

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

**Estudo do comportamento em desgaste do aço
SAE 1045 submetido a ensaios do tipo pino
sobre disco lubrificadas com adição do
condicionador de metais Nano®**

Autor: Lucas Pereira da Silva.

Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga

Brasília, DF

2023



Lucas Pereira da Silva.

**Estudo do comportamento em desgaste do aço SAE 1045
submetido a ensaios do tipo pino sobre disco lubrificadas
com adição do condicionador de metais Nano®**

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

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga

Brasília, DF

2023

Lucas Pereira da Silva.

Estudo do comportamento em desgaste do aço SAE 1045 submetido a ensaios do tipo pino sobre disco lubrificado com adição do condicionador de metais Nano®/ Lucas Pereira da Silva.. – Brasília, DF, 2023-

110 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2023.

1. Desgaste. 2. Pino sobre Disco. I. Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo do comportamento em desgaste do aço SAE 1045 submetido a ensaios do tipo pino sobre disco lubrificado com adição do condicionador de metais Nano®

CDU Classificação

Lucas Pereira da Silva.

Estudo do comportamento em desgaste do aço SAE 1045 submetido a ensaios do tipo pino sobre disco lubrificado com adição do condicionador de metais Nano®

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

Trabalho aprovado. Brasília, DF, :

Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga
Orientador

Prof. Dr. Emmanuel Pacheco Rocha Lima
Convidado 1

Eng. Joao Carlos Wohlgemuth
Convidado 2

Brasília, DF
2023

Agradeço imensamente aos meus pais por nunca terem medido esforços para me proporcionar educação de qualidade ao longo de toda a minha jornada, permitindo-me alcançar esta incrível instituição.

Agradecimentos

Expresso minha profunda gratidão aos meus familiares e amigos por seu amor incondicional, apoio constante e motivação ao longo deste trabalho, em especial ao amigo Arthur Tripode, que esteve presente e contribuiu em diversos momentos. Agradeço calorosamente ao meu querido orientador, Professor Cueva, por sua orientação paciente, ensinamentos valiosos e conselhos preciosos. Por fim, sou grato à Universidade de Brasília por proporcionar educação pública de qualidade e por contribuir significativamente para meu crescimento pessoal e profissional.

Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi investigar o desgaste do aço SAE 1045, amplamente utilizado na indústria automotiva, quando submetido a ensaios de desgaste, especificamente em testes na configuração pino sobre disco, variando as condições experimentais (velocidade, lubrificação, carregamento e distância linear percorrida). A elaboração deste trabalho envolveu uma revisão abrangente da literatura, com a análise de trabalhos relacionados de diversos autores. Além disso, foram coletados dados e informações por meio de consultas a plataformas de trabalhos acadêmicos online, livros e artigos. Os ensaios de desgaste foram realizados sob duas diferentes cargas, de 25 e 50 *Newtons*, com lubrificação fornecida por duas diferentes soluções, uma com apenas óleo lubrificante 5W40 e a outra com uma mistura de óleo 5W40 e um aditivo condicionador de metais chamado Nano Automotivo®, na concentração de 3%. Esses testes foram realizados utilizando duas velocidades tangenciais diferentes: $5,67m/s$ e $1,13m/s$. Com o intuito de padronizar os ensaios, as superfícies dos pinos e dos discos foram preparadas por meio de lixamento e polimento. Os ensaios de desgaste foram realizados em uma bancada de ensaios (tribômetro) equipada com sensores que possibilitaram medir, em tempo real, a força de atrito desenvolvida no conjunto e a temperatura do pino durante cada ensaio. A duração do teste foi variada de acordo com a abordagem de interesse. Os principais parâmetros analisados foram: a força de atrito, o coeficiente de atrito, a temperatura, a perda de massa e a análise do dano superficial resultante do atrito. Os resultados indicaram que a taxa de desgaste foi maior nos momentos iniciais do ensaio. Além disso, o estudo resultou na classificação da ordem de influência das condições experimentais no desgaste: velocidade, carregamento e lubrificação. Adicionalmente, a utilização da mistura óleo 5W40 + Nano Automotivo® apresentou melhor desempenho em comparação ao uso isolado do óleo lubrificante. Isso contribuiu significativamente para a melhoria das condições de atrito e, por conseguinte, para diminuir o desgaste dos componentes utilizados. Concluiu-se também, que a variação das condições de ensaio afeta diretamente nos resultados finais obtidos.

Palavras-chaves: Desgaste, Lubrificação, Velocidade, Carregamento, Pino sobre disco, Aço SAE 1045.

Abstract

The main objective of this work was to investigate the wear of SAE 1045 steel, widely used in the automotive sector, when subjected to wear tests, specifically in pin-on-disc configuration, varying the experimental conditions (speed, lubrication, load, and linear distance traveled). The elaboration of this work involved a comprehensive literature review, analyzing related works by various authors. Additionally, data and information were collected through queries to online academic platforms, books, and articles. Wear tests were conducted under two different loads, 25 and 50 *Newtons*, with lubrication provided by two different solutions, one with only 5W40 lubricating oil and the other with a mixture of 5W40 oil and a metal conditioner additive called Nano Automotivo®, at a concentration of 3%. These tests were conducted at two different tangential speeds: 5.67m/s and 1.13m/s. In order to standardize the tests, the surfaces of the pins and discs were prepared by sanding and polishing. Wear tests were conducted on a test bench (tribometer) equipped with sensors that allowed a real time measurement of the friction force developed in the assembly and the temperature of the pin during each test. The test duration varied according to the approach of interest. The main parameters analyzed were: friction force, coefficient of friction, temperature, mass loss and analysis of the surface damage resulting from friction. The results indicated that the wear rate was higher in the initial moments of the test. Additionally, the study resulted in the classification of the order of influence of experimental conditions on wear: speed, loading, and lubrication. Furthermore, the use of the 5W40 oil + Nano Automotivo® mixture showed better performance compared to the isolated use of lubricating oil. This significantly contributed to improving friction conditions and, consequently, reducing the components wear. It was also concluded that the variation of tests conditions directly affects the final results obtained.

