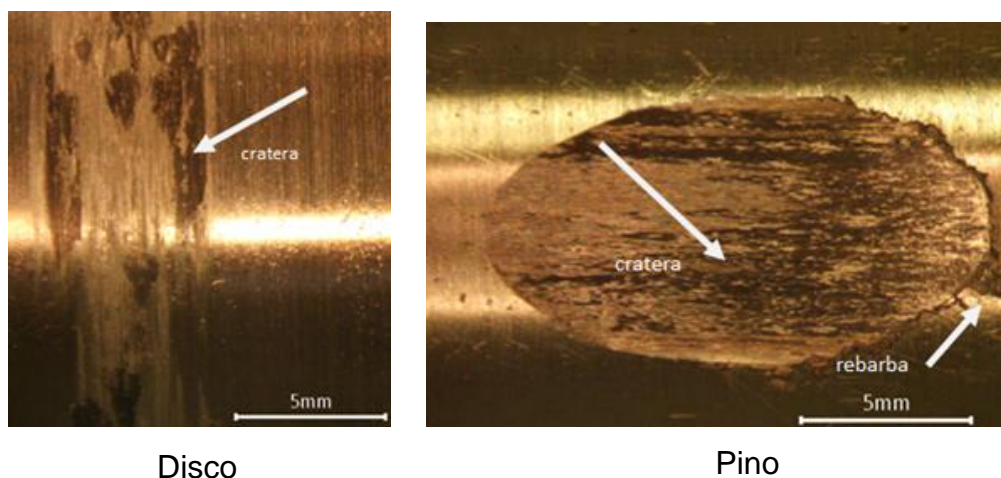


Figura 18 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio a seco com 25N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: Na Tabela 6, a seguir é apresentada a perda de massa que ocorreu durante o ensaio de 25N a seco.

Tabela 6 - Perda de massa do ensaio a seco com a carga de 25N.

Ensaio a seco	Massa [10^{-3} g]
25N	340 ± 25

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.1.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS A SECO

Força de atrito: No Gráfico 11 são apresentadas as curvas de força de atrito obtidas a partir dos ensaios a seco com as cargas de 5N, 10N e 25N. É notório observar que a força de atrito foi diretamente proporcional a carga normal, estabilizando-se em valores próximos de 2N, 4N e 10N respectivamente. Entretanto, foi notado também, que o tempo de *running* ou período de assentamento das

superfícies, foi diferente em cada condição de ensaio, com tempos um pouco maiores que 100s com 5N de carga normal, pouco menores que 200s com 10 N e um pouco maiores que 200s com 25 N.

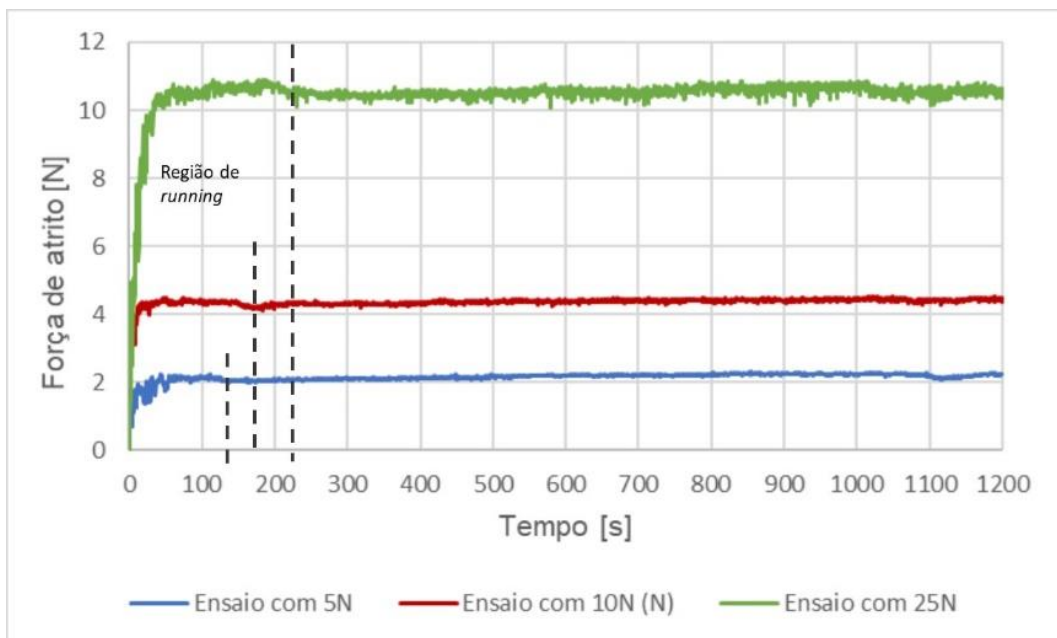


Gráfico 11 -Comparativo da força da força de atrito em função do tempo de ensaios. Ensaios a seco.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Temperatura: O comparativo das curvas de temperatura foram obtidas em função da carga normal que é mostrado no Gráfico 12. Foi possível notar que o aumento da força normal que, provocou o incremento da força de atrito, promoveu também, o aumento do calor gerado nas superfícies e como consequência um incremento na temperatura. Entretanto, este acréscimo não foi proporcional ao observado com a força de atrito. Com a temperatura este acréscimo gerou uma estabilização, após o *running*, em temperaturas próximas de 60 °C, 95 °C e 155 °C, respectivamente.

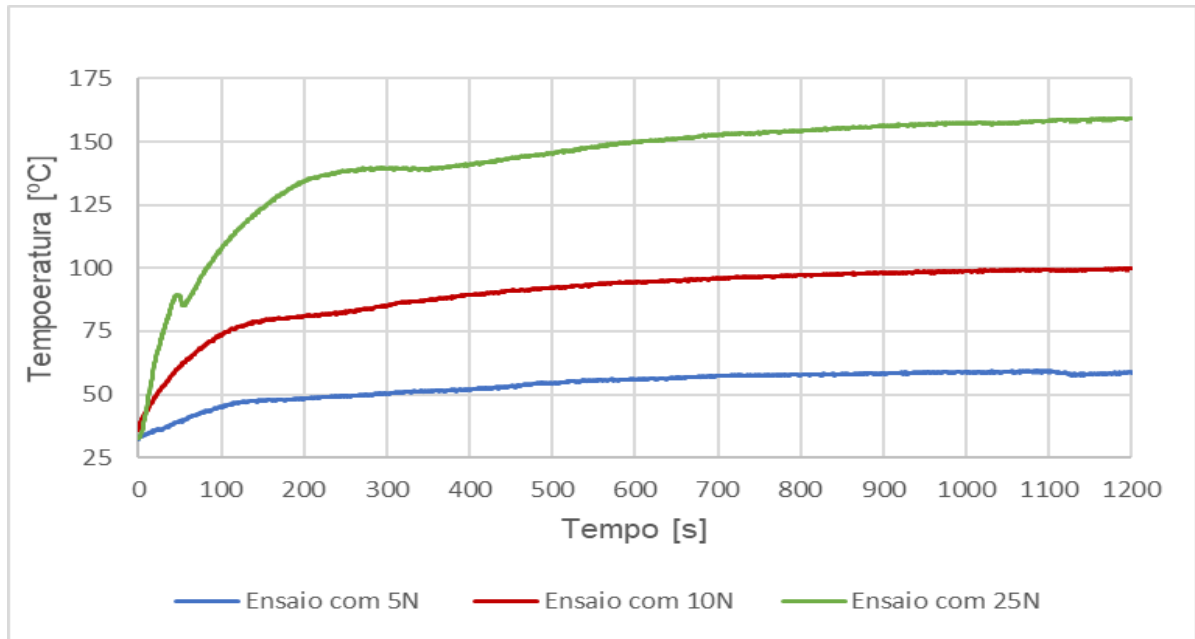


Gráfico 12 -Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaaios a seco.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 13 são apresentadas as curvas de coeficiente de atrito obtidas nos ensaios a seco. Verifica-se que as curvas de coeficiente de atrito são exatamente iguais independentemente da carga normal utilizada.

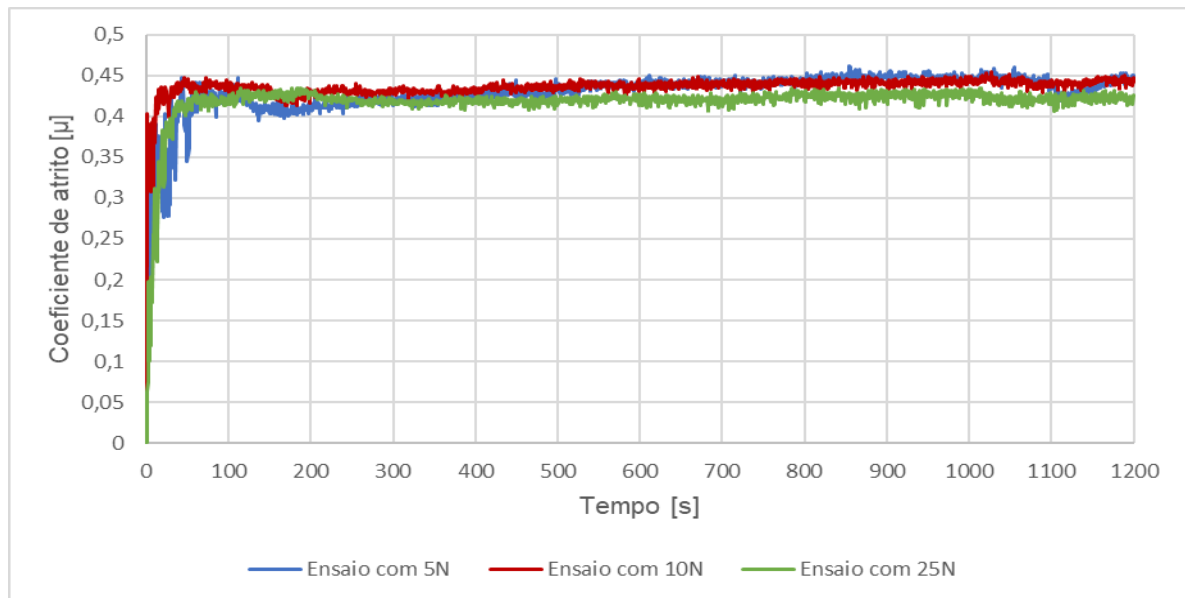
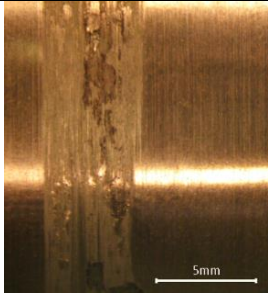
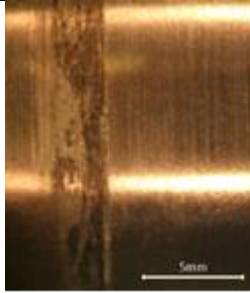
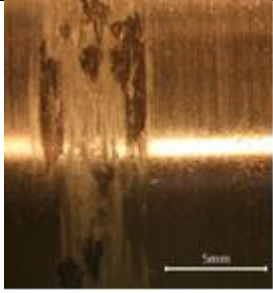
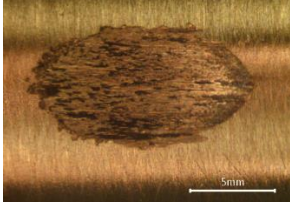
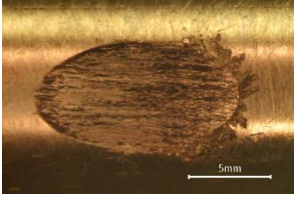
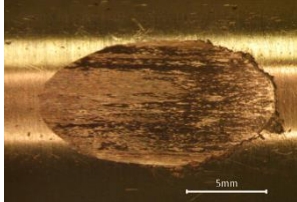


Gráfico 13 -Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaaios a seco.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: Analisando a Tabela 07 é notado que os três ensaios apresentaram as mesmas características de dano superficial, como presença de crateras na trilha dos discos, que indicaram a ação de desgaste por fadiga, devido tensões cíclicas. Já nos pinos foram encontradas a presença de rebarbas de caráter frágil ocasionadas pela deformação plástica e foi encontrado também a presença de sulcos de diferentes cores, podendo ser um indicativo de diversas profundidades. Essas características encontradas no ensaio coincidem com o que foi encontrado por Pacheco (2019) e por Castro, Santos e Pacheco (2015) em seus estudos com o Aço SAE 1045.

Tabela 7 - Comparação das superfícies desgastadas dos ensaios a seco.

Superfície/Carga	5N	10N	25N
Disco			
Pino			

Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: Na Tabela 08 é apresentado o comparativo da massa perdida entre os ensaios a seco e no Gráfico 14 é possível visualizar melhor como essa perda foi muito diferente entre os ensaios. Entre o ensaio de 5N e 10N teve um aumento na perda massa, mas isso ocorreu de forma muito pequena quase imperceptível, mas no ensaio de 25N o desgaste foi muito severo ocasionando uma perda de massa muito maior.

Tabela 8 – Perda de massa dos ensaios a seco.

Ensaio a seco	Massa [10^{-3} g]
5N	140 ± 10
10N	145 ± 10
25N	340 ± 25

Fonte: Autoria própria, 2023.

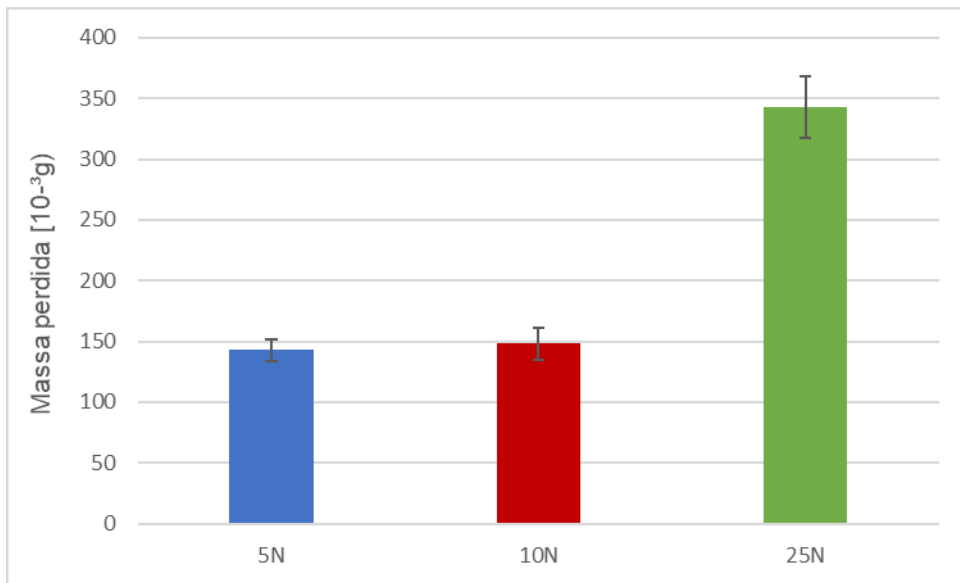


Gráfico 14 - Comparativo da perda de massa dos ensaios a seco.

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2 ENSAIOS LUBRIFICADOS COM ÓLEO 5W40

4.2.1 CARGA NORMAL: 5N

Força de atrito: No Gráfico 15 são apresentados os valores de força de atrito obtidos no ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 5N. Observa-se que a força de atrito cresce rapidamente nos instantes iniciais do ensaio e depois passa por um período de relevantes variações de força de atrito, indicando a região de *running*. Essa região foi onde ocorreu o assentamento entre as superfícies do Aço SAE 1045 e teve uma duração de aproximadamente de 100s e depois alcançou a estabilidade por volta de 0,3N.

Temperatura: A temperatura como visto nos ensaios anteriores cresceu de forma mais rápida no início do ensaio, acompanhando o crescimento da força de atrito e, depois, passou a crescer mais lentamente e de forma constante alcançando uma temperatura máxima de 38,5°C. E novamente este aumento da temperatura esteve relacionado à lenta dissipação de calor do conjunto comparado com a geração de calor provocada pelo atrito.

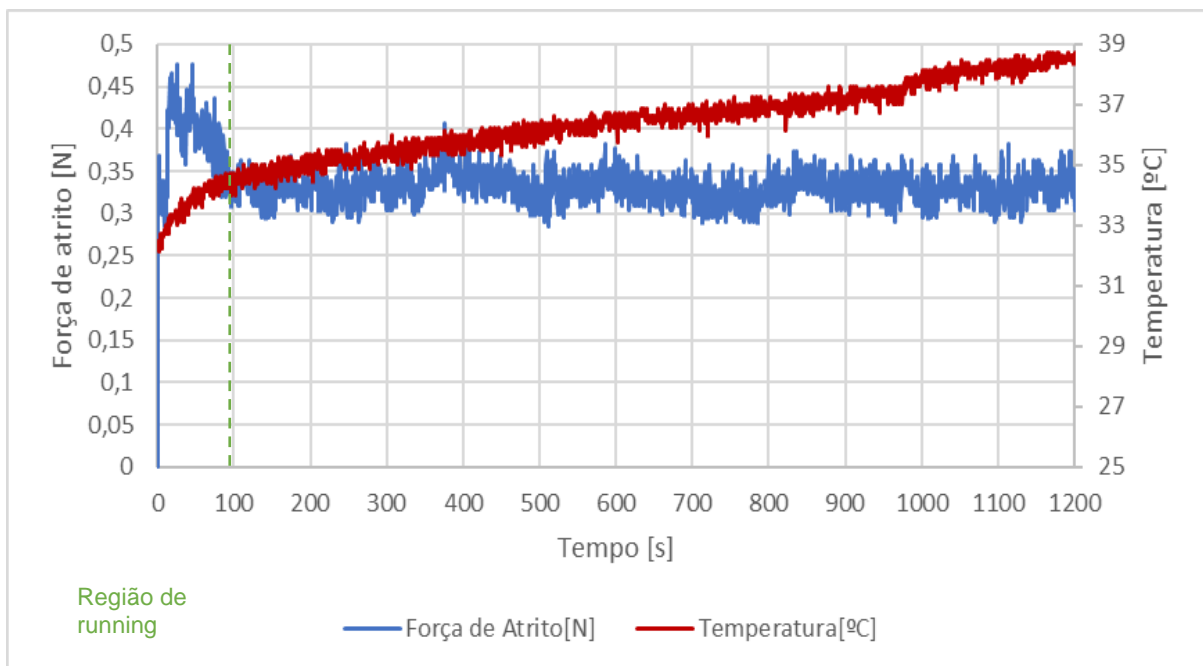


Gráfico 15 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com carga de 5N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 16 é observada a variação do coeficiente de atrito durante o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 5N. Nota-se que depois

da região de running, os alcançasse uma estabilização em valores próximos de 0,065.

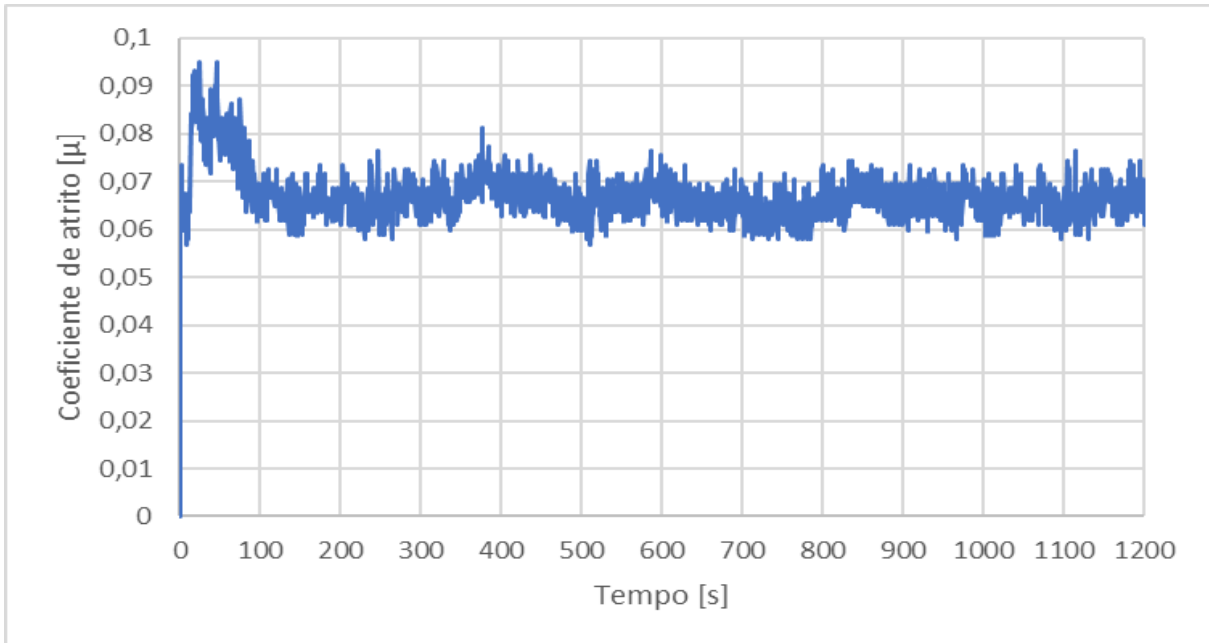


Gráfico 16 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 5N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na Figura 19 são mostrados os danos superficiais causados pelo desgaste por deslizamento. No disco verifica-se a presença de sulcos que foram formados no sentido do deslizamento e foram causados por mecanismos de desgaste abrasivo. Isso ocorreu devido ao contato metal-metal que, mesmo com a utilização do lubrificante, acabou criando a remoção de partículas metálicas, as quais ficaram imersas no óleo ou aderidas as superfícies, e depois voltam à região de contato entre as superfícies e acabam se transformando em agentes abrasivos.

Nas bordas da superfície desgastada do pino, nota-se deformação plástica apresentada por rebarbas de natureza frágil. Essa deformação também foi encontrada nas trilhas de desgaste do disco. Quanto mais escura é a marca da trilha, mais profunda ela é, e portanto, maior remoção de material ocorreu nessas regiões.

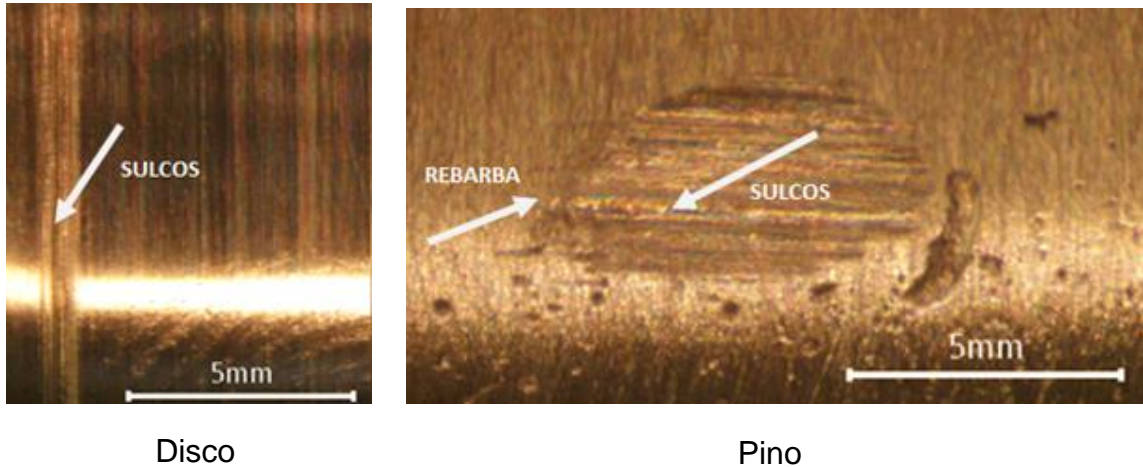


Figura 19 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 5N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: A perda de massa que ocorreu no ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 5N pode ser vista na Tabela 9, a seguir apresentada, ela foi calculada a partir da Equação 2 e depois transformada de volume para massa.

Tabela 9 - Perda de massa do ensaio lubrificado com óleo 5w40 com carga de 5N.

Ensaio lubrificado com óleo 5w40	Massa [10^{-3} g]
5N	8 ± 3

Fonte: Autoria própria, 2023.

Pressão de contato: Além de analisar o desgaste ocorrido durante o ensaio foi de suma importância compreender qual foi o regime de lubrificação presente durante o teste e se aconteceu uma transição do regime elasto-hidrodinâmico para o hidrodinâmico. De acordo com Hutchings (1992), para contatos não conformes o regime de lubrificação é elasto-hidrodinâmico e este é o tipo de contato que se apresenta no início do ensaio; enquanto que para contatos conformes o regime será hidrodinâmico.

Para poder distinguir o momento em que a pressão de contato ficou menor que 50MPa, valor que representaria a mudança de regime de lubrificação passando de elasto-hidrodinâmico para hidrodinâmico foi utilizada a Equação 3, que permite estimar a pressão de contato no decorrer do ensaio. Na Tabela 10 e no Gráfico 17 são mostrados os valores de pressão de contato e tempo de ensaio onde ocorreria a mudança entre os regimes de lubrificação, constatando que a pressão de contato entre as superfícies fica menor que 50MPa em aproximadamente 8s.

Essa mudança entre os regimes de lubrificação ocorre porque o início do ensaio teve um contato não conforme entre as superfícies e durante o período de assentamento, região de running, as superfícies tentaram se encaixar umas com as outras e quando isso ocorreu foi quando aconteceu a mudança do regime lubrificação (de elasto-hidrodinâmico para hidrodinâmico).

Tabela 10 - Estimativa da Pressão de contato para ensaios lubrificados com óleo 5w40 e carga.5N.

Tempo [s]	Área de contato [mm^2]	Pressão [MPa]
0	0,006	833,32
1	0,01	500,00
2,5	0,031	166,67
5	0,06	83,32
10	0,12	41,67
20	0,23	21,74
50	0,46	10,86
75	0,93	5,37
150	1,86	2,68
300	3,72	1,34
600	7,55	0,67
1200	14,9	0,33

Fonte: Autoria própria, 2023.

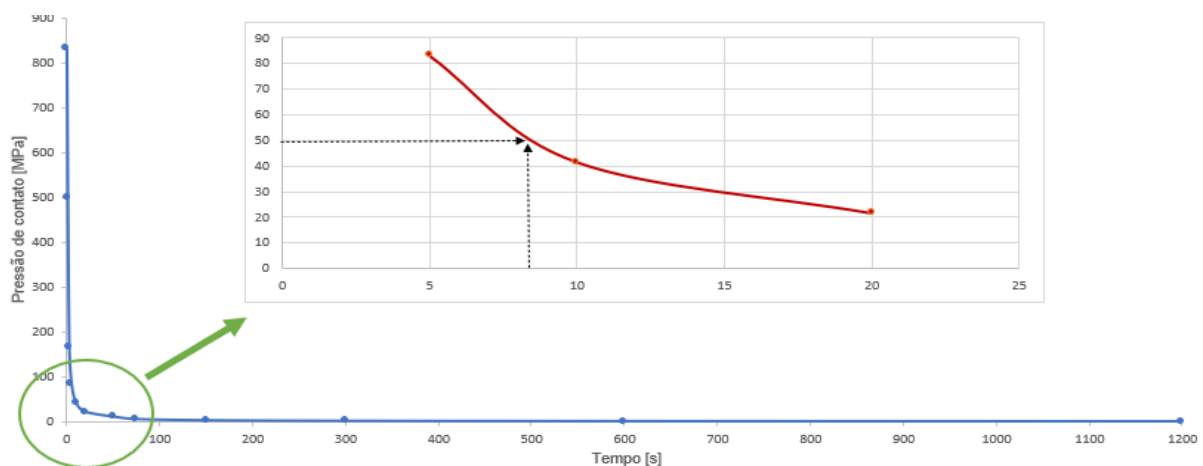


Gráfico 17 - Pressão de contato em função do ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 5N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.2 CARGA NORMAL: 10N

Força de atrito: No Gráfico 18 são apresentados os valores de força de atrito em função do tempo de ensaio, no qual foi possível notar novamente que a força de atrito cresce rapidamente e logo em seguida passa para a região de *running*, na qual aconteceu o assentamento entre as superfícies e teve uma duração de aproximadamente 100s. Depois alcança a estabilidade por volta de 1,3N.

Temperatura: A temperatura, como nos ensaios anteriores, teve um crescimento bastante acelerado indicando tanto o começo do ensaio quanto a zona de *running*, na qual a força de atrito foi mais elevada. Depois desse rápido crescimento, a temperatura continuou a aumentar só que mais lentamente e isso se deve a dissipação de calor do sistema ser menor do que sua geração provocada pelo atrito. No final do teste, a temperatura alcança um valor máximo de 38,5°C

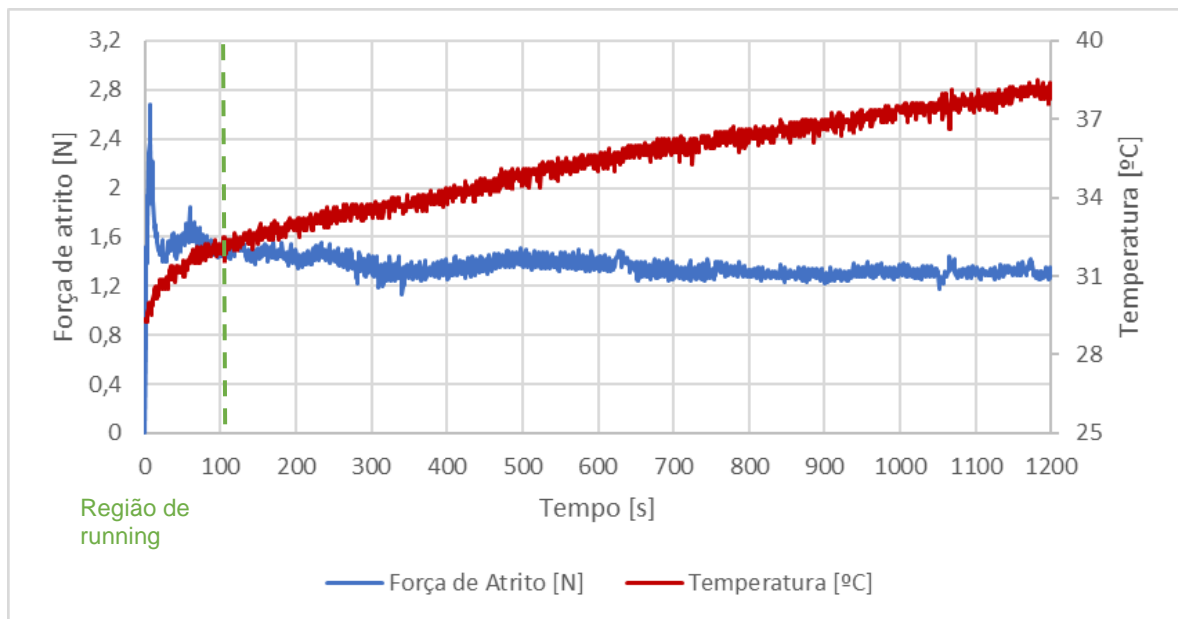


Gráfico 18 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com carga de 10N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 19 são apresentados os valores calculados do coeficiente de atrito em função do tempo, durante o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e a carga de 10N. Como já visto o coeficiente de atrito variou de acordo com a carga normal e a força de atrito, alcançando a estabilidade em valores próximos a 0,13.

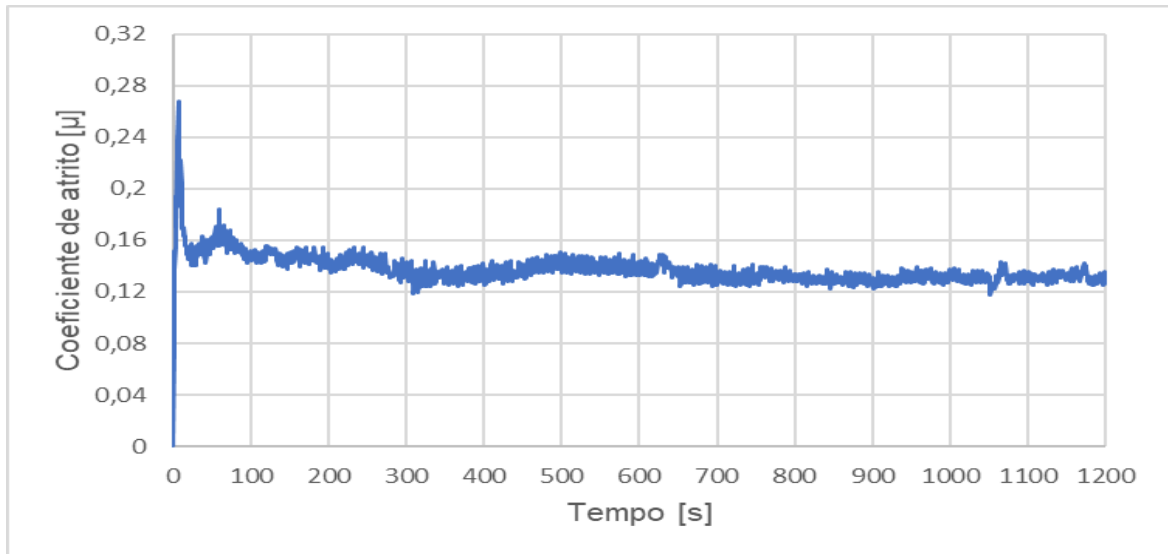


Gráfico 19 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na Figura 20 são mostrados os danos superficiais do disco e do pino após o ensaio lubrificado com óleo 5W40 e carga de 10N. Na imagem o disco, foi possível verificar sulcos com diferentes tonalidade possivelmente demonstrando diferentes profundidades e isso foi um indicativo que ocorreu desgaste por mecanismos abrasivos causado por reentrâncias mais duras, que foram criadas pela deformação plástica das superfícies, ou por de partículas duras vindas do próprio material desgastado que sofreram encruamento.

A imagem do pino evidencia marcas de deformação plástica, apresentadas pelas rebarbas nas bordas do elipsoide e foi observado também grandes sulcos que coincidem com os sulcos encontrados na superfície do disco.

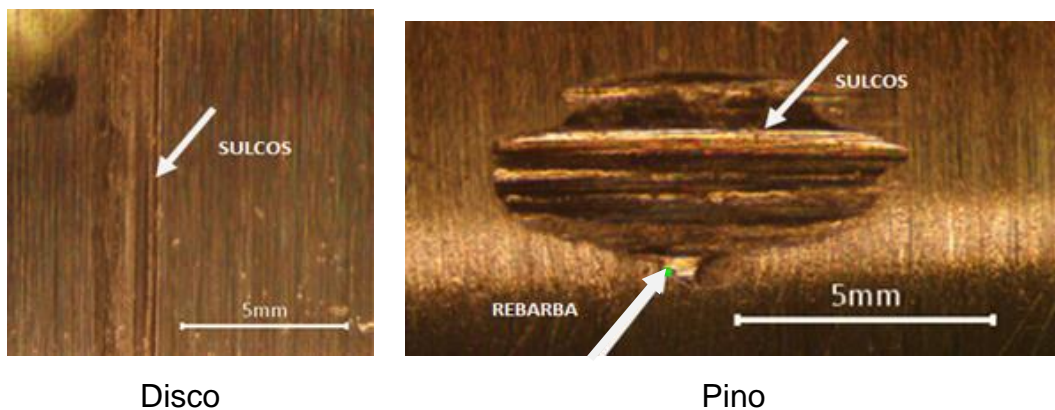


Figura 20 - Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 10N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: A perda de massa no ensaio lubrificado com Óleo 5w40 e carga de 10N foi calculada também a partir da Equação 2 e é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 – Perda de massa no ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 10N.

Ensaio lubrificado com óleo 5w40	Massa [10^{-3} g]
10N	10 ± 2

Fonte: Autoria própria, 2023.