Key-words: Wear, Lubrification, Speed, Load, Pin-on-disc, SAE 1045 steel.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama de estruturação do trabalho.	24
Figura 2 – A força F necessária para causar movimento de rolagem ou deslizamento de um corpo com força normal W	26
Figura 3 – Efeito do aumento da carga normal na área de contato das superfícies (contato entre asperezas).	28
Figura 4 – Geometria do contato. a) contato conforme; b) contato não conforme;	29
Figura 5 – Representação de uma lubrificação hidrodinâmica - picos e vales dividindo igualmente o carregamento.	33
Figura 6 – Representação detalhada de uma lubrificação hidrodinâmica.	33
Figura 7 – Representação de uma lubrificação elastohidrodinâmica - a maior parte da carga se concentra nos picos das superfícies (asperezas).	34
Figura 8 – Representação detalhada de uma lubrificação elastohidrodinâmica.	34
Figura 9 – Representação de uma lubrificação limítrofe - 90% da carga se concentra em picos das superfícies.	35
Figura 10 – Representação detalhada de uma lubrificação limítrofe.	35
Figura 11 – Mecanismos de desgaste por deslizamento.	36
Figura 12 – Corpos de prova utilizados no ensaio: disco (na esquerda e maior) e pino (na direita e menor).	38
Figura 13 – Superfície do disco após o acabamento superficial.	40
Figura 14 – Superfície do pino após o acabamento superficial.	40
Figura 15 – Óleo 5W40.	41
Figura 16 – Aditivo condicionador de metais Nano®.	41
Figura 17 – Bancada de testes com tribômetro e seus componentes complementares - vista frontal.	43
Figura 18 – Bancada de testes com tribômetro e seus componentes complementares - vista isométrica.	43
Figura 19 – Lubrificação correta do conjunto.	45
Figura 20 – Esquemático dos parâmetros para calcular o volume perdido.	48
Figura 21 – Gráfico referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificadas com óleo 5W40 e com 25N de carregamento.	51
Figura 22 – Gráfico referente à área desgastada em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificadas com óleo 5W40 e com 25N de carregamento.	52
Figura 23 – Gráfico referente à taxa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificadas com óleo 5W40 e com 25N de carregamento.	53

Figura 24 – Gráfico referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 25 <i>N</i> de carregamento.	54
Figura 25 – Gráfico referente à área desgastada em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 25 <i>N</i> de carregamento.	54
Figura 26 – Gráfico referente à taxa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 25 <i>N</i> de carregamento.	55
Figura 27 – Gráfico comparativo referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações e condições de lubrificação para a carga de 25 <i>N</i>	56
Figura 28 – Gráfico comparativo referente à taxa de desgaste em ensaios com diferentes durações e condições de lubrificação para a carga de 25 <i>N</i>	57
Figura 29 – Gráfico referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 e com 50 <i>N</i> de carregamento.	57
Figura 30 – Gráfico referente à área desgastada em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 e com 50 <i>N</i> de carregamento.	58
Figura 31 – Gráfico referente à taxa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 e com 50 <i>N</i> de carregamento.	59
Figura 32 – Gráfico referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 50 <i>N</i> de carregamento.	59
Figura 33 – Gráfico referente à área desgastada em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 50 <i>N</i> de carregamento.	60
Figura 34 – Gráfico referente à taxa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 50 <i>N</i> de carregamento.	61
Figura 35 – Gráfico comparativo referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações e condições de lubrificação para a carga de 50 <i>N</i>	62
Figura 36 – Gráfico comparativo referente à taxa de desgaste em ensaios com diferentes durações e condições de lubrificação para a carga de 50 <i>N</i>	62
Figura 37 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 5V.	64
Figura 38 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 5V.	64
Figura 39 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 5V.	65

Figura 40 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.	67
Figura 41 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.	67
Figura 42 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.	68
Figura 43 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios de velocidade 5V e 25N de carga, nas configurações de lubrificação: lubrificado apenas com óleo 5W40 e lubrificado com mistura óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.	71
Figura 44 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.	72
Figura 45 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.	72
Figura 46 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.	73
Figura 47 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.	74
Figura 48 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.	75
Figura 49 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.	76
Figura 50 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios de velocidade 5V e 50N de carga, nas configurações de lubrificação: lubrificado apenas com óleo 5W40 e lubrificado com mistura óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.	78
Figura 51 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios com as mesmas condições de lubrificação, porém diferentes cargas.	79
Figura 52 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 1V.	80

Figura 53 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 1V.	81
Figura 54 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 1V.	82
Figura 55 – Gráfico da variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 1V.	83
Figura 56 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 1V.	83
Figura 57 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 1V.	84
Figura 58 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios de velocidade 1V e 25 <i>N</i> de carga, nas configurações de lubrificação: lubrificado apenas com óleo 5W40 e lubrificado com mistura óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.	86
Figura 59 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50 <i>N</i> e velocidade 1V.	87
Figura 60 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50 <i>N</i> e velocidade 1V.	88
Figura 61 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50 <i>N</i> e velocidade 1V.	89
Figura 62 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50 <i>N</i> e velocidade 1V.	90
Figura 63 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50 <i>N</i> e velocidade 1V.	90
Figura 64 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50 <i>N</i> e velocidade 1V.	91
Figura 65 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios de velocidade 1V e 50 <i>N</i> de carga, nas configurações de lubrificação: lubrificado apenas com óleo 5W40 e lubrificado com mistura óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.	93

Figura 66 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios com as mesmas condições de lubrificação, porém diferentes cargas.	95
Figura 67 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades nas configurações: 25 <i>N</i> de carga e lubrificado apenas com óleo 5W40.	96
Figura 68 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades nas configurações: 25 <i>N</i> de carga e lubrificado com óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.	97
Figura 69 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades nas configurações: 50 <i>N</i> de carga e lubrificado apenas com óleo 5W40.	97
Figura 70 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades nas configurações: 50 <i>N</i> de carga e lubrificado com óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.	97
Figura 71 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) de 4 minutos sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 5V.	98
Figura 72 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) de 4 minutos sob as seguintes condições: 25 <i>N</i> e velocidade 5V.	99
Figura 73 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) de 4 minutos sob as seguintes condições: 50 <i>N</i> e velocidade 5V.	100
Figura 74 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) de 4 minutos sob as seguintes condições: 50 <i>N</i> e velocidade 5V.	101
Figura 75 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, nas configurações: 25 <i>N</i> de carga e lubrificado apenas com óleo 5W40.	103
Figura 76 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, nas configurações: 25 <i>N</i> de carga e lubrificado com óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.	103
Figura 77 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, nas configurações: 50 <i>N</i> de carga e lubrificado apenas com óleo 5W40.	104