Pressão de contato: Para encontrar o momento em que a pressão de contato fica menor que 50MPa e que o regime passa de elasto-hidrodinâmico para o hidrodinâmico, foi utilizada a Equação 3 que permite estimar a pressão de contato. Os resultados são apresentados na Tabela 12. Com a ajuda do Gráfico 20, foi possível analisar melhor o momento em que ocorreu a transição entre os regimes de lubrificação. Essa alteração de regimes aconteceu após aproximadamente 12s de ensaio, a partir da qual a área de contato formada depois do assentamento entre essas superfícies, sugere a mudança de um contato não conforme para um contato conforme.

Tabela 12 - Estimativa da Pressão de contato para ensaios lubrificados com óleo 5w40 e carga 10N.

Tempo [s]	Área de contato [mm^2]	Pressão [MPa]
0	0,009	1111,12
1	0,02	500,00
2,5	0,04	250,00
5	0,08	125,00
10	0,16	62,5
20	0,31	32,26
50	0,62	16,13
75	1,27	7,86
150	2,53	3,95
300	5,07	1,96
600	10,14	0,97
1200	20,28	0,48

Fonte: Autoria própria, 2023.

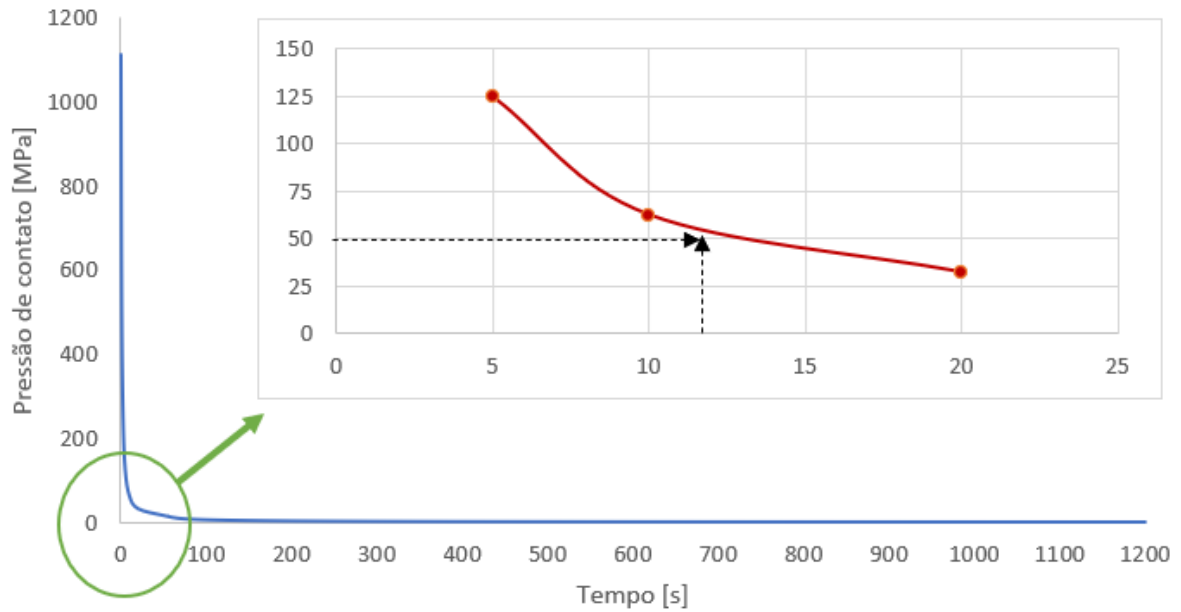


Gráfico 20 - Pressão de contato do ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 10N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.3 CARGA NORMAL: 25N

Força de atrito: No Gráfico 21 é apresentada a curva de força de atrito obtida do ensaio lubrificado com Óleo 5w40 e carga de 25N. Igual aos ensaios anteriores, nota-se um rápido crescimento e depois um período de oscilação antes de se estabilizar em valores entre 3N e 3,5N. Essa oscilação que indica a região de *running*, ocorre até os primeiros 100s de ensaio.

Temperatura: A temperatura aumenta de forma rápida acompanhando a força de atrito. Depois ela passa a aumentar lentamente devido, novamente, a dissipação de calor acontecer muito mais lento do que a geração de calor pela força de atrito.

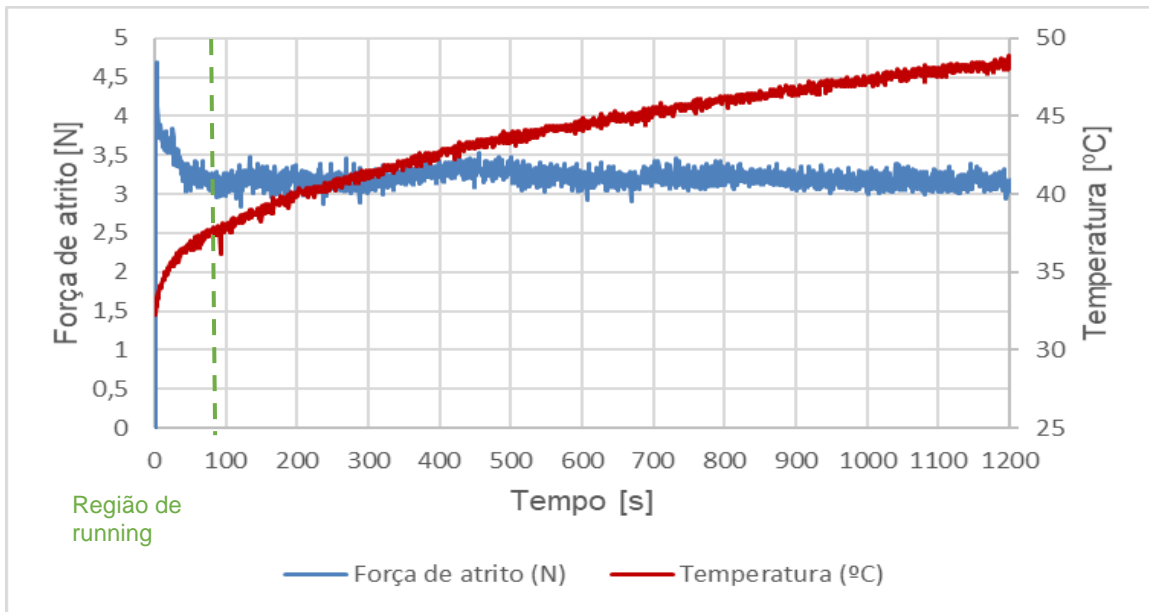


Gráfico 21 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificante 5w40 e carga de 25N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 22 é mostrado o coeficiente de atrito do ensaio lubrificado com Óleo 5w40 e carga de 25N. E como já citado anteriormente, ele variou de acordo com a força de atrito e com a carga normal.

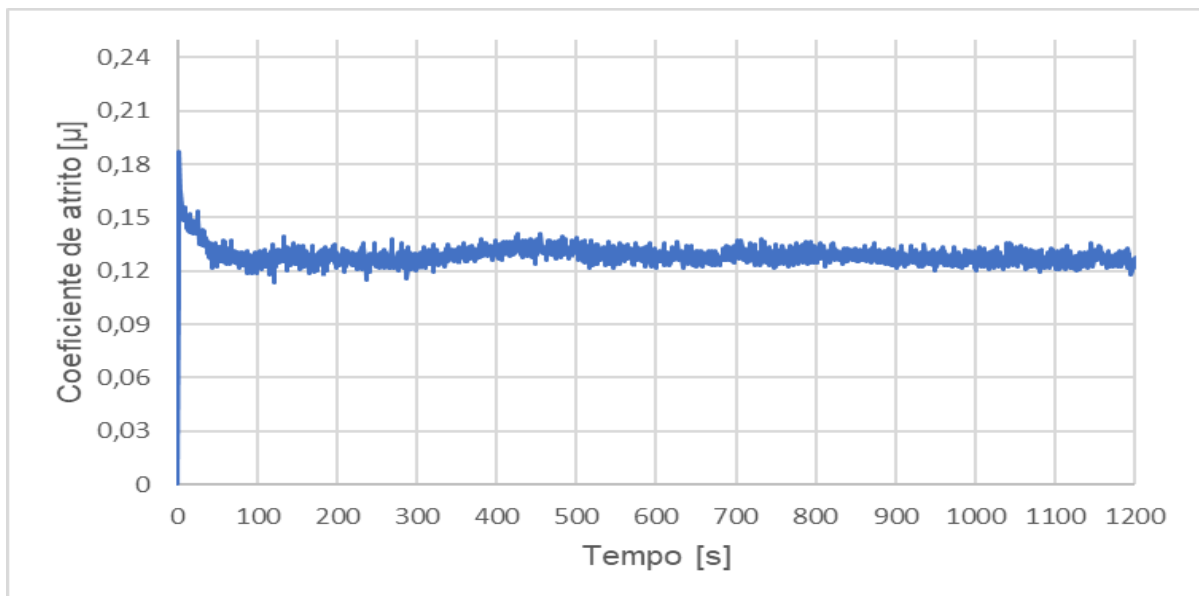


Gráfico 22 -Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 10N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: Ao analisar a Figura 21 é possível observar alguns sulcos na trilha da superfície do disco que caracterizou um desgaste por mecanismos abrasivos. Já na superfície do pino percebeu-se a presença de pequenas rebarbas frágeis, evidenciando a deformação plástica que ocorreu nessa região e sulcos mais profundos que coincidem com o que foi encontrado no disco. Esses sulcos representaram um indicativo de que materiais abrasivos entraram em contato com as superfícies.

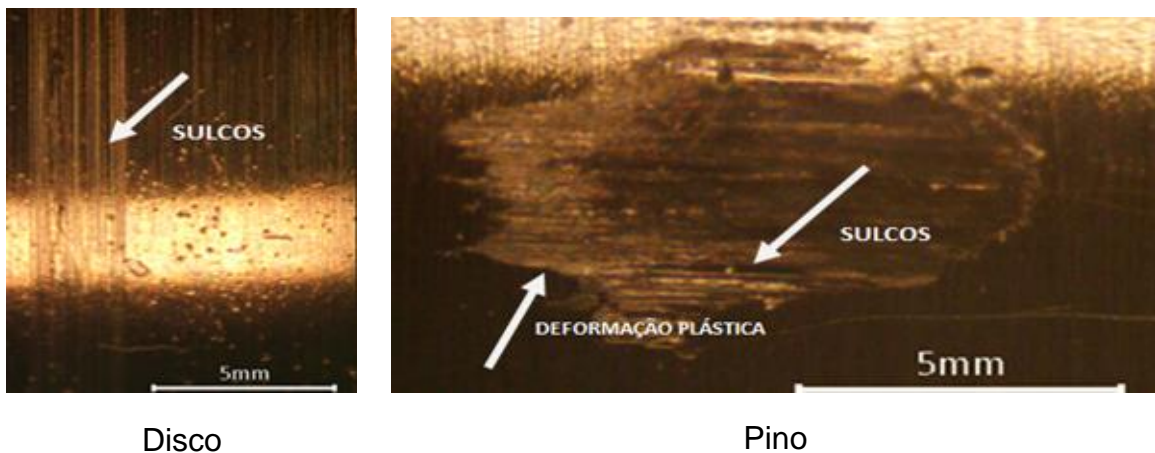


Figura 21 - Superfícies desgastadas do disco e pino após o ensaio lubrificado com óleo 5w40 e carga de 25N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: Utilizando a Equação 2, encontrou-se o volume perdido do pino e depois de relacionada com a massa perdida. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Perda de massa no ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 25N.

Ensaio lubrificado com óleo 5w40	Massa [$10^{-3}g$]
25N	12 ± 6

Fonte: Autoria própria, 2023.

Pressão de contato: Na Tabela 14 são trazidos os valores estimados da pressão de contato e da área de contato, encontrados a partir da Equação 3. Com esses valores foi possível determinar o momento em que a pressão de contato ficou menor que 50MPa e ocorreu a mudança entre os regimes de lubrificação. Com auxílio do Gráfico 23 foi apontado o momento exato em que ocorreu essa transição, acontecendo por volta dos 41s de ensaio.

Tabela 9. Tabela 14 - Estimativa da Pressão de contato para ensaios lubrificado com óleo 5w40 e carga 25N.

Tempo [s]	Área de contato [mm^2]	Pressão [MPa]
0	0,009	27777,78
1	0,02	12500,00
2,5	0,04	625,00
5	0,07	357,13
10	0,15	166,67
20	0,31	80,64
50	0,62	40,31
75	1,21	20,65
150	2,45	10,19
300	4,89	5,11
600	9,79	2,52
1200	19,58	1,28

Fonte: Autoria própria, 2023.

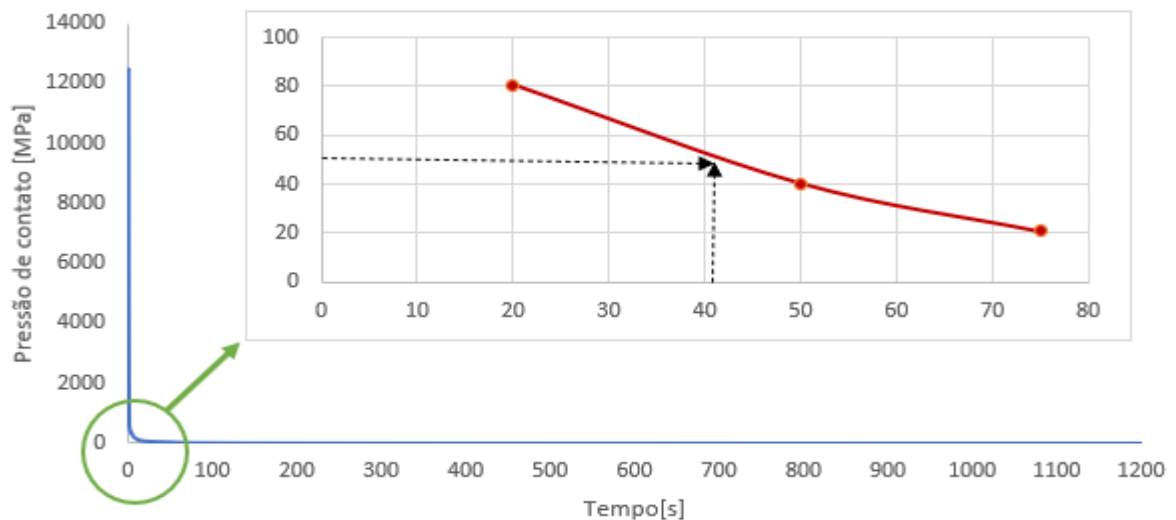


Gráfico 23 - Pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com óleo 5w40 com a carga de 25N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS LUBRIFICADOS COM ÓLEO 5W40

Força de atrito: No Gráfico 24 é apresentado um comparativo das forças de atrito obtidas com os ensaios lubrificados com Óleo 5w40 e as cargas de 5N, 10N e 25N. Analisando o referido Gráfico nota-se que a força de atrito aumenta de acordo com o aumento da carga normal e que este aumento é quase proporcional à carga normal aplicada, com valores de 0,5N, 1,5N e 3N, respectivamente. No Gráfico verifica-se também, que a região de *running* nos três ensaios é muito semelhante em duração, por volta de 100 s. Durante o período de *running*, também pode ser observado um pico bastante elevado da força de atrito, isso talvez tenha acontecido devido a área de contato ser aproximadamente zero e com isso a pressão de contato nessa área é muito alta.

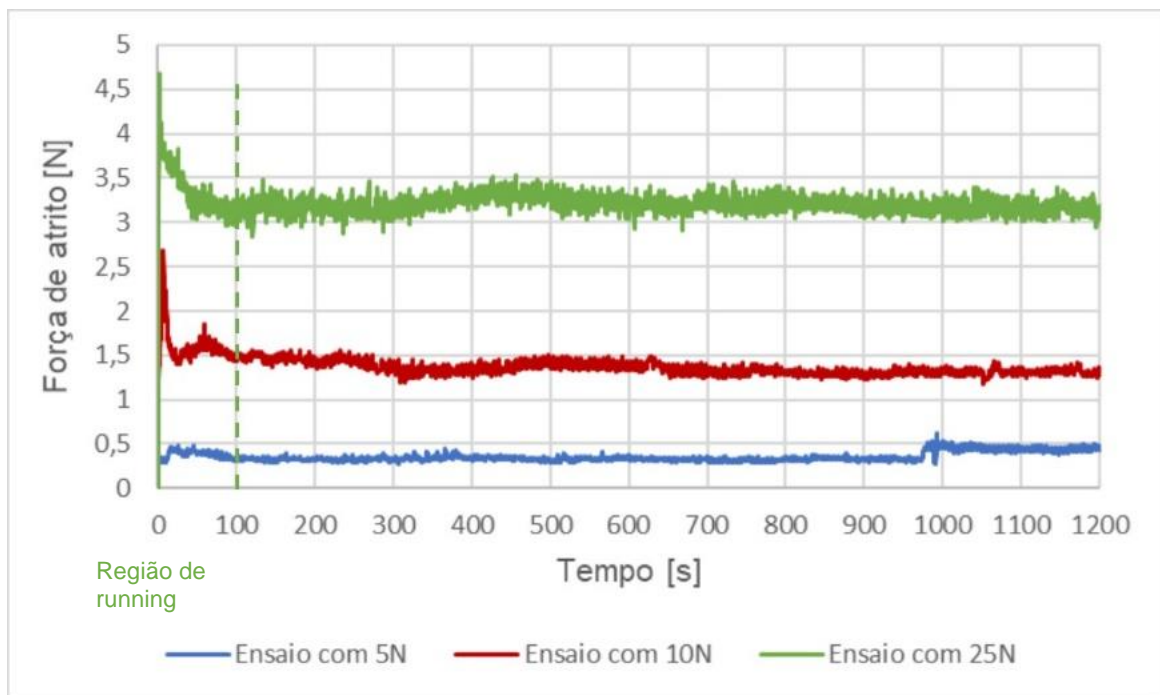


Gráfico 24 - Comparativo da força de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaios lubrificados com óleo 5w40.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Temperatura: No Gráfico 25 é mostrado o comparativo da temperatura entre as cargas de 5N, 10N e 25N. O aumento da temperatura variou de acordo com carga normal utilizada em cada ensaio e em todos ela aumentou rapidamente na região de assentamento entre as superfícies e depois começou a crescer mais lentamente e constante na região de estabilidade da força de atrito. O aumento gradual da temperatura, depois da região de *running*, aconteceu devido a que a

geração de calor provocada pela força de atrito é maior que a capacidade de dissipação de calor do sistema, fazendo com que esse calor fosse retido no aço.

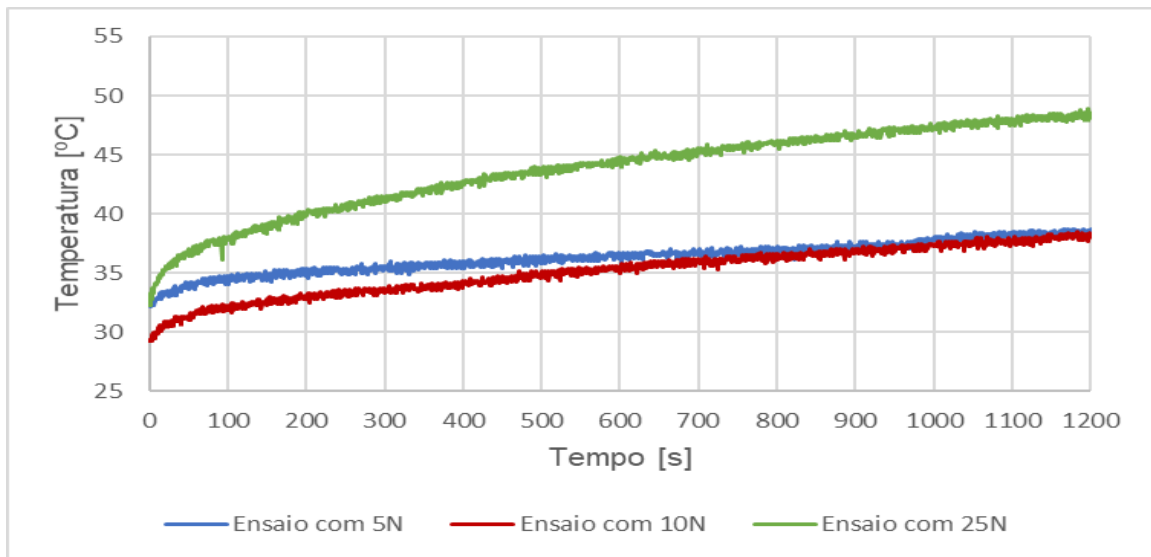


Gráfico 25 - Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaios lubrificadas com óleo 5w40.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: Observou-se, no Gráfico 26, que o coeficiente de atrito ficou igual nos ensaios com cargas de 10N e 25N e com metade do valor com a carga de 5N.

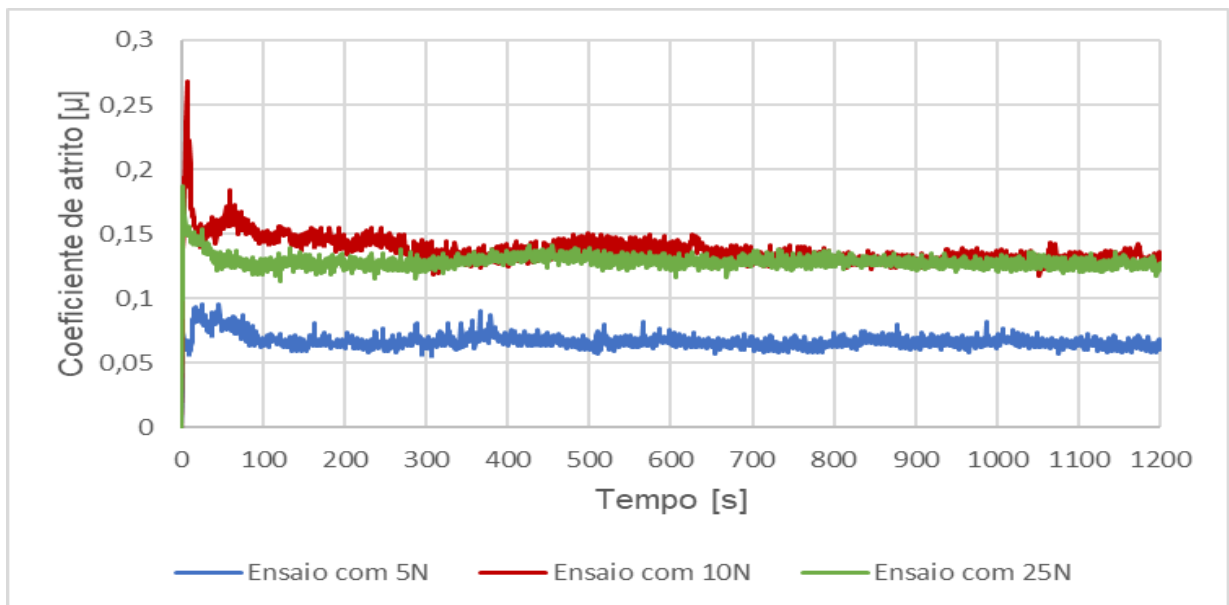
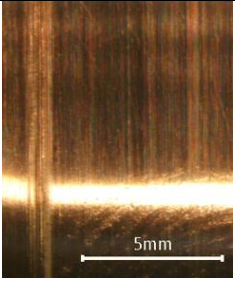
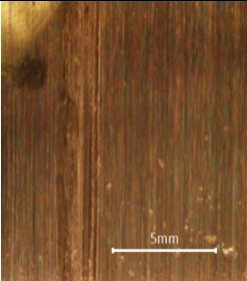
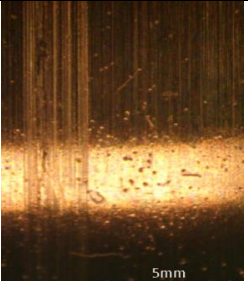
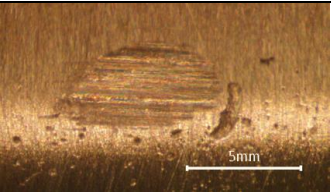
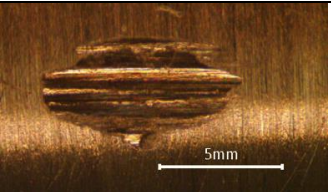
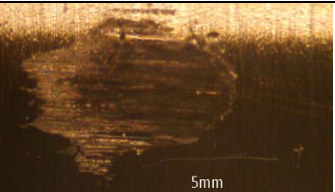


Gráfico 26 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaios lubrificadas com óleo 5w40.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: A Tabela 15 apresentada expõe a análise da superfície dos discos e pinos após o ensaio lubrificado com óleo 5w40. As características as superfícies foram semelhantes em todos os ensaios, com presença de sulcos causados por mecanismos abrasivos e de rebarbas oriundas da deformação plástica. O que difere entre as superfícies foi que a utilização cada vez maior de força normal acabou aumentando também a região danificada. Foram encontradas trilhas cada vez maiores nos discos e nos pinos elipsoides maiores, salientando assim que o desgaste vai piorando com o aumento da carga normal.

Tabela 15 - Comparação das superfícies desgastadas nos ensaios lubrificados com óleo 5w40.

Superfície / Carga	5N	10N	25N
Disco			
Pino			

Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: O comparativo da massa perdida entre os ensaios lubrificado com Óleo 5w40, são encontrados na Tabela 16 e no Gráfico 27. Foi notório que a perda de massa foi gradual à medida que foi aumentando a força normal, podendo afirmar-se, assim, que o ensaio foi se tornando cada vez mais severo.

Tabela 16 – Perda de massa nos ensaios lubrificado com óleo 5w40.

Ensaio lubrificado com óleo 5w40	Massa [$10^{-3}g$]
5N	8 ± 3
10N	10 ± 2
25N	12 ± 6

Fonte: Autoria própria, 2023.

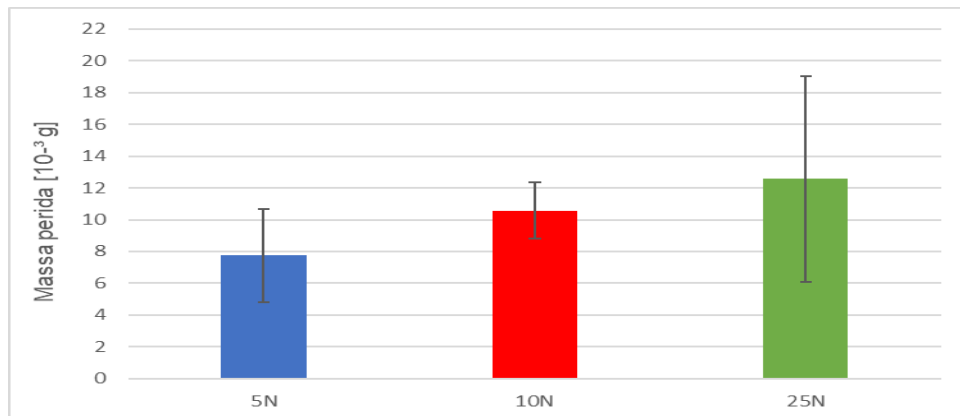


Gráfico 27 - Comparativo da perda de massa de ensaios lubrificadas com óleo 5w40.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Pressão de contato: Analisando a pressão de contato no ensaio lubrificado com Óleo 5w40, apresentado no Gráfico 28, notou-se que a força normal influenciou no momento em que ocorreu a mudança do regime elasto-hidrodinâmico para o hidrodinâmico. Quanto maior for a carga utilizada mais demorada será essa transição.

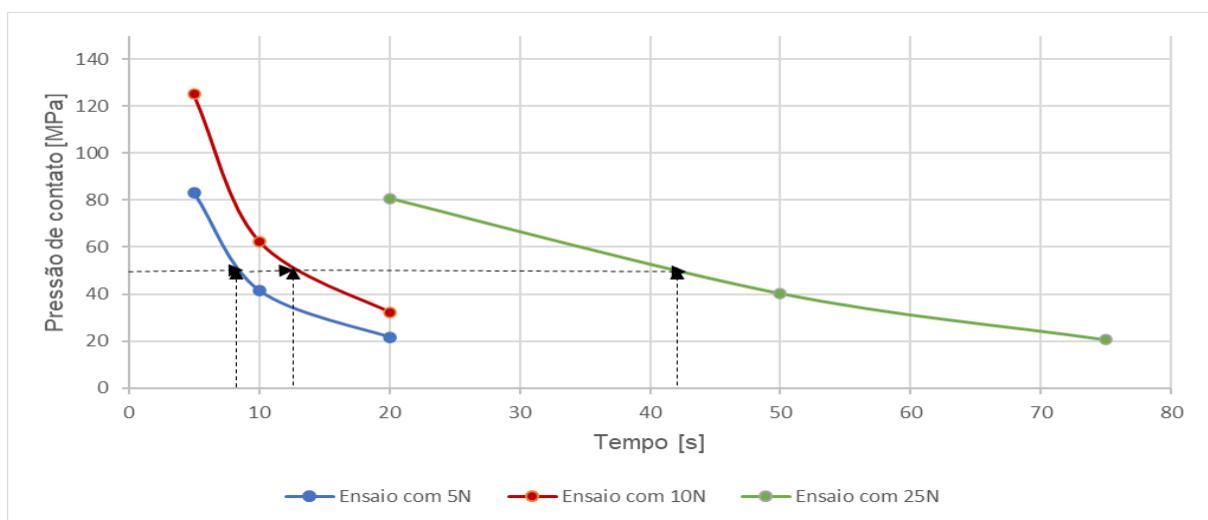


Gráfico 28 - Comparativo da pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaios lubrificadas com óleo 5w40.
Fonte: Autoria própria, 2023.

4.3 ENSAIOS LUBRIFICADOS COM MILITEC

4.3.1 CARGA NORMAL: 5N

Força de atrito: No Gráfico 29 observa-se a curva de força de atrito obtida do ensaio com a carga de 5N e adição do condicionador de metais Militec. A curva tem um comportamento instável, mas com uma tendência a se estabilizar em valores próximos de 0,5N.

No gráfico não é possível determinar com certeza a região de running, dá a impressão que a acomodação entre as superfícies ocorre ao longo de todo o ensaio. De qualquer forma, nota-se que a curva tende a se estabilizar a partir dos 200s de ensaio. Essa instabilidade pode ser explicada pela presença do Militec, que ao interagir com o aço cria um filme adsorvido nas superfícies que as protege da ação do atrito e do desgaste, mesmo considerando que o contato é do tipo não conforme.

Temperatura: No Gráfico 29, percebe-se que a curva da temperatura aumentou de forma quase constantemente ao longo do ensaio. Entretanto, nota-se também, que ela muda de inclinação a partir dos 200s, corroborando assim, a finalização da região de running. A utilização do Militec fez com que os valores da força de atrito se mantivessem estáveis numa faixa de valores e, conseqüentemente, a temperatura seguiu aumentando devido a que geração de calor pelo atrito foi maior que a de dissipação.

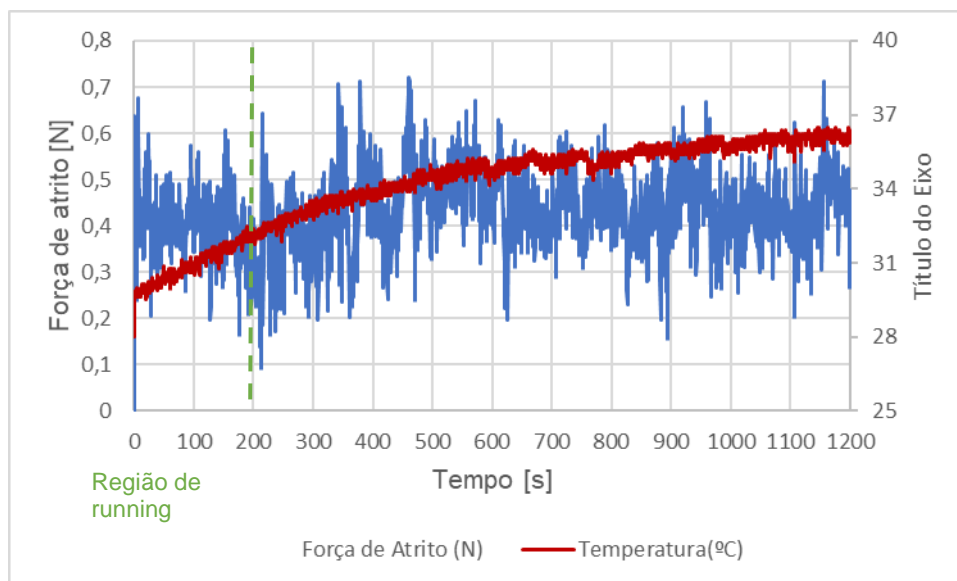


Gráfico 29 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com carga de 5N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 30 é apresentado a curva do coeficiente de atrito obtido do ensaio lubrificado com Militec e carga normal de 5N.

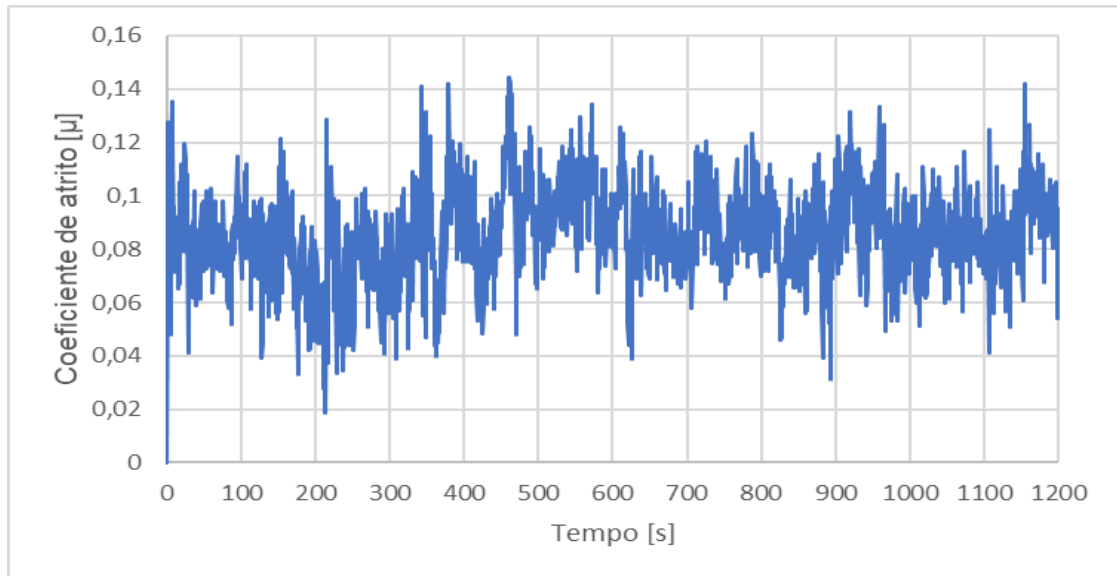


Gráfico 30 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec a carga de 5N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na Figura 22 são apresentadas as superfícies desgastadas do pino e do disco, após o ensaio lubrificado com o Militec. Notou-se no disco a presença de sulcos profundos, que são de caráter abrasivo. Na superfície do pino foi observado também a presença de sulcos profundos na zona central e, nas bordas, é nota-se material em alto relevo, isso foi devido à deformação plástica ocorrida.



Disco

Pino

Figura 22 – Superfícies desgastadas do disco e pino após ensaio lubrificado com óleo 5w40 + Militec com 5N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: Na Tabela 17 é mostrado o valor da perda de massa causado pelo desgaste do Aço SAE 1045 lubrificado com Militec e carga de 5N.

Tabela 17 – Perda de massa do ensaio lubrificado com Militec.

Ensaio lubrificado com 5w40 + Militec	Massa [10^{-3} g]
5N	$3 \pm 0,2$

Fonte: Autoria própria, 2023.