Figura 78 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, nas configurações: 25*N* de carga e lubrificado com óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®. 104

Lista de tabelas

Tabela 1 – Composição química do Aço SAE 1045.	25
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do Aço SAE 1045.	25
Tabela 3 – Relação de lixas utilizadas para o lixamento dos pinos e discos.	39
Tabela 4 – Demonstrativo de distância linear percorrida em diferentes configurações de ensaio.	46
Tabela 5 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, óleo 5W40 e carga 25N.	66
Tabela 6 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, óleo 5W40 + Nano® e carga 25N.	69
Tabela 7 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, óleo 5W40 e carga 50N.	74
Tabela 8 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, óleo 5W40 + Nano® e carga 50N.	76
Tabela 9 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 1V, óleo 5W40 e 25N.	82
Tabela 10 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 1V, óleo 5W40 + Nano® e 25N.	85
Tabela 11 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 1V, óleo 5W40 e 50N.	89
Tabela 12 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 1V, óleo 5W40 + Nano® e 50N.	92
Tabela 13 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, 4 minutos, óleo 5W40 e 25N.	98
Tabela 14 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, 4 minutos, óleo 5W40 + Nano® e 25N.	99
Tabela 15 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, 4 minutos, óleo 5W40 e 50N.	100
Tabela 16 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, 4 minutos, óleo 5W40 + Nano® e 50N.	101

Lista de abreviaturas e siglas

Siglas

FGA	Faculdade do Gama
LEH	Lubrificação Elastohidrodinâmica
LH	Lubrificação Hidrodinâmica
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> - Sociedade dos Engenheiros Automotivos
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UnB	Universidade de Brasília

Unidades

<i>cv</i>	Cavalo-vapor
<i>GPa</i>	Giga Pascal
<i>g/cm³</i>	Grama por centímetro cúbico
<i>HB</i>	<i>Brinell Hardness</i> - Dureza de Brinell
<i>kg</i>	Quilograma
<i>m/s</i>	Metro por segundo
<i>m²</i>	Metro quadrado
<i>ml</i>	Mililitro
<i>mm</i>	Milímetro
<i>mm²</i>	Milímetro quadrado
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>RPM</i>	Rotação por minuto
<i>Pa</i>	Pascal
”	Polegada

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Introdução	21
1.2	Objetivos	22
1.2.1	Objetivo geral	22
1.2.2	Objetivos específicos	22
1.2.2.1	Estrutura do trabalho	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	Aço SAE 1045	25
2.2	Tribologia	25
2.2.1	Atrito	26
2.2.1.1	Contato entre superfícies	27
2.2.1.2	Contato conforme e não-conforme	28
2.3	Lubrificantes	29
2.3.1	Lubrificantes líquidos	30
2.3.2	Aditivos para lubrificantes	31
2.3.2.1	Condicionador de metais NANO Automotivo®	31
2.3.3	Regimes de lubrificação	32
2.3.3.1	Lubrificação hidrodinâmica (LH)	32
2.3.3.2	Lubrificação elastohidrodinâmica (LEH)	33
2.3.3.3	Lubrificação Limítrofe	34
2.4	Desgaste	35
2.4.1	Mecanismos de desgaste por deslizamento	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	Materiais	38
3.1.1	Corpos de prova	38
3.1.2	Lubrificantes	41
3.2	Métodos	42
3.2.1	Equipamentos	42
3.2.2	Configurações das variáveis de ensaio	44
3.2.2.1	Velocidade	44
3.2.2.2	Lubrificação	44
3.2.2.3	Carga	45
3.2.2.4	Proposta do ensaio	45
3.2.2.4.1	Ensaio principais	45

3.2.2.4.2	Ensaio para determinação de perda de massa	47
3.2.3	Cálculo do volume perdido	47
3.2.4	Determinação da pressão de contato - Regime de lubrificação	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Ensaio determinação da perda de massa em velocidade 5V	50
4.1.1	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 com 25N de carga	50
4.1.1.1	Desgaste - Perda de massa	50
4.1.1.2	Desgaste - Área desgastada	51
4.1.1.3	Taxa de desgaste	52
4.1.2	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 + Nano Automotivo® - 25N	53
4.1.2.1	Desgaste - Perda de massa	53
4.1.2.2	Desgaste - Área desgastada	54
4.1.2.3	Taxa de desgaste	55
4.1.3	Comparativo dos ensaios com 25N em diferentes condições de lubrificação	55
4.1.3.1	Desgaste	55
4.1.3.2	Taxa de desgaste	56
4.1.4	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 50N	57
4.1.4.1	Desgaste - Perda de massa	57
4.1.4.2	Desgaste - Área desgastada	58
4.1.4.3	Taxa de desgaste	58
4.1.5	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 + Nano Automotivo® - 50N	59
4.1.5.1	Desgaste - Perda de massa	59
4.1.5.2	Desgaste - Área desgastada	60
4.1.5.3	Taxa de desgaste	60
4.1.6	Comparativo dos ensaios com 50N em diferentes condições de lubrificação	61
4.1.6.1	Desgaste	61
4.1.6.2	Taxa de desgaste	62
4.1.7	Considerações finais sobre pressão de contato e transição entre regimes de lubrificação - Velocidade 5V	63
4.2	Ensaio de 20 minutos na velocidade 5V - 5,67m/s de velocidade tangencial (1720RPM)	63
4.2.1	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 25N	63
4.2.1.1	Força de atrito	63
4.2.1.2	Coefficiente de atrito	64
4.2.1.3	Temperatura	64
4.2.1.4	Análise superficial	65
4.2.1.5	Desgaste	66
4.2.2	Ensaio lubrificado com a mistura 5W40 + Nano automotivo® - 25N	66
4.2.2.1	Força de atrito	66