Pressão de contato: Com a utilização da Equação 3, foram estimados os valores de pressão de contato durante o ensaio com Militec e mostrados na Tabela 18. No Gráfico 31 apresentado, contém a curva da pressão de contato em função do tempo e pode ser visto que a transição de regime elasto-hidrodinâmico para hidrodinâmico ocorreu perto de 3,5s, quando a pressão de contato alcança os 50Mpa.

Tabela 18 - Estimativa da Pressão de contato para ensaios lubrificadas com Militec e carga 5N.

Tempo [s]	Área de contato [mm^2]	Pressão [MPa]
0	0,006	268,65
1	0,07	134,32
2,5	0,15	67,16
5	0,29	33,57
10	0,59	16,79
20	1,19	8,39
50	2,38	4,2
75	4,76	2,09
150	1,86	1,05
300	9,53	0,52
600	19,06	0,26
1200	38,12	0,13

Fonte: Autoria própria, 2023.

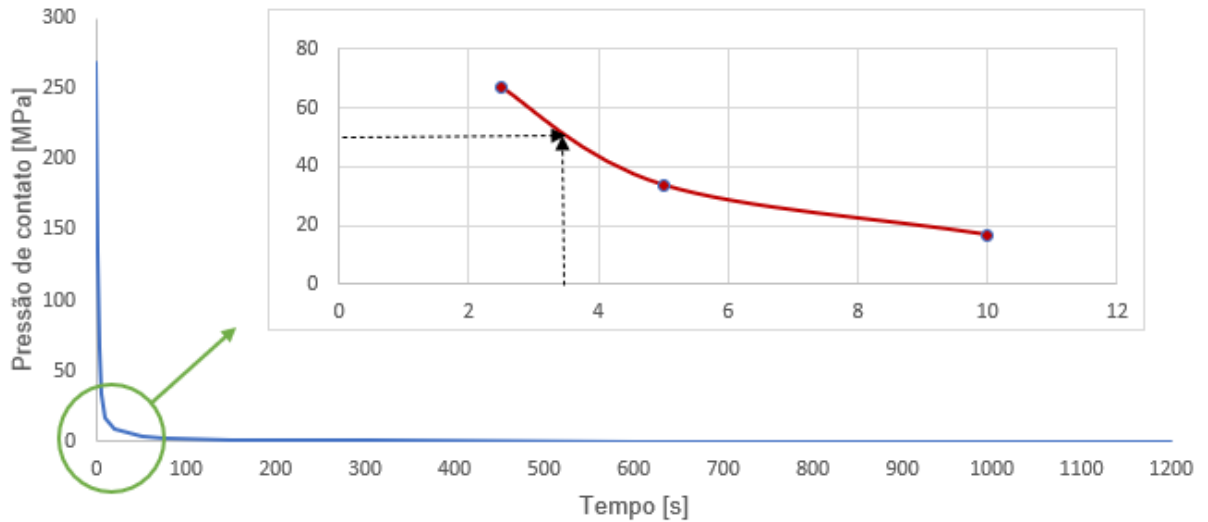


Gráfico 31 - Pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com a carga de 5N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.3.2 CARGA NORMAL: 10N

Força de atrito: Os dados encontrados entre a força de atrito e a temperatura no sistema lubrificado com Militec são mostrados no Gráfico 32. Observa-se que a região de running tem uma duração de aproximada de 100s. A partir daí a força de atrito se manteve constante e estável em praticamente todo o ensaio com uma média de 0,5N.

Temperatura: A temperatura, apresentada no Gráfico 32, teve um aumento inicial rápido, devido ao aumento da força de atrito e depois do running, ela se atenua e continua a aumentar mais lentamente até o final do ensaio.

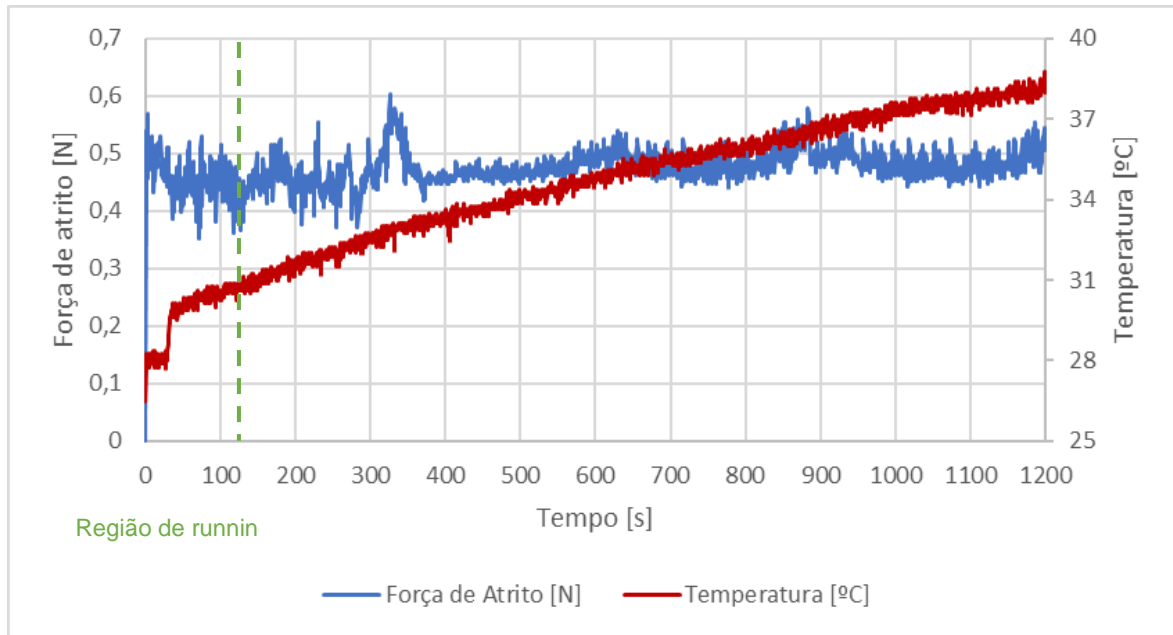


Gráfico 32 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com carga de 10N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: O coeficiente de atrito apresentado no Gráfico 33, segue a mesma tendência do gráfico de força de atrito.

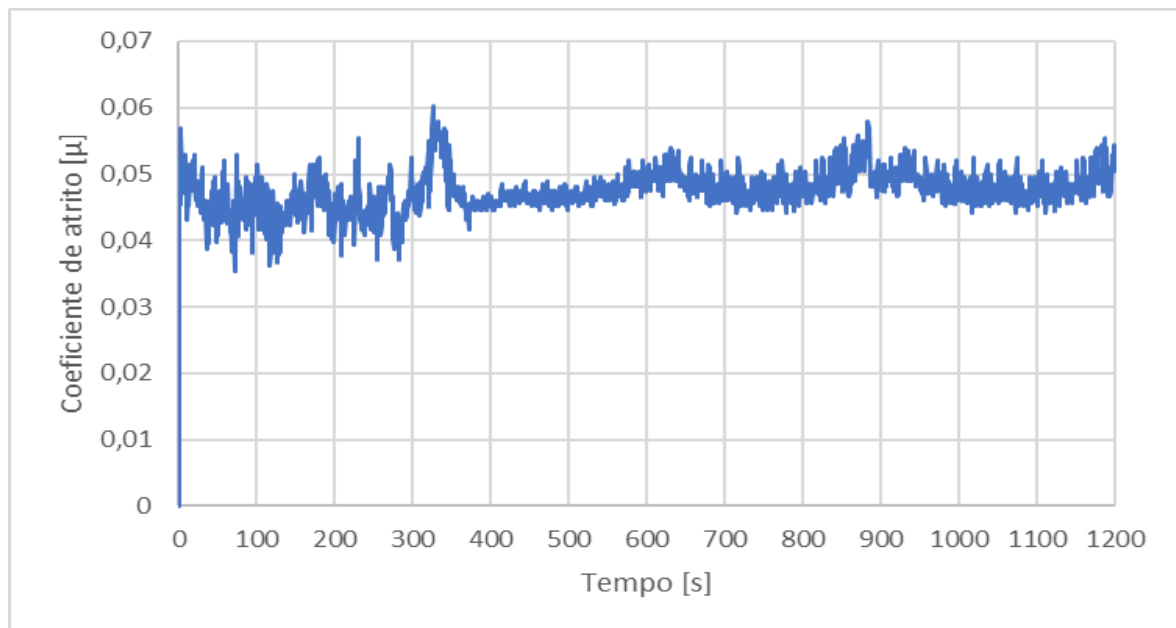


Gráfico 33 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec a carga de 10N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: A Figura 23, a seguir apresentada, foi observado a direita o disco e na esquerda o pino, após o ensaio lubrificado com o condicionador de metais Militec-1 a uma carga de 10N. Foi possível verificar uma superfície parecida com o “ensaio de 5N”, no qual se teve marcas abrasivas que são provenientes do material desgastado durante o ensaio. No na superfície do pino, pode-se observar também a presença de sulcos mais acentuados no centro do elipsoide, evidenciando novamente que ocorreu um desgaste abrasivo, principalente na saída do contato com o disco, além de evidenciar rebarbas oriundas da deformação plástica.

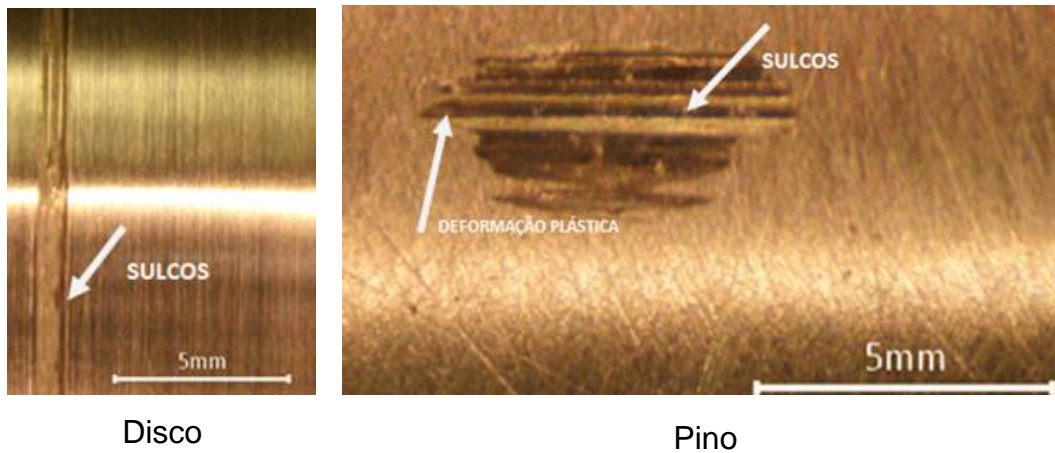


Figura 23 – Superfície desgastada disco e pino após ensaio lubrificado com Militec com 10N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Perda de massa: A perda de massa, calculada a partir da Equação 3 é mostrada na Tabela 19.

Tabela 19 – Perda de massa do ensaio lubrificado com Militec.

Ensaio lubrificado com Militec	Massa [10^{-3} g]
10N	4 ± 3

Fonte: Autoria própria, 2023.

Pressão de contato: A estimativa da pressão de contato foi calculada para encontrar o momento em que ela fica menor que 50MPa e ocorreria a mudança de regime de lubrificação, de elasto-hidrodinâmico para hidrodinâmico. Os resultados são apresentados na Tabela 20 e demonstrados no graficamente no Gráfico 34.

Tabela 20 - Estimativa da Pressão de contato para ensaio lubrificado com Militec e carga 10N.

Tempo [s]	Área de contato [mm^2]	Pressão [MPa]
0	0,04	555,96
1	0,09	276,48
2,5	0,18	138,24
5	0,36	69,12
10	0,72	34,56
20	1,44	17,28
50	2,88	8,64
75	5,77	4,32
150	11,53	2,13
300	23,06	1,08
600	46,13	0,54
1200	92,27	0,27

Fonte: Autoria própria, 2023.

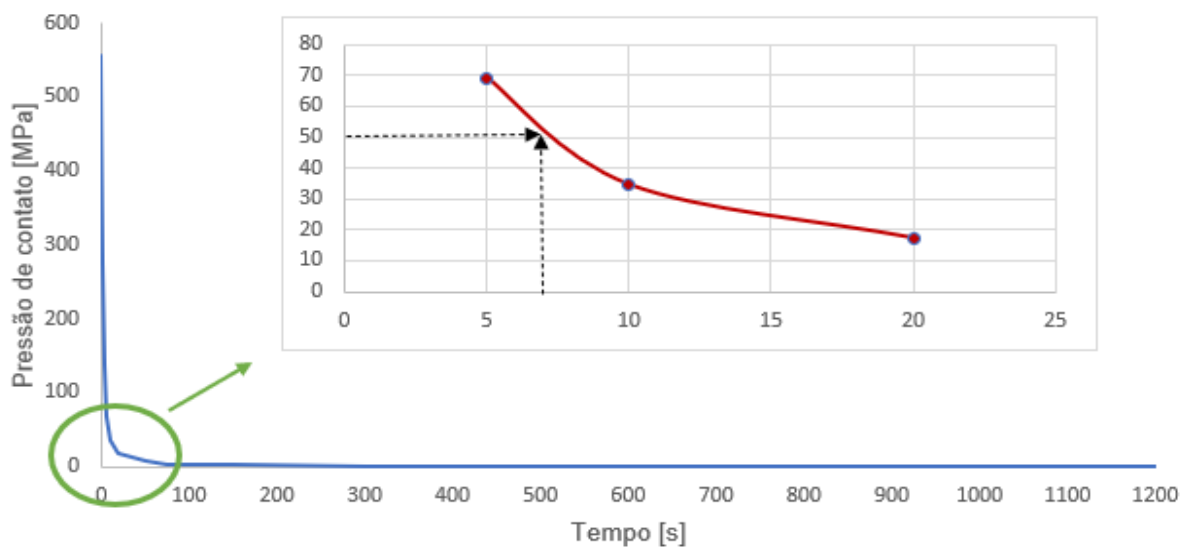


Gráfico 34 - Pressão de contato em função do tempo do ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com a carga de 10N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.3.3 CARGA NORMAL: 25N

Força de atrito: No Gráfico 35 são apresentados os valores de força de atrito obtidos no ensaio com Militec e carga de 25N. Observa-se que a força de atrito cresceu rapidamente no início do ensaio e depois passou por período de oscilações que indicaram a região de running. Nela ocorreu o assentamento entre as superfícies do aço. Analisando o gráfico, nota-se que o running ocorreu até aproximadamente os 300 s de ensaio. A partir daí, a força de atrito se apresentou praticamente constante com um valor médio de 0,7N.

Temperatura: A temperatura, como no “ensaio de 5N”, foi crescendo de forma gradual e não apresentou, inicialmente, um crescimento acelerado, isso se deveu a presença do Militec que forma um filme na superfície do aço evitando o atrito e o desgaste, de modo que a temperatura seja controlada também.

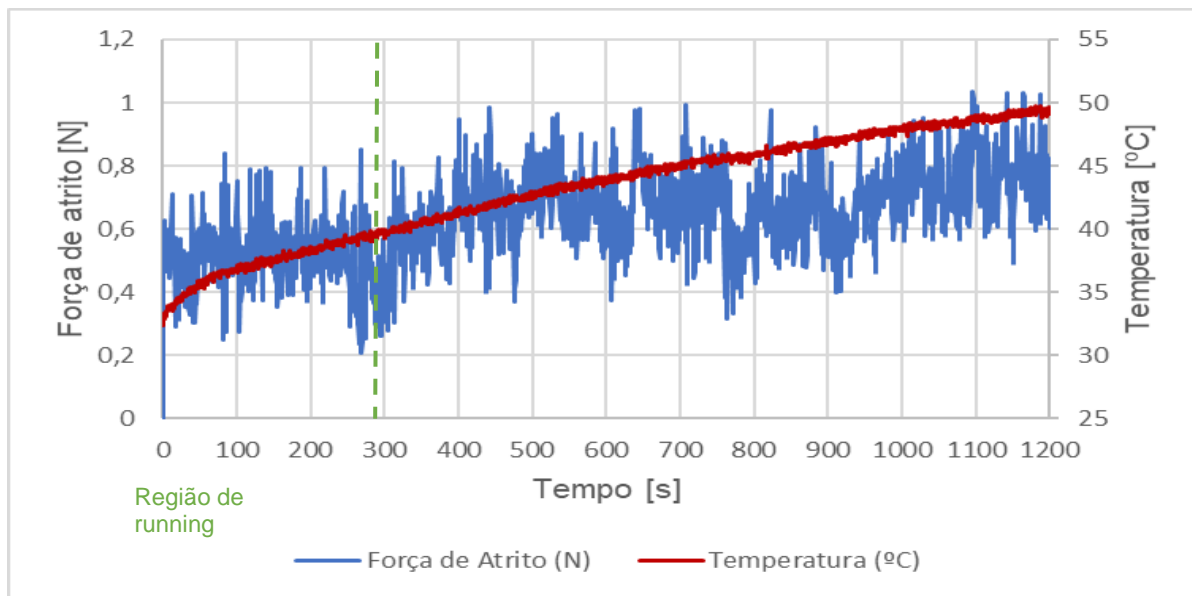


Gráfico 35 - Variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com carga de 25N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: Os valores encontrados na curva de coeficiente de atrito em função do tempo, Gráfico 36, foram calculados a partir dos resultados de força de atrito e a carga de 25N.