4.2.2.2	Coeficiente de atrito	67
4.2.2.3	Temperatura	68
4.2.2.4	Análise superficial	68
4.2.2.5	Desgaste	69
4.2.3	Comparativo dos ensaios com 25N em diferentes condições de lubrificação .	69
4.2.3.1	Força de atrito	69
4.2.3.2	Coeficiente de atrito	69
4.2.3.3	Temperatura	69
4.2.3.4	Superfícies desgastadas	70
4.2.3.5	Desgaste	70
4.2.4	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 50N	71
4.2.4.1	Força de atrito	71
4.2.4.2	Coeficiente de atrito	72
4.2.4.3	Temperatura	72
4.2.4.4	Análise superficial	73
4.2.4.5	Desgaste	74
4.2.5	Ensaio lubrificado com a mistura 5W40 + Nano automotivo® - 50N	74
4.2.5.1	Força de atrito	74
4.2.5.2	Coeficiente de atrito	74
4.2.5.3	Temperatura	75
4.2.5.4	Análise superficial	75
4.2.5.5	Desgaste	76
4.2.6	Comparativo dos ensaios com 50N em diferentes condições de lubrificação .	76
4.2.6.1	Força de atrito	76
4.2.6.2	Coeficiente de atrito	77
4.2.6.3	Temperatura	77
4.2.6.4	Superfícies desgastadas	77
4.2.6.5	Desgaste	77
4.2.7	Comparativo dos ensaios com diferentes cargas	78
4.2.7.1	Força e coeficiente de atrito	78
4.2.7.2	Temperatura	78
4.2.7.3	Superfícies	79
4.2.7.4	Desgaste	79
4.3	Ensaio de 20 minutos na velocidade 1V - 1,13m/s de velocidade tangencial (344RPM)	80
4.3.1	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 25N	80
4.3.1.1	Força de atrito	80
4.3.1.2	Coeficiente de atrito	80
4.3.1.3	Temperatura	81

4.3.1.4	Análise superficial	81
4.3.1.5	Desgaste	82
4.3.2	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 25N	82
4.3.3	Ensaio lubrificado com a mistura 5W40 + Nano automotivo® - 25N	82
4.3.3.1	Força de atrito	82
4.3.3.2	Coeficiente de atrito	83
4.3.3.3	Temperatura	84
4.3.3.4	Análise superficial	84
4.3.3.5	Desgaste	84
4.3.4	Comparativo dos ensaios com 25N em diferentes condições de lubrificação	85
4.3.4.1	Força de atrito	85
4.3.4.2	Coeficiente de atrito	85
4.3.4.3	Temperatura	85
4.3.4.4	Superfícies desgastadas	86
4.3.4.5	Desgaste	86
4.3.5	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 50N	87
4.3.5.1	Força de atrito	87
4.3.5.2	Coeficiente de atrito	87
4.3.5.3	Temperatura	88
4.3.5.4	Análise superficial	88
4.3.5.5	Desgaste	89
4.3.6	Ensaio lubrificado com a mistura 5W40 + Nano automotivo® - 50N	89
4.3.6.1	Força de atrito	89
4.3.6.2	Coeficiente de atrito	90
4.3.6.3	Temperatura	91
4.3.6.4	Análise superficial	91
4.3.6.5	Desgaste	92
4.3.7	Comparativo dos ensaios com 50N em diferentes condições de lubrificação	92
4.3.7.1	Força de atrito	92
4.3.7.2	Coeficiente de atrito	92
4.3.7.3	Temperatura	92
4.3.7.4	Superfícies desgastadas	93
4.3.7.5	Desgaste	93
4.3.8	Comparativo dos ensaios com diferentes cargas	94
4.3.8.1	Força e coeficiente de atrito	94
4.3.8.2	Temperatura	94
4.3.8.3	Superfícies	94
4.3.8.4	Desgaste	94
4.4	Comparativo entre os ensaios com diferentes velocidades	95

4.4.0.1	Força e coeficiente de atrito	95
4.4.0.2	Temperatura	95
4.4.0.3	Superfícies	95
4.4.0.4	Desgaste	96
4.5	Ensaio de 4 minutos e com velocidade 5V - 5,67m/s de velocidade tangencial e 1720RPM	98
4.5.1	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 25N	98
4.5.1.1	Análise superficial	98
4.5.1.2	Desgaste	98
4.5.2	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 e + Nano Automotivo® - 25N	99
4.5.2.1	Análise superficial	99
4.5.2.2	Desgaste	99
4.5.3	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 50N	100
4.5.3.1	Análise superficial	100
4.5.3.2	Desgaste	100
4.5.4	Ensaio lubrificado com óleo 5W40 + Nano Automotivo® - 50N	100
4.5.4.1	Análise superficial	100
4.5.4.2	Desgaste	101
4.6	Comparativo entre os ensaios de mesma distância linear - 5V com 4 minutos X 1V com 20 minutos.	101
4.6.0.1	Temperatura	102
4.6.0.2	Superfícies	102
4.6.0.3	Desgaste	102
5	CONCLUSÃO	105
6	TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS	108

1 Introdução

1.1 Introdução

O aço é um material que tem sido bastante utilizado na indústria automotiva devido ao seu custo acessível, longa durabilidade e flexibilidade em atender às exigências técnicas dos produtos. O aço oferece facilidade de moldagem, disponibilidade consistente, resistência à corrosão com revestimentos de zinco, reciclabilidade e absorção eficiente de energia em colisões, tornando-o uma escolha valiosa na fabricação de veículos. (SINGH, 2016)

O aço 1045 é uma liga metálica de ferro-carbono com 0,45% de carbono, proporcionando boas características de usinagem, resistência e propriedades de impacto quando está na forma normalizada ou laminada a quente. Essa variedade de aço é amplamente empregada na produção de componentes utilizados em diversas indústrias, incluindo automobilística, agrícola, máquinas e equipamentos. (Aços Nobre, 2023)

A resistência ao desgaste é um fator de grande importância na aplicação de metais na indústria. Com o intuito de prevenir problemas relacionados ao desgaste, é comum submeter esses materiais a tratamentos térmicos, os quais desempenham um papel fundamental no aumento da sua resistência ao desgaste. (HEBERLE, 2019)

O desgaste é um processo gradual de deterioração de uma superfície que ocorre quando ela entra em contato e se movimenta em relação a outra, levando à perda de material. Esse fenômeno pode se manifestar de várias maneiras, incluindo marcas de corrosão, abrasão e polimento, resultantes de diversos mecanismos de desgaste. (BAYER, 2004)

Para minimizar os efeitos do atrito, do desgaste e do aquecimento de peças móveis em máquinas, é utilizada a lubrificação. Lubrificantes, que podem ser sólidos, líquidos ou gasosos, são aplicados entre as superfícies em movimento, formando uma película que minimiza esses efeitos adversos. Isso é crucial para melhorar o desempenho e prolongar a vida útil de diversos mecanismos. (TRINDADE, 2014)

Para aprimorar o desempenho dos óleos lubrificantes são adicionados aditivos, que são compostos químicos projetados para melhorar ou conferir novas propriedades ao lubrificante e adaptar a mistura às condições de operação. Esses aditivos são amplamente utilizados em sistemas mecânicos com o objetivo de aumentar tanto o desempenho quanto a vida útil do sistema. (NETO, 2005)

Uma classe de aditivos existente, chama-se condicionador de metais, desenvolvido

com o mesmo propósito dos aditivos tradicionais, ou seja, aprimorar o desempenho e prolongar a vida útil dos componentes, mas com a vantagem de não alterar a viscosidade do óleo lubrificante. No contexto do condicionador de metais Nano Automotivo®, sua composição possui dois tipos de nanopartículas que formam uma barreira anti-atrito nas superfícies metálicas em contato. Isso tem como objetivo reduzir o desgaste prematuro das superfícies, proporcionando uma proteção eficaz. (Tribolub, 2020)

Este trabalho se inseriu na continuidade dos estudos de desgaste conduzidos anteriormente no Laboratório de Tribologia da Faculdade do Gama (FGA - UnB). Esses estudos envolveram ensaios de desgaste na configuração pino sobre disco e têm sido desenvolvidos desde 2017. O presente trabalho buscou, através de diferentes condições experimentais, expandir e complementar as pesquisas anteriores, utilizando um condicionador de metais diferente dos já utilizados, o Nano Automotivo®. Os estudos prévios forneceram uma ótima base informativa, tornando-os de grande relevância para este estudo. Além disso, as atividades realizadas neste TCC se baseiam principalmente nos recursos tecnológicos desenvolvidos anteriormente por Clemente e Cueva (2017). (CLEMENTE; CUEVA, 2017)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Os principais objetivos deste estudo consistiram em conduzir uma investigação detalhada sobre o desgaste do aço SAE 1045, quando submetido ao desgaste consigo mesmo e, com isso, avaliar a influência das condições de ensaio e a eficácia da adição do condicionador de metais Nano Automotivo® em um óleo base (SAE 5W40) nas diferentes condições de ensaio. Esses ensaios foram realizados em duas velocidades distintas visando analisar de forma abrangente o desgaste nas diferentes condições de carga e lubrificação.

1.2.2 Objetivos específicos

O estudo objetivou investigar a influência dos parâmetros de ensaio nas variáveis de interesse nos ensaios de desgaste do aço SAE 1045 quando submetido ao atrito contra si mesmo em um sistema pino sobre disco. As variáveis em foco incluíram a força de atrito, o coeficiente de atrito, a temperatura, o desgaste superficial e a perda de massa.

O trabalho levou em consideração a influência de duas diferentes cargas (25N e 50N), em duas diferentes velocidades tangenciais (5,67m/s e 1,13m/s), tendo em vista as seguintes condições de lubrificação:

- Ensaio lubrificado com óleo SAE 5W40;

- Ensaio lubrificado com óleo lubrificante SAE 5W40 com adição do aditivo (condicionador de metais) Nano Automotivo®;

Adicionalmente, buscou-se compreender a influência das alterações nas condições de ensaio, incluindo a velocidade, a carga, a lubrificação e a distância linear percorrida (tempo de ensaio), sobre o desgaste e suas variáveis de interesse.

Além disso, o estudo pretendeu compreender o processo de desgaste ao longo dos ensaios, detalhando e dividindo os experimentos em intervalos de tempo menores. Permitindo a construção de curvas de perda de massa ao longo do tempo, oferecendo uma visão mais aprofundada do comportamento do desgaste durante os experimentos.

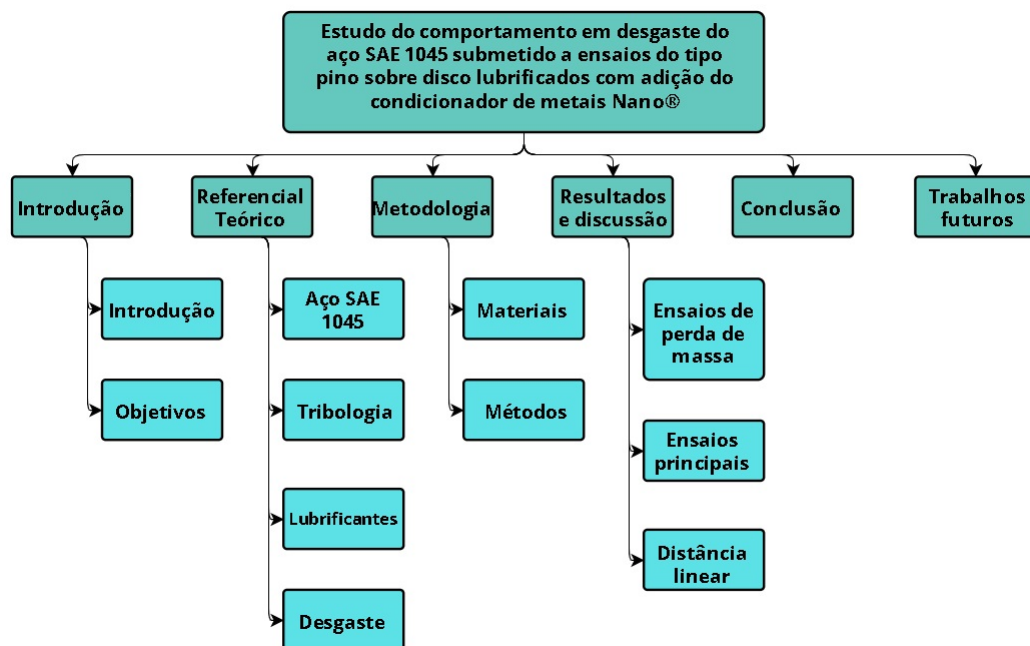
Desta maneira, esperou-se encontrar um melhor entendimento do desgaste do aço SAE 1045 sob diferentes condições de lubrificação, carga e velocidade. Sendo assim, o estudo pôde contribuir para a seleção adequada de lubrificantes, levando em consideração as condições de operação do sistema em questão, visando a redução do desgaste e o aumento da vida útil dos componentes.