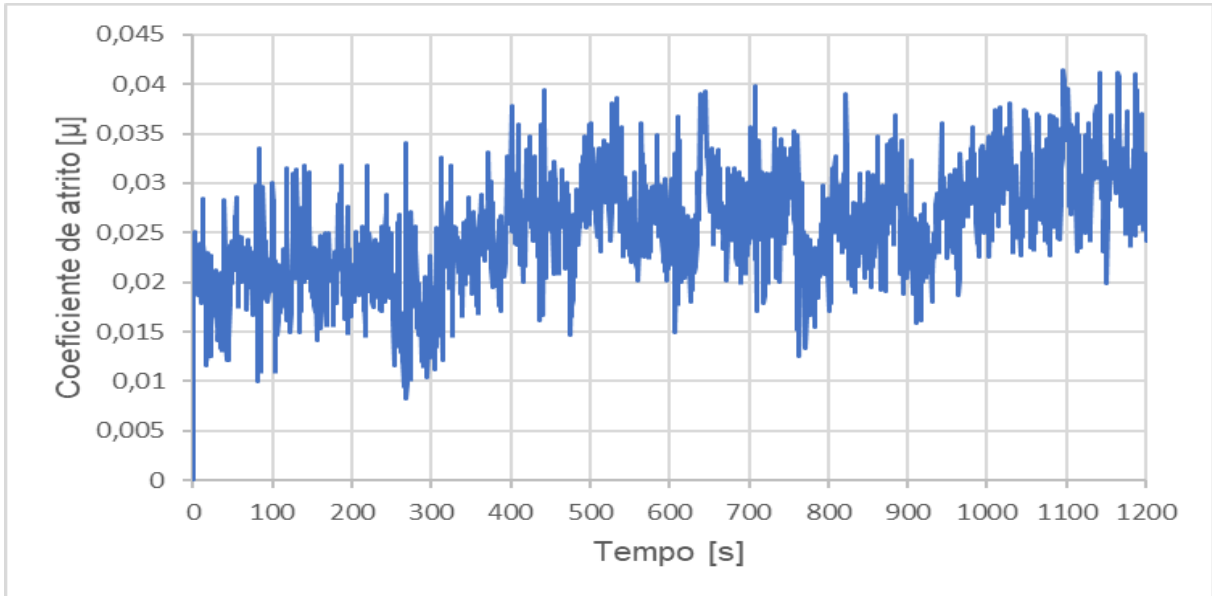


Gráfico 36 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec a carga de 25N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: As superfícies desgastadas mostradas na Figura 24 indicam no disco a presença sulcos resultantes de partículas abrasivas e na superfície do pino, notou-se se uma superfície com muitos sulcos e apresentando diversas colorações, indicando diferentes profundidades das trilhas. Na região de saída entre o disco e pino percebeu-se sinais de rebarbas, causadas por deformações plásticas.

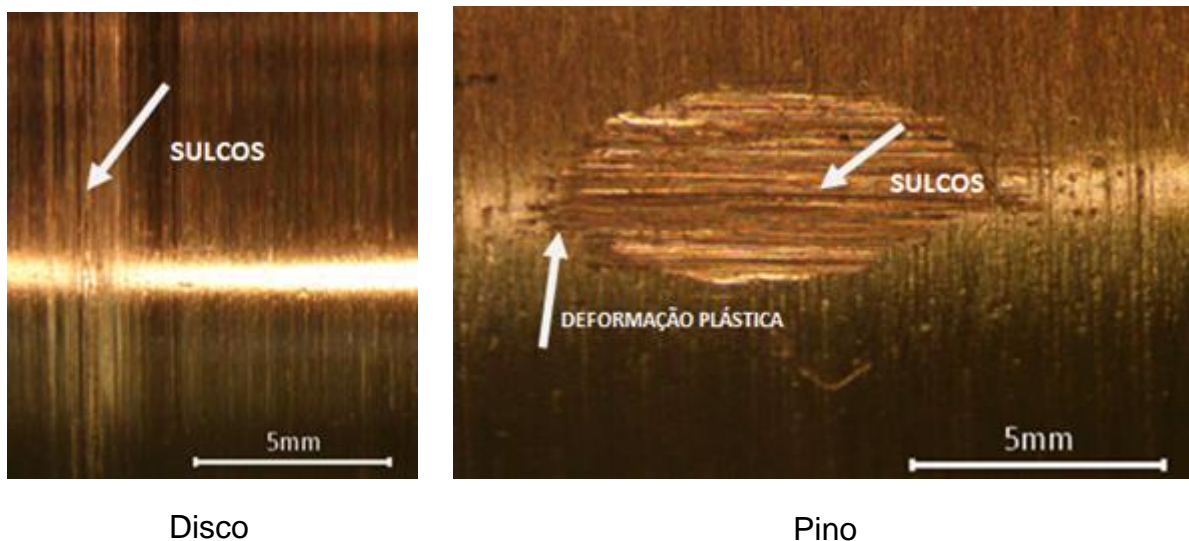


Figura 24 – Superfície desgastada do disco e pino após o ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com 25N.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste A massa perdida foi calculada a partir da Equação 2 e é mostrada na Tabela 21.

Tabela 21 – Perda de massa do ensaio lubrificado com Militec e carga de 25N.

Ensaio lubrificado com 5w40 + Militec	Massa [10^{-3} g]
25N	9 ± 4

Fonte: Autoria própria, 2023.

Pressão de contato: Com a Equação 3, foi calculada pressão de contato, visto na Tabela 22, para encontrar o momento que ocorreu a transição para o regime hidrodinâmico. No Gráfico 48, a seguir apresentado, observou-se que o regime de lubrificação mudou de elasto-hidrodinâmico para o hidrodinâmico em 7s de ensaio.

Tabela 22 - Estimativa da Pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec e carga 10N.

Tempo [s]	Área de contato [mm^2]	Pressão [MPa]
0	0,01	633,07
1	0,03	316,53
2,5	0,06	158,27
5	0,12	79,12
10	0,25	39,57
20	0,5	19,77
50	1,01	9,88
75	2,02	4,94
150	4,04	2,46
300	8,08	1,24
600	16,17	0,62
1200	32,35	0,3

Fonte: Autoria própria, 2023.

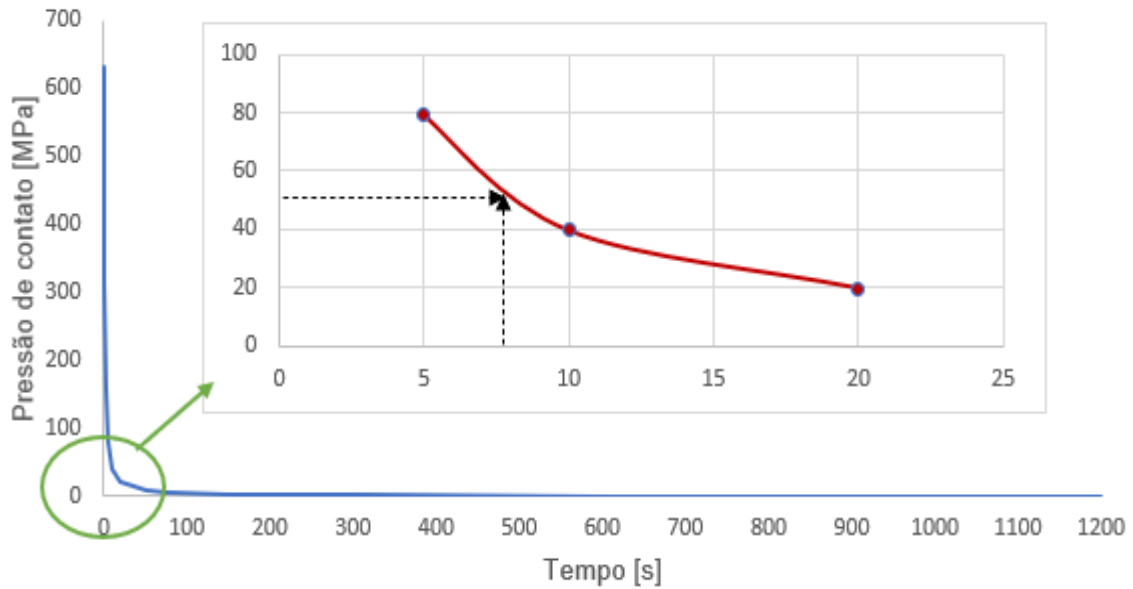


Gráfico 37 - Pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado com Militec com a carga de 25N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

4.3.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS LUBRIFICADOS COM MILITEC

Força de atrito: No Gráfico 38 é apresentado o comparativo da força de atrito entre os ensaios lubrificadas com Óleo 5w40 mais o condicionador de metais Militec-1. Nota-se que com cargas de 5N e 25N, as curvas não atingem uma estabilidade homogênea ao longo do ensaio. Sendo que os ensaios com 25N foram os mais oscilantes. No gráfico também é possível observar que a força de atrito obtidas com 5N e 10N é praticamente mesmo, próximo de 0,5 N. A região de *running* de cada ensaio ocorreu em tempos bem diferentes para cada valor de carga utilizado.

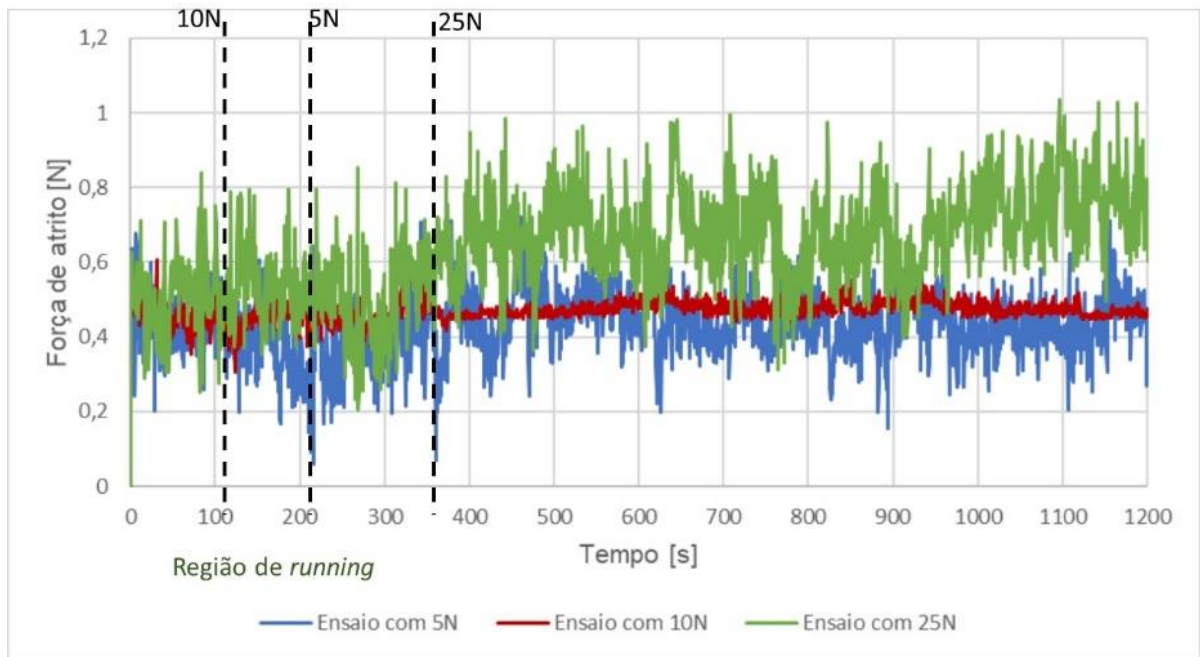


Gráfico 38 - Comparativo da força de atrito em função do tempo de ensaios lubrificadas com Militec. Fonte: Autoria própria, 2023.

Temperatura: A temperatura nos ensaios lubrificadas com Militec, Gráfico 39, segue a tendência observada na força de atrito, com valores iguais para as cargas de 5N e 10N e maiores para a de 25N. O contínuo aumento da temperatura após a estabilização da força de atrito pode ser explicado pela lenta dissipação de calor do sistema comparado com a rapidez com que o calor é gerado pelo atrito.

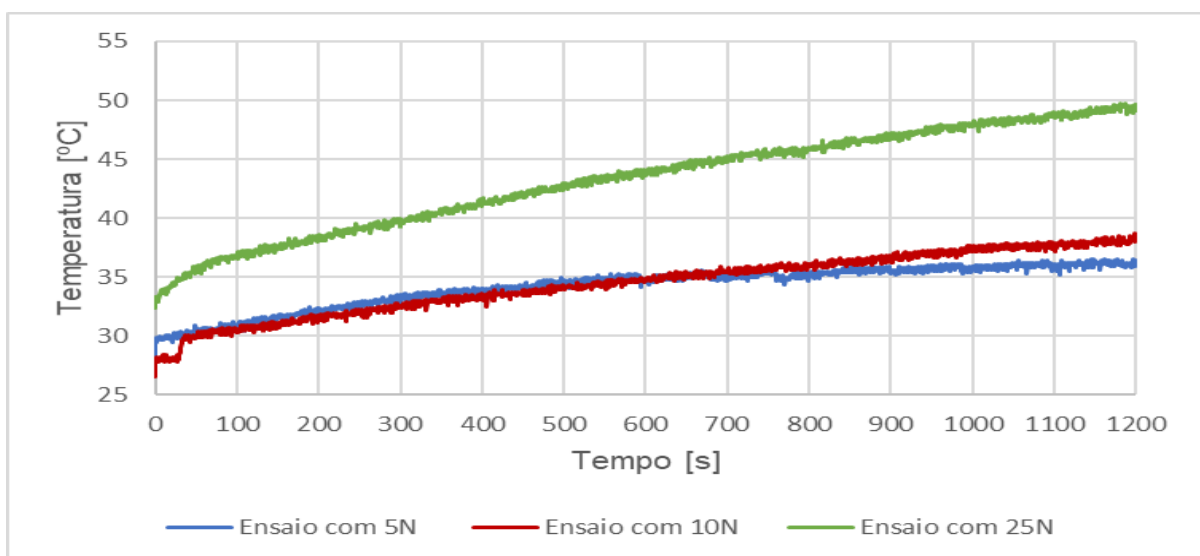


Gráfico 39 - Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaios. Ensaios lubrificadas com Militec. Fonte: Autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: No Gráfico 40, observa-se que o uso do Militec favoreceu a redução do coeficiente de atrito quando há um aumento da carga normal de ensaio.

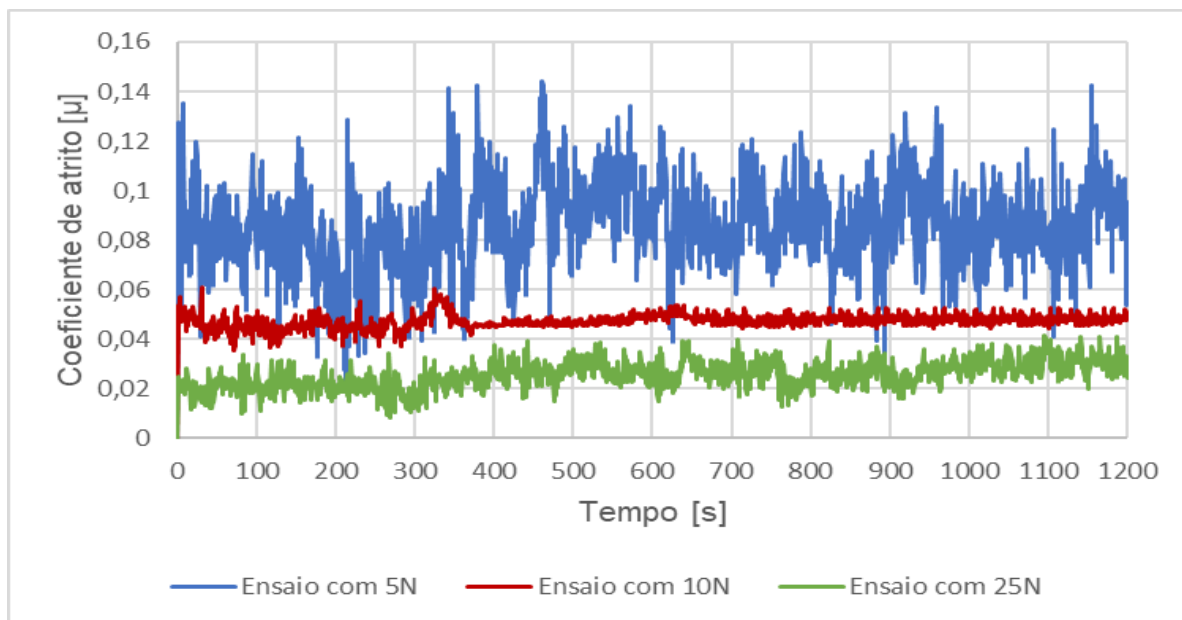
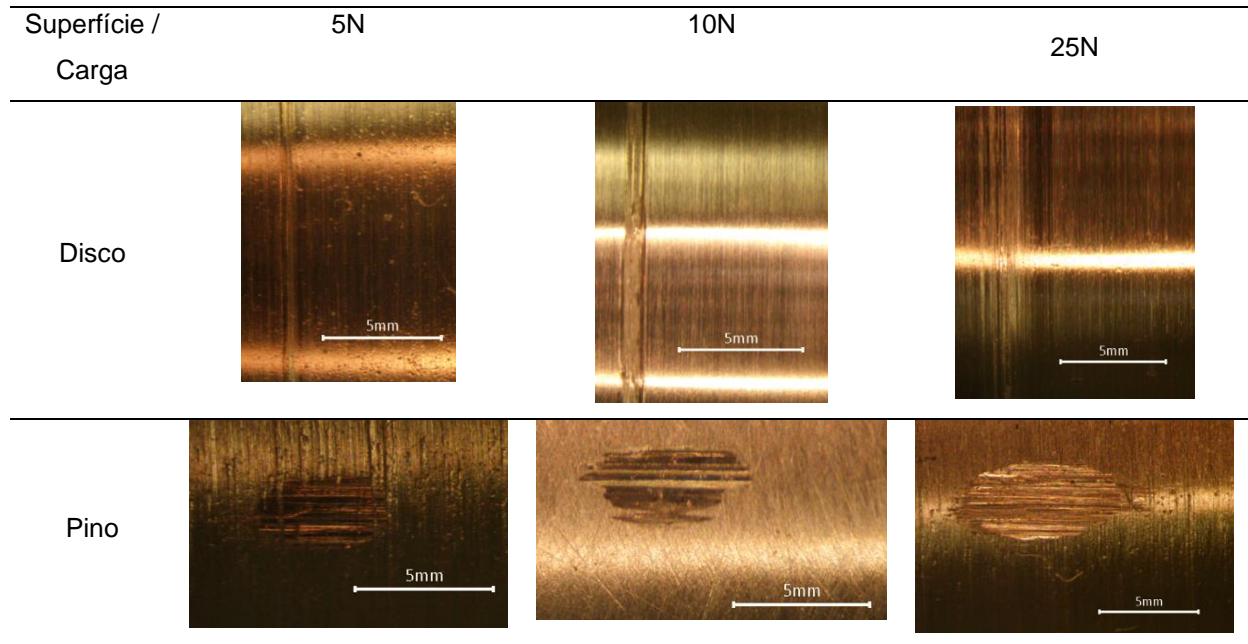


Gráfico 40 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaios lubrificadas com Militec.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na Tabela 23 são mostradas as superfícies desgastadas dos discos e dos pinos ensaiados com Militec. Em geral, é possível notar as mesmas características em todas as superfícies, como a presença de sulcos causados por partículas abrasivas tanto no disco como no pino. Nas bordas das elipses dos pinos foram notados também rebarbas, devido às deformações plásticas. O que difere de ensaio para ensaio é que com o aumento da carga, houve um aumentando do tamanho das trilhas nos discos e um aumento da elipse nos pinos, ou que sugere uma maior perda de massa associada.