1.2.2.1 Estrutura do trabalho

Para proporcionar uma estruturação mais eficiente ao presente trabalho, o conteúdo foi dividido em cinco principais capítulos, sendo estes:

- Capítulo 1: Introdução - Introdução ao tema e objetivos;
- Capítulo 2: Referencial Teórico;
- Capítulo 3: Metodologia - Materiais e métodos;
- Capítulo 4: Resultados e Discussão;
- Capítulo 5: Conclusão;

Figura 1 – Diagrama de estruturação do trabalho.



Fonte: Autor, 2023.

2 Referencial Teórico

2.1 Aço SAE 1045

O Aço SAE 1045 é uma liga metálica que apresenta médio teor de carbono, juntamente com outros elementos de liga em sua composição química, conforme demonstrado na Tabela 1. Além disso, destaca-se por possuir uma resistência mecânica, superando os aços convencionais. Essa qualidade explica sua ampla utilização na indústria mecânica, como para a fabricação de eixos e engrenagens. (CALLISTER; RETHWISCH, 2016)

Tabela 1 – Composição química do Aço SAE 1045.

Elemento	Concentração (%)
Carbono - C	0,43 a 0,50
Manganês - Mn	0,60 a 0,90
Fósforo - P	0,040 (máx.)
Enxofre - S	0,050 (máx)

Fonte: ASTM, 2017. (ASTM, 2017)

Assim como a composição química, as propriedades mecânicas do aço SAE 1045 seguem um padrão de valores. Dentre essas propriedades é importante destacar a sua densidade que é de 7.87 g/cm³. Além disso, outros valores fundamentais são utilizados para caracterizá-lo - como o limite de resistência à tração, resistência ao escoamento, módulo de elasticidade e a dureza - e podem ser encontrados na Tabela 2. (Gelson Luz, 2017)

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do Aço SAE 1045.

Número SAE	1045
Resistência à tração (MPa)	570 - 630
Resistência ao escoamento (MPa)	340 - 580
Módulo de elasticidade (GPa)	190 - 210
Dureza Brinell (HB)	163 - 179

Fonte: Budynas e Nisbett, 2011.

2.2 Tribologia

Segundo Hutchings (1992), a tribologia é a ciência e tecnologia que envolve as interações de superfícies que estão em movimento relativo, englobando o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação.

Durante estas interações superficiais, ocorre a transmissão de forças e a conversão de energia mecânica. Além disso, a topografia e as características físicas e químicas dos

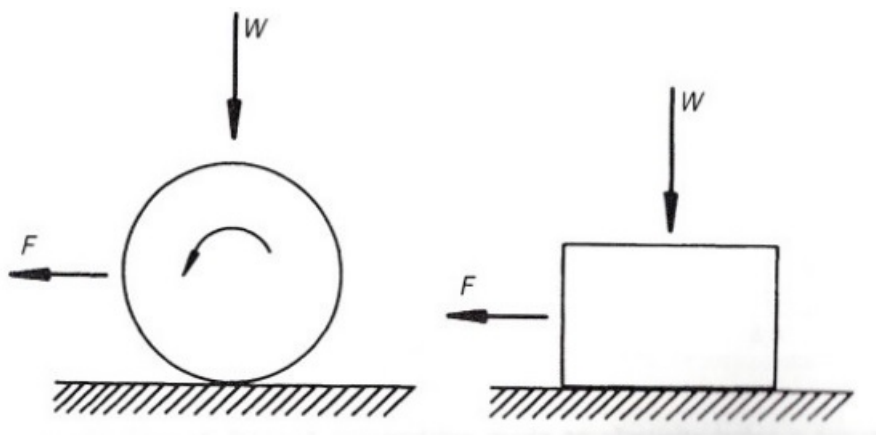
materiais envolvidos podem ser alteradas. Compreender a natureza dessas interações é fundamental para o desenvolvimento de soluções tecnológicas que abordem os problemas cotidianos relacionados aos fenômenos estudados pela tribologia. (BHUSHAN, 2013)

2.2.1 Atrito

De acordo com Hutchings (1992), o atrito pode ser compreendido como uma força resistiva ao movimento de um corpo quando em contato com outro, além disso, essa interação pode ser classificada de duas formas ou classes principais: o deslizamento e a rolagem. É importante destacar que essas duas classes de atrito não acontecem de maneira exclusiva, ou seja, mesmo em uma situação que aparenta ser de pura rolagem, quase sempre é envolvido o deslizamento.

Para evidenciar o importante papel do atrito em situações cotidianas, Blau (1992), aponta que sem o atrito não poderíamos nos mover sobre objetos, segurá-los e completar tarefas diárias comuns. Além disso, o atrito é de essencial ajuda para iniciar o movimento de um corpo e, conseqüentemente, ajudar a pará-lo.

Figura 2 – A força F necessária para causar movimento de rolagem ou deslizamento de um corpo com força normal W .



Fonte: Hutchings, 1992.

Ao observar a [Figura 2](#), é importante ressaltar que a força de atrito é uma força tangencial que se opõe ao movimento dos corpos. Desta maneira, conclui-se que, para um corpo em repouso, o atrito pode ser enunciado como uma força resistiva de magnitude igual a " F ", porém atuando no sentido contrário ($-F$). (HUTCHINGS, 1992)

Ainda segundo Hutchings (1992), as leis do atrito podem ser compreendidas como:

1. A magnitude da força de atrito é proporcional a carga normal;
2. A força de atrito é independente da área de contato entre os corpos;
3. A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento;

A primeira lei, de acordo com Hutchings (1992), também pode ser expressa através da Equação 2.1:

$$F_{at} = \mu * W \quad (2.1)$$

Onde:

- F, é a força de atrito
- μ , é o coeficiente de atrito;
- W, é a força normal;

A primeira lei do atrito é geralmente válida para diversos materiais em condições de lubrificação ou de deslizamento não lubrificado. No entanto, há casos em que essa lei não é obedecida, especialmente em algumas situações de deslizamento não lubrificado e quando materiais poliméricos estão envolvidos. Nessas circunstâncias específicas, os mecanismos de atrito e desgaste podem se comportar de maneira diferente, desafiando a aplicabilidade direta da primeira lei. (HUTCHINGS, 1992)

Assim como a primeira lei, observou-se que a segunda também não se aplica de forma geral a materiais poliméricos. Além disso, observações revelaram que, ao estabelecer a terceira lei, o coeficiente de atrito estático (μ_e) tende a ser maior que o coeficiente de atrito dinâmico (μ_d). Sendo assim, é exigido um esforço maior para retirar o corpo do repouso do que para mantê-lo em movimento constante. (HUTCHINGS, 1992)

Segundo Lemos, o atrito em superfícies secas segue as leis da mecânica clássica. Em uma perspectiva microscópica, as forças interatômicas atuam nos pontos de contato entre as superfícies, sendo a quantidade de pontos diretamente proporcional à força normal entre as superfícies. O autor também esclarece que durante o movimento relativo entre corpos, pode acontecer a adesão, esses pontos de adesão podem ser rompidos gerando vibrações, calor e até mesmo ondas sonoras. (LEMOS, 2018)

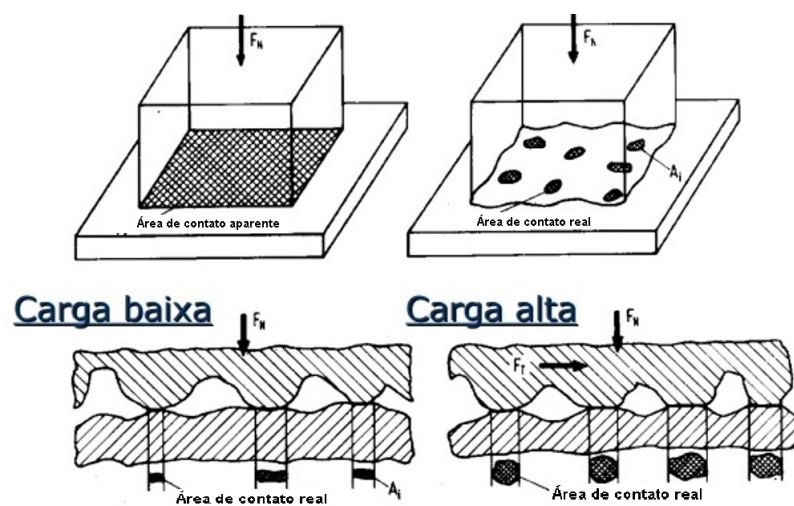
Ao citar os livros de Ludema (1988 e 1996), Maru (2003) destaca que os avanços tecnológicos permitiram a compreensão que o coeficiente de atrito é influenciado por uma série de fatores. Esses fatores não se restringem apenas a uma propriedade intrínseca do material ou de uma combinação entre eles, mas também englobam variáveis operacionais, como umidade, temperatura, velocidade, e a presença de lubrificação. (LUDEMA, 1988) (LUDEMA, 1996) (MARU, 2003)

2.2.1.1 Contato entre superfícies

Conforme Hutchings (1992), quando duas superfícies são delicadamente aproximadas até o ponto de se tocarem, o contato se inicia, porém em apenas alguns pontos.

Ao aumentar a magnitude da carga normal entre as superfícies, elas se aproximam e um maior número de picos ou asperezas se tocam, resultando em um aumento da quantidade de pontos de contato. Essa observação ajuda a compreender e reforçar a primeira lei do atrito.

Figura 3 – Efeito do aumento da carga normal na área de contato das superfícies (contato entre asperezas).



Fonte: Tschiptschin, 2005 - Adaptado. (Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin, 2006)

Considerando que as asperezas são os pontos de contato entre as superfícies, elas desempenham um papel fundamental ao suportar a carga normal e gerar as forças de atrito entre elas. Portanto, compreender o comportamento das asperezas em diferentes condições é essencial para o estudo do atrito e do desgaste. (HUTCHINGS, 1992)

Além disso, Sampaio e Noronha destacam que a natureza do contato entre dois corpos é influenciada por diversas variáveis. Dentre elas, a rugosidade superficial, a variação de temperatura, as deformações elásticas e plásticas, bem como as propriedades mecânicas dos materiais, são exemplos de critérios que desempenham um papel significativo na determinação da natureza dessa interação. (SAMPAIO; NORONHA, 2009)

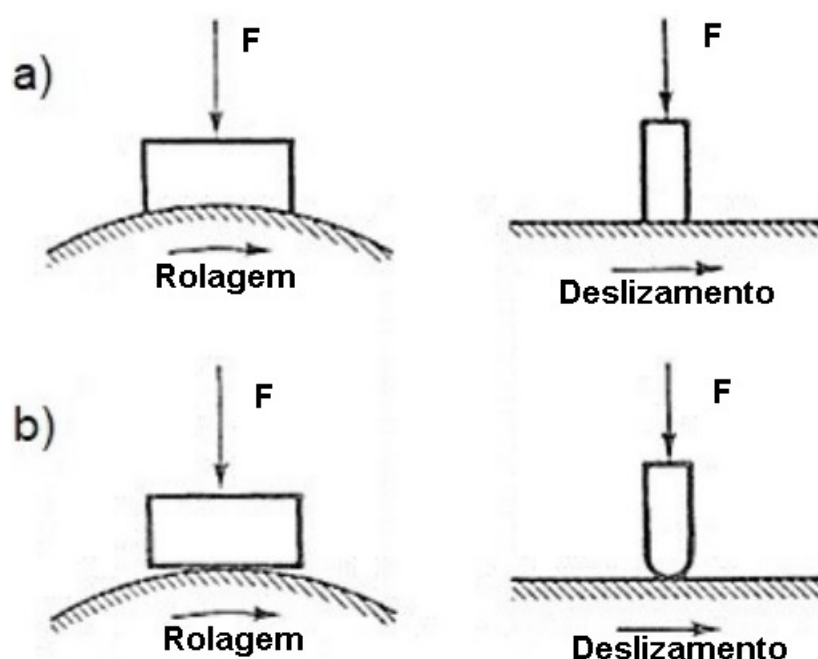
2.2.1.2 Contato conforme e não-conforme

A geometria do contato pode ser classificada em dois tipos: contato conforme e contato não-conforme, os quais afetam o atrito e o desgaste. O contato é classificado como conforme quando as superfícies de contato entre dois corpos se encontram ajustadas (sem carregamento concentrado). Uma característica importante do contato conforme é que o tamanho da área de contato não depende do carregamento. Isso significa que, ao final de um experimento de desgaste, a superfície de contato terá a mesma configuração inicial. Sendo assim, o histórico de carregamento não possui alteração relevante durante um ensaio. (SAMPAIO, 2009)

O contato é considerado não conforme quando ocorre em um ponto, como no contato entre duas esferas, ou ao longo de uma linha, como entre um disco e uma superfície plana. Nesse tipo de contato, a área de contato varia com a aplicação do carregamento em um experimento, tornando o histórico de carregamento importante. (SAMPAIO, 2009)

No contato conforme [Figura 4a](#), a pressão nominal de contato permanece constante durante o teste. Porém, no caso do contato não conforme [Figura 4b](#), a pressão nominal varia significativamente ao longo do teste devido às alterações na geometria do contato. (BALDO, 2019)

Figura 4 – Geometria do contato. a) contato conforme; b) contato não conforme;



Fonte: Baldo, 2019.

2.3 Lubrificantes

De acordo com Budynas e Nisbett (2011), o objetivo fundamental da lubrificação é minimizar o atrito, o desgaste e o aquecimento de partes móveis em máquinas. Nesse contexto, um lubrificante é definido como qualquer substância que pode ser aplicada entre superfícies em movimento, com a finalidade de alcançar esses propósitos. A presença de um lubrificante adequado forma uma película que reduz o atrito entre as superfícies em contato. Isso evita o desgaste precoce, o superaquecimento e promove o funcionamento eficiente e a longevidade dos componentes mecânicos.

Embora não haja restrições quanto ao tipo de material necessário para formar uma película lubrificante (gás, sólido ou líquido), existem limitações físicas e químicas que afetam a eficácia do filme e as condições ideais de uso. Por exemplo, lubrificantes gasosos

são adequados para baixo estresse de contato e situações onde lubrificantes líquidos não podem ser aplicados, já as películas sólidas são usadas em contatos de baixa velocidade e/ou altas temperaturas. (STACHOWIAK, 2005)

O processo de lubrificação pode variar de acordo com diversos fatores, como a geometria dos corpos em contato, a rugosidade e textura das superfícies, a composição dos materiais, a pressão e temperatura, a velocidade de deslizamento e rolagem, as propriedades químicas e físicas do lubrificante, as condições ambientais e a pré-carga no contato. (BLAU, 1992)

A lubrificação em contatos do tipo conforme, são geralmente em mancais e rolamentos. Em mancais, por exemplo, as superfícies geralmente são separadas por uma película de óleo ou gás mais espessa, causada pela velocidade relativa entre as superfícies ou por um lubrificante pressurizado externamente. As principais propriedades dos lubrificantes para contatos conformes, incluem a viscosidade e o coeficiente de viscosidade em função da temperatura. (BLAU, 1992)

A lubrificação em contatos não-conformes ocorre em uma área pequena e concentrada. O filme lubrificante é muito fino, da mesma ordem de grandeza da rugosidade da superfície, e a pressão do lubrificante é alta. A deformação elástica da superfície afeta significativamente o desempenho dos lubrificantes. As propriedades mais importantes dos lubrificantes nesses casos são os coeficientes de viscosidade relacionados à pressão e temperatura. (BLAU, 1992)

2.3.1 Lubrificantes líquidos

O principal objetivo de lubrificantes líquidos é controlar o atrito, o desgaste e o dano na superfície durante a vida útil de um componente. Suas funções complementares são: prevenir a corrosão, dissipar calor, capturar impurezas e detritos resultantes do desgaste, e também têm a capacidade de transferir força ou energia. (BLAU, 1992)

Blau (1992) destacou a importância de compreender algumas propriedades notáveis dos lubrificantes líquidos. A seguir, são apresentadas algumas dessas propriedades:

- Viscosidade: medida de resistência do fluido ao fluxo. Possui grande influência na formação do filme lubrificante entre superfícies;
- Expansão térmica: mudança na viscosidade de acordo com a alteração de temperatura;
- Estabilidade térmica: capacidade de resistir à degradação térmica em altas temperaturas;

- Relação viscosidade-temperatura: relação da variação da viscosidade de acordo com a temperatura;
- Relação viscosidade-pressão: relação da variação da viscosidade de acordo com a pressão aplicada ao lubrificante;
- Volatilidade: tendência do fluido a evaporar;
- Detergência: capacidade do lubrificante de envolver impurezas ou detritos não solúveis;
- Estabilidade oxidativa: grau de resistência ao oxigênio, conferindo maior vida útil ao lubrificante;

2.3.2 Aditivos para lubrificantes

De acordo com Neto (2005), os óleos lubrificantes são frequentemente aprimorados com aditivos para melhor se adequarem às condições de trabalho. Esses aditivos são utilizados com o objetivo de modificar as propriedades físicas do óleo base. Alguns exemplos comuns de aditivos incluem: modificadores de viscosidade, demulsificantes, detergentes, dispersantes, antioxidantes e agentes anti-corrosivos. Esses aditivos desempenham um papel essencial ao contribuir com o desempenho, a proteção e a durabilidade de peças e componentes lubrificadas.

Os óleos lubrificantes podem ser aprimorados com a adição de nanopartículas, resultando nos chamados nano-lubrificantes. A incorporação de nanopartículas de metais, óxidos, biopolímeros e outros materiais pode potencializar as propriedades lubrificantes do óleo, como a redução do coeficiente de atrito. (BERNARDI, 2011)

2.3.2.1 Condicionador de metais NANO Automotivo®

Condicionador de metais é um composto empregado para minimizar o atrito e o desgaste em sistemas mecânicos compostos por peças metálicas. Sua ação envolve a criação de uma barreira protetora antiatrito por meio da adsorção na superfície metálica, proporcionando proteção, redução do atrito e desgaste. Em determinados casos, também pode contribuir para a diminuição da fadiga em metais. (OLIVEIRA, 2015)

Sendo assim, aditivo NANO Automotivo® é um condicionador sintético de metais projetado para melhorar o desempenho e a durabilidade dos componentes automotivos. O condicionador NANO® foi desenvolvido com dois tipos de nanopartículas, a sua composição e funcionamento proporcionam uma barreira anti-atrito que ajuda a proteger as superfícies metálicas de um desgaste prematuro, da corrosão e outros danos causados pelo atrito constante. (Tribolub, 2020)

Quando submetido