Tabela 23 - Comparação das superfícies desgastadas no ensaio lubrificado com Militec.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: Na Tabela 24 são indicados os valores da perda de massa entre os ensaios com Militec. Como pressuposto nas análises superficiais, à medida que se eleva a carga normal, ocorre também, um aumento do desgaste. Esta afirmação pode ser melhor observada Gráfico 41.

Tabela 24 – Perda de massa nos ensaios lubrificadas com Militec.

Ensaio lubrificado com 5w40 + Militec	Massa [10^{-3} g]
5N	$3 \pm 0,2$
10N	4 ± 3
25N	9 ± 4

Fonte: Autoria própria, 2023.

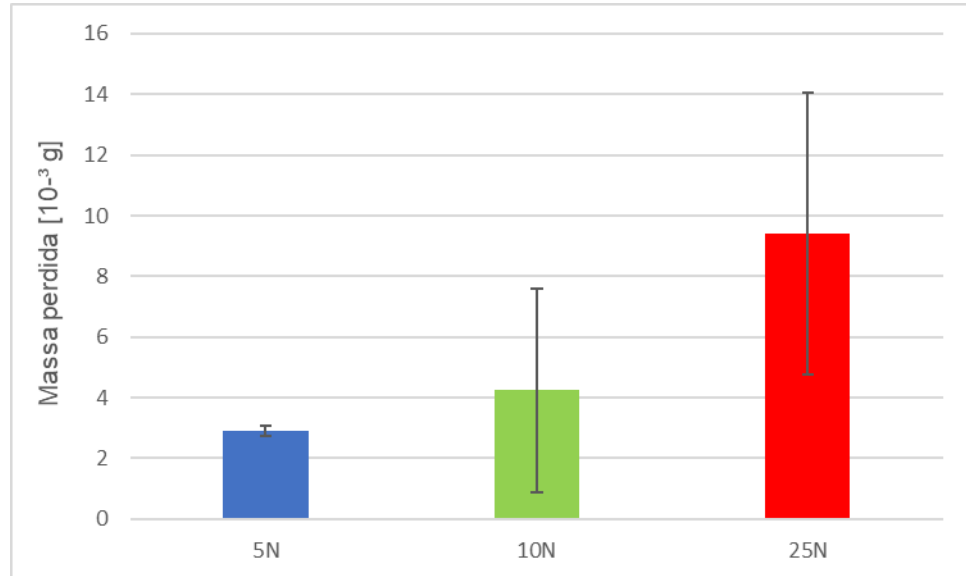


Gráfico 41 - Comparativo da perda de massa de ensaios lubrificadas com Militec.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Pressão de contato: A análise da pressão de contato foi importante para identificar em qual regime de lubrificação aconteceram os ensaios e quando pode ter ocorrido a transição entre o regime elasto-hidrodinâmico e o hidrodinâmico. Essa mudança se fez presente quando a pressão de contato ficou menor que 50MPa. Examinando o Gráfico 42, nota-se que o incremento da carga normal promove um aumento no tempo necessário para que a transição de regime de lubrificação ocorra; passando de 5s, para 7s e 8s com as cargas de 5N, 10N e 25N, respectivamente.

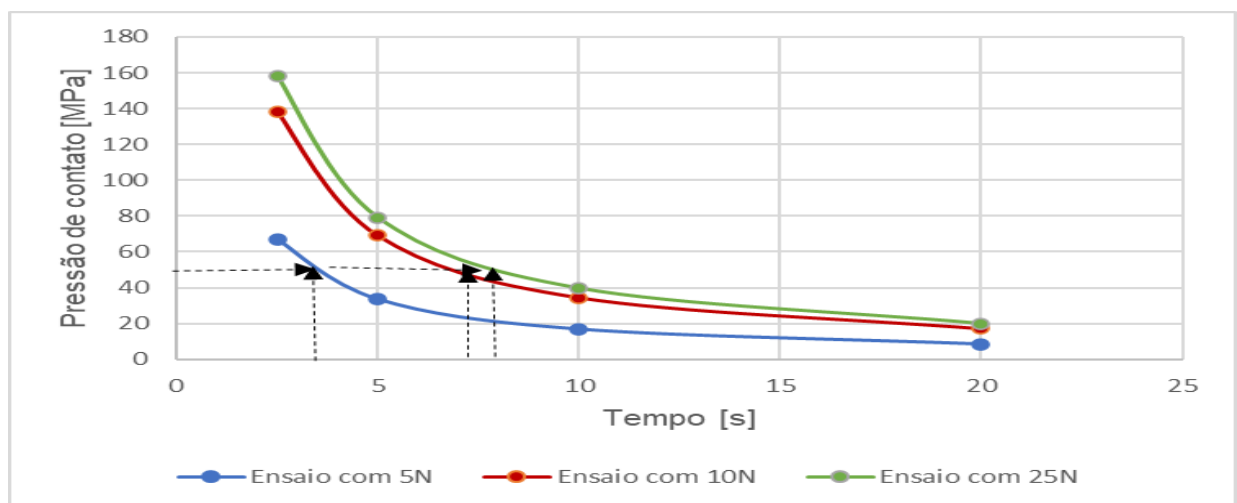


Gráfico 42 - Comparativo da pressão de contato em função do tempo de ensaio. Ensaios lubrificadas com Militec.
Fonte: Autoria própria, 2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 COMPARATIVO ENTRE OS ENSAIOS: A SECO, LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40 E LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40+MILITEC

Coeficiente de atrito: Nos Gráficos 43, 44 e 45, observa-se os comparativos dos coeficientes de atrito entre as três cargas de ensaio em suas diferentes condições de lubrificações. É possível perceber que nos ensaios a seco a curva do coeficiente de atrito ficou igual, independentemente da carga normal utilizada, em torno de 0,43 e 0,45 μ . E mostrou-se a condição mais severa que um aço pode ser submetido quando comparado com os ensaios lubrificados, tanto com o Óleo 5w40 e quanto o Militec.

Essa condição de elevado coeficiente de atrito em ensaios a seco foi encontrada também por Pacheco (2021) em seus experimentos, comprovando que o ensaio a seco apresenta severas condições de coeficiente de atrito e desgaste. Outro ponto que pode ser verificado é que com o aumento da velocidade tangencial, interferiu diretamente nos coeficientes de atrito, trazendo valores menores do que os encontrados por Pacheco (2021).

Ainda no Gráfico 43, tem-se a comparação do coeficiente de atrito com os ensaios lubrificados com a carga de 5N e é possível analisar que a utilização do militec não se apresentou tão eficiente no controle do coeficiente de atrito, pois os valores são muito parecidos com aqueles obtidos com o óleo 5w40.

Já o Militec, no comparativo com os ensaios com cargas de 10N e 25, apresentados nos Gráficos 44 e 45, se mostraram bastante eficazes na diminuição do coeficiente de atrito, evidenciando assim que o aumento da carga normal contribui para redução desse coeficiente. Já nos resultados encontrados por Pacheco (2021), a utilização do Militec só se mostrou eficiente no ensaio de 10N e nos demais ensaios apresentou um aumento no coeficiente de atrito e trouxe prejuízo para a superfície do material.



Gráfico 43 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio com carga de 5N. Fonte: Autoria própria, 2023.

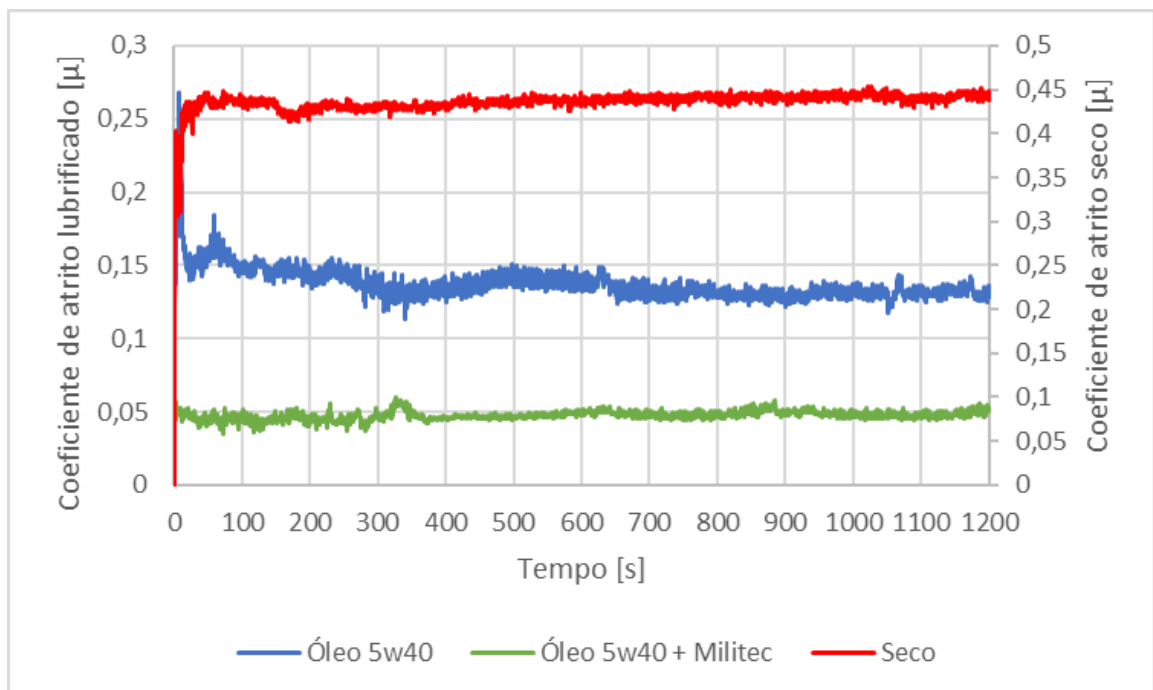


Gráfico 44 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio com carga de 10N. Fonte: Autoria própria, 2023.

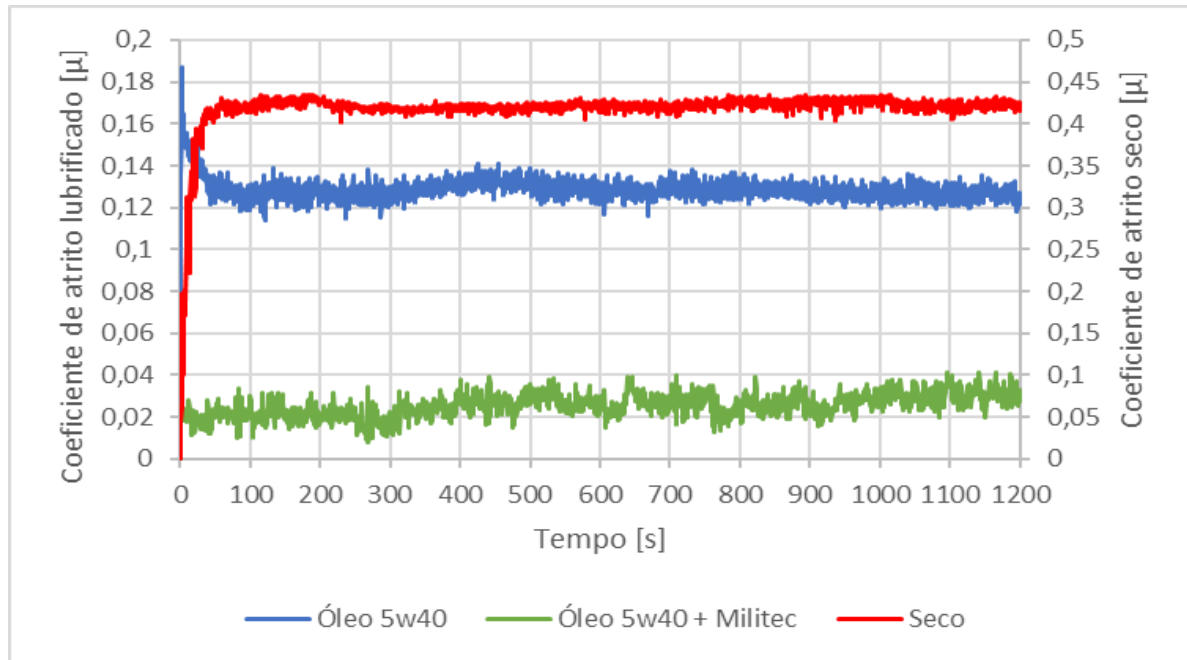


Gráfico 45 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios com carga de 25N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Temperatura: A comparação da temperatura pode ser visualizada no Gráficos 46, 47 e 48. Como esperado, a tempo dos ensaios a seco se apresentou a mais elevado e comprovando, mais um vez, que foi o ensaio mais severo. Já a temperatura nos ensaios é possível perceber que a utilização do Militec melhorou a capacidade dissipava de calor no ensaio de 5N enquanto que, nos ensaios com 10N e 25N melhorou apenas o início do ensaio; pois ao final, acabou igualando-se ao ensaio com Óleo 5w40.

Já nos ensaios de Pacheco (2021), a utilização do Militec trouxe um aumento na temperatura, quando comparados com o Óleo 5w40. Isso talvez, possa ser explicado devido as propriedades do Militec funcionarem melhor a temperaturas mais elevadas, que é o que acontece quando se aumenta a velocidade tangencial.

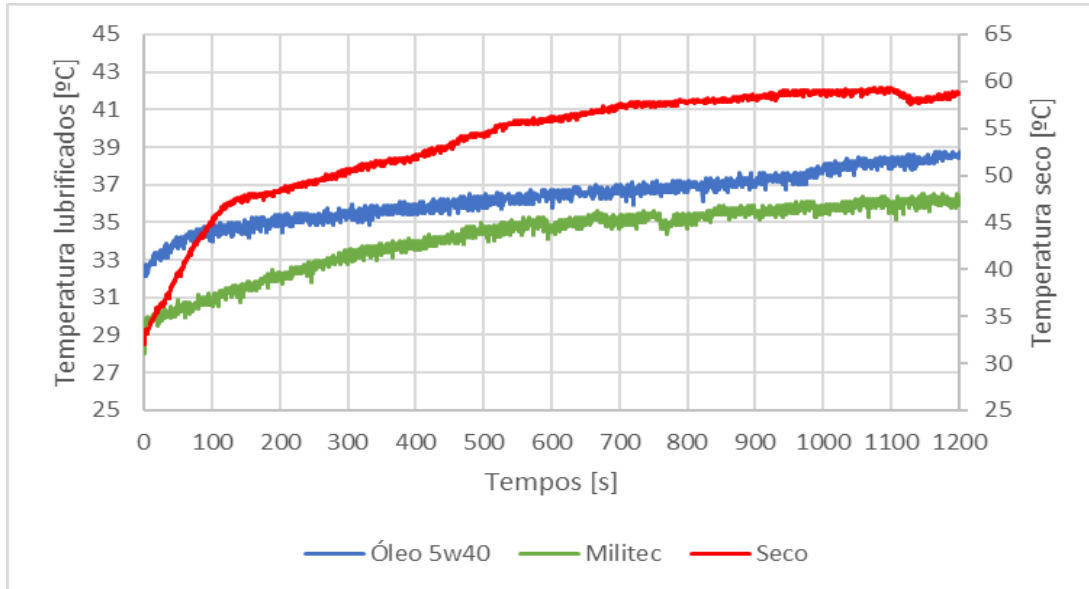


Gráfico 46 -Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaios lubrificados. Ensaio com carga de 5N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

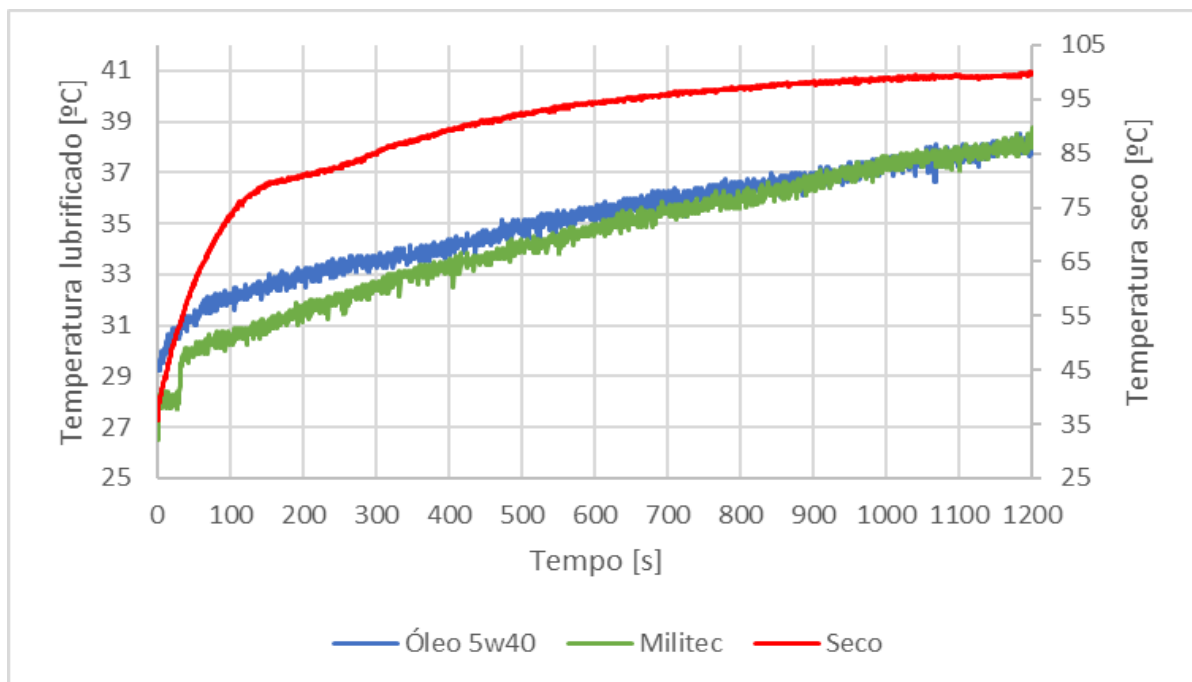


Gráfico 47 -Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaios lubrificados. Ensaio com carga de 10N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

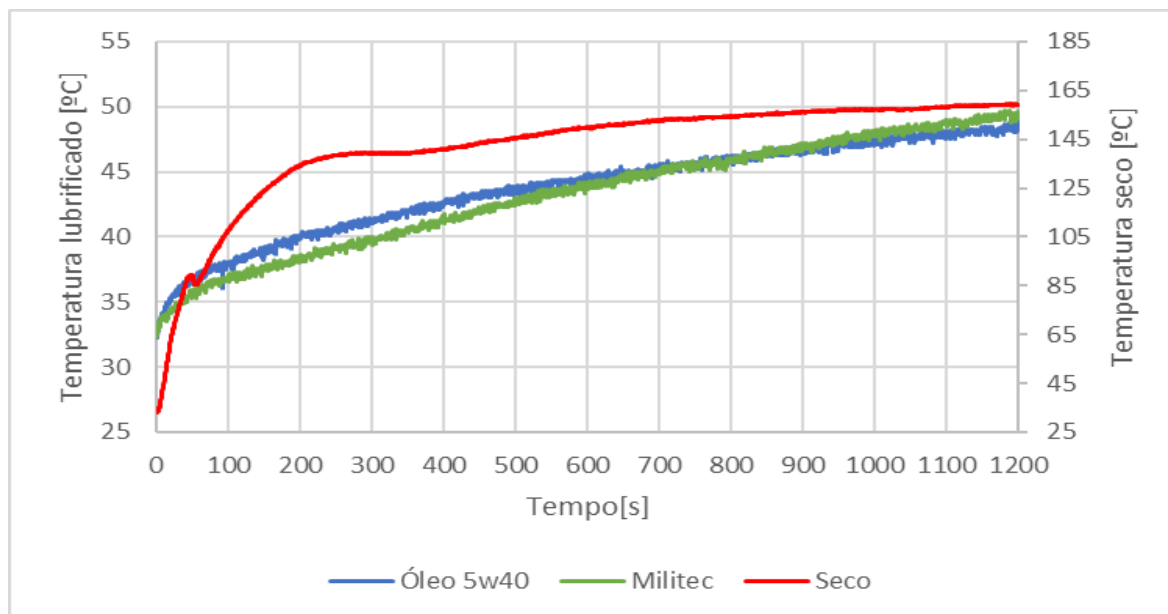







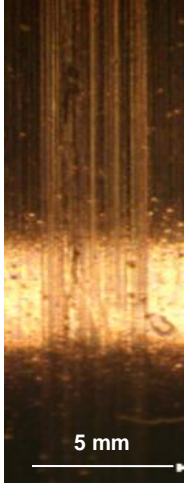


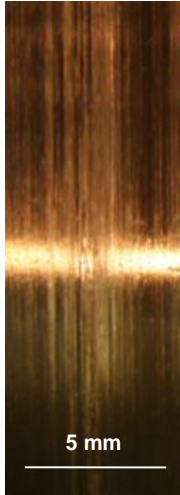
Gráfico 48 - Comparativo da temperatura em função do tempo de ensaios lubrificado. Ensaio com carga de 25N.
Fonte: Autoria própria, 2023.

Análise superficial: A seguir são mostradas uma comparação entre as superfícies desgastadas dos discos, Tabela 25 e dos pinos, Tabela 26. Foi possível verificar a melhora nas condições superficiais com a utilização de lubrificação em comparação ao regime a seco. Os desgastes mais severos podem ser observados nos ensaios a seco, onde se apresenta uma forte degradação da superfície, que vai se acentuando com o aumento das cargas, apresentando crateras, trincas e deformações plásticas.

A utilização do Militec nos discos, apresentaram uma trilha menor se comparado com o Óleo 5w40 e com, visualmente, menor quantidade de sulcos. Nas superfícies dos pinos, observou-se também a diminuição do desgaste superficial em comparação com o Óleo 5w40, apesar de apresentar uma superfície mais craqueada.


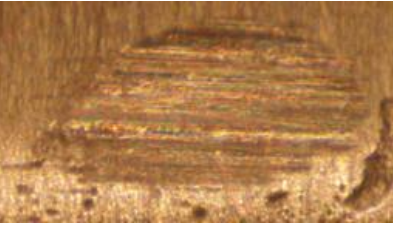


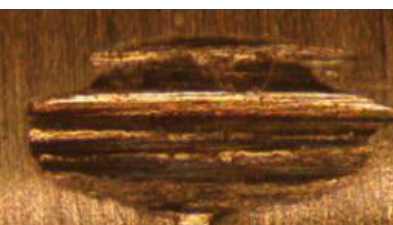
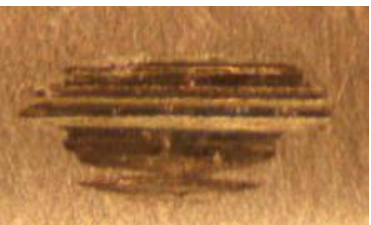
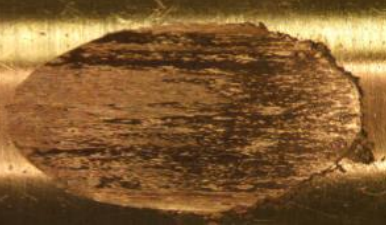

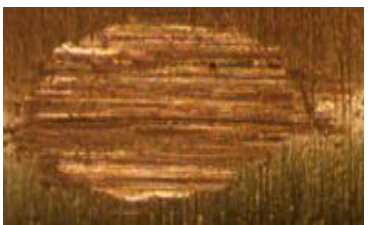
O mesmo não aconteceu com Pacheco (2021), que com a utilização do Militec as superfícies dos discos apresentaram trilhas maiores, com maior número de sulcos e se mostrando mais profundos do que com o Óleo 5w40. Isso pode ter ocorrido devido aumento da velocidade tangencial que acaba por aumentar alguns fatores, como a tensão superficial e a temperatura. Esses dois componentes podem ativar a ação do Militec na superfície do aço, formando esse filme que trata e protege o aço contra o atrito e o desgaste, conforme a Tabela 25, a seguir apresentada.

Tabela 25 - Comparação das superfícies desgastadas dos discos

Tipo de ensaio	Seco	Óleo 5w40	Óleo 5w40 + Militec
5N			
10N			
25N			

Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 26 -Comparação das superfícies desgastadas dos discos.

Tipo de ensaio	Seco	Óleo 5w40	Óleo 5w40 + Militec
5N			
10N			
25N			

Fonte: Autoria própria, 2023.

Desgaste: Na Tabela 26 são apresentados os valores de perda de massa medidos nas três condições de ensaio.

Tabela 27 - Comparativo da perda de massa entre os ensaios lubrificados.

Tipo de ensaio	Massa a com 5N [10 ⁻³ g]	Massa com 10N [10 ⁻³ g]	Massa com 25N [10 ⁻³ g]
Seco	143 ± 9	147 ± 13	343 ± 25
Óleo 5w40	8 ± 3	10 ± 2	12 ± 6
Óleo 5w40 + Militec-1	3 ± 0,2	4 ± 3	9 ± 4

Fonte: Autoria própria, 2023.

E no Gráfico 49, a seguir apresentado, é trazida, de forma gráfica e comparativa essa perda de massa. E como esperado, devido aos dados encontrados na força de atrito e na temperatura, a utilização do Militec trouxe uma melhora significativa no desgaste da superfície, provando a sua eficiência nessas condições de ensaio. O mesmo não aconteceu com Pacheco (2021), na qual a perda de massa foi muito maior nos ensaios lubrificados com Militec. E nos ensaios a seco a perda de massa se apresentou muito mais elevado o que nos ensaios lubrificados, apresentando novamente, a severidade desse tipo de ensaio.

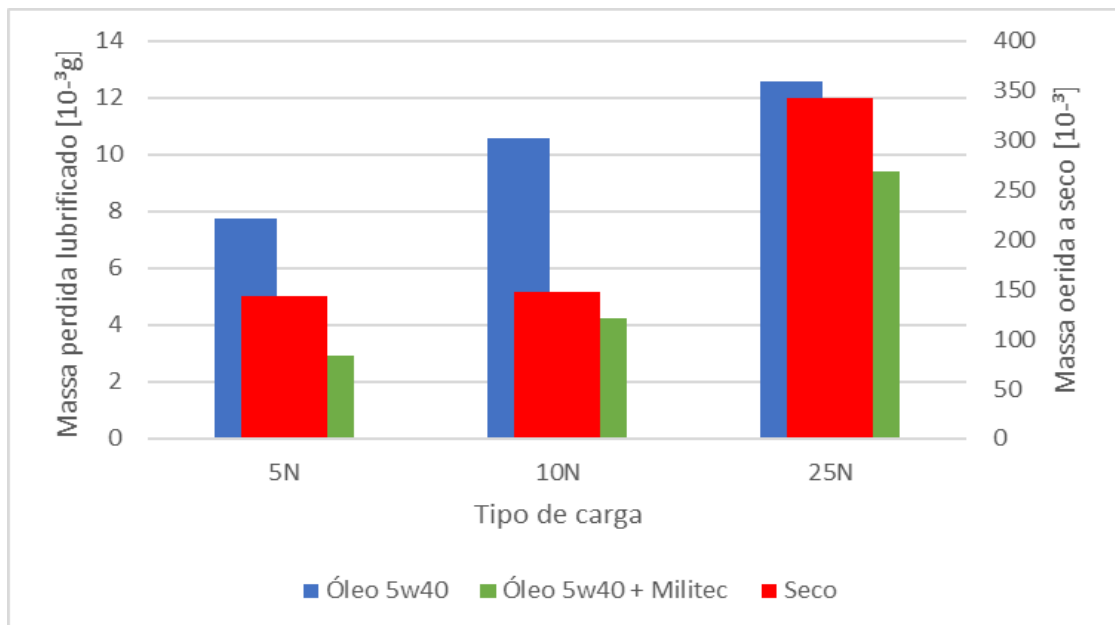


Gráfico 49 - Comparativo da massa perdida.
Fonte: Autoria própria, 2023.

6 CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos e as análises realizadas, neste TCC, pode-se concluir que, os ensaios realizados a seco provocaram a situação mais severa e prejudicial que um material pode sofrer, independentemente da carga normal. O mesmo ocorre com a temperatura pois ela está diretamente relacionada à força de atrito.

Como esperado, a utilização de lubrificação nos ensaios se mostrou benéfica para a redução do coeficiente de atrito e do desgaste quando comparados com os ensaios a seco. A utilização do condicionador de metais Militec-1, junto com o Óleo 5w40, de modo geral, mostrou-se mais eficiente na diminuição do coeficiente de atrito do que usar apenas o Óleo 5w40.

O desgaste medido na superfície dos pinos (perda de massa) foi menor em ensaios lubrificados com o uso do Militec.

O aumento da velocidade tangencial, nos ensaios de desgaste lubrificado, comparada com a utilizada por Pacheco (2021) resultou na obtenção de resultados contrários aos obtidos pelo citado autor. Para chegar num diagnóstico mais apurado com relação ao uso do Militec, se faz necessário continuar com este tipo de estudo de atrito e desgaste sob outras condições.

7 TRABALHOS FUTUROS

A partir deste trabalho é importante estudar, com o objetivo de explicar melhor os dados apresentados, os seguintes aspectos:

- Os detritos depositados no óleo após os ensaios e sua influência no desgaste em sistemas lubrificados;
- A análise do comportamento da camada de óxido em sistemas sem lubrificação (a seco) e com diferentes variações de cargas;
- A análise química da utilização do condicionado de metais Militec na superfície e entender o porquê de ele deixar a superfície mais craqueada.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANTUNES, M. A. C. **Projeto e construção de dispositivo para ensaios do tipo pino/disco – I.** 2020. Monografia apresentada ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília – UnB. 2020.

BAYER, R. G. ***Mechanical wear prediction and prevention***, Marcel Dekker, 657p., 1994.

BLAU, P. J. **Friction lubrication and wear technology** – vol 18. AMERICAN SOCIETY FOR METALS – ASM. Metals Handbook, 1992.

BOTH, G. B. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para a aplicação em ferramentas de conformação a frio.** Programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais – PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais Ciência e Engenharia de Materiais - Uma introdução**, 2002.

CASTRO, V. V.; SANTOS, C. A.; PACHECO, J. L. **Avaliação da resistência ao desgaste dos Aços SAE 52100 E SAE 1045 lubrificadas com biodiesel e óleo diesel comercial.** 2015.

CIDADE, M. J. A. **Determinação de metais em óleo lubrificante empregando as técnicas ring oven e micro fluorescência de raio X.** Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas, São Paulo, 2016.

CLEMENTE, C.; CUEVA, E. G. **Influence of lubricant of sliding wear AISI 304.** 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Dezembro 3-8. Curitiba- PR, Brasil, 2017.

DIFERRO, AÇOS ESPECIAIS. **Industria automobilística e o setor do aço: entenda a estreita relação entre os dois.** Disponível em: <https://www.diferro.com.br/blog/tecnologia/industria-automobilistica-e-o-setor-do-aco-entenda-a-estreita-relacao-entre-os-dois.html>. 2021. Acesso em: 14 de mar. 2023.

GALÁRRAGA, E. G. C. **Aula de Introdução ao desgaste, ministrada no Departamento de Engenharia Automotiva da UnB.** 2019.

GIASSI, Ferro & Aço. **Aço SAE 1045 e suas propriedades.** 2023. Disponível em: <https://giassiferroeaco.com.br/o-aco-sae-1045-e-suas-propriedades/>. Acesso em: 05 de fev. 2023.

HUTCHINGS, I. M. ***Tribology: Friction and Wear of engineering materials***. 1 ed. Elsevier Limited, 1992.

HEBERLE, M. A. **Avaliação da Influência do Sentido da Laminação e do Tratamento Térmico de Normalização no Desgaste de Aços 1020 Laminados a Quente**. Monografia (Departamento de Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

LEMOS, A. H. **Ensaio em sistemas lubrificados utilizando aço inox 304-L. Monografia de conclusão de curso**. Universidade de Brasília, DF. 2018.

LIMA, A. E. A. **Avaliação e Otimização do Processo de Recuperação de óleos lubrificantes automotivos usados**. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2016.

LTAD – Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste. **Ensaio de desgaste por deslizamento**. 2023. Disponível em: http://www.ltad.mecanica.ufu.br/sites/ltad.mecanica.ufu.br/files/anexos/ensaios_de_desgaste_por_deslizamento.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

LUZ, G. **Aço SAE 1045, propriedade mecânicas e composição química**. 2022. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 03 de fev. 2023.

MARTINELLI, Fundação. **Aplicações e propriedade de produtos da linha de aços 1045**. Disponível em: <https://fundicaomartinelli.com.br/produto/aplicacoes-e-propriedades-aco/#:~:text=O%20a%C3%A7o%20SAE%201045%20%C3%A9,585%20MPa%20ou%2084800%20psi>. Acesso em: 03 de fev. 2023.

MILITEC-1. **Conheça Miltec-1**. Disponível em: <https://militecbrasil.com.br/militec-1/>. Acesso em: 14 de mar. de 2023.

NEALE, M. J. **Lubrication and Reliability Handbook**. 1ed. 2000.

PACHECO, A. P. **Estudo do atrito e desgaste em diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino-disco de AÇO 1045**. Monografia para o curso de graduação em Engenharia Automotiva. Universidade de Brasília – UnB. 2021. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/30172>. Acesso em: 12 mar. 2023.

PINTO, R. A. **Degaste por deslizamento da camada martensítica obtida por meio do SHTPN no aço inoxidável ferrítico AISI 409**. Dissertação de conclusão de curso. Departamento Acadêmico de Mecânica, curso de Engenharia industrial mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Curitiba, 2013.

PROFITO, F. J. **Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicada a superfícies texturizadas**. 2010. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2010.

RADI *et al.* **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. 13^o Encontro de Iniciação Científica e Pós – Graduação do ITA – XIII ENCITA. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2007.

SAMPAIO, M. A. B. **Mecânica do contato com o método dos elementos de contorno para modelagem de máquinas tuteladoras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paula. São Paulo, 2009.

SAMPAIO, M. A. B.; NORONHA, M. A. M. A. ***A contact mechanics approach for the simulation of rock TBMs tunneling with the boundary element method***. 2nd International Conference on Computational Methods in Tunneling, 2009.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR A. W. ***Engineering Tribology***, 2005.

TRINDADE, E. D. **Efeito do tipo de óleo básico no desempenho tribológico de dialquilditiocarbamato de molibdênio com aditivo para lubrificantes automotivos**. 2014. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002478305>. Acesso em: 12 mar. 2023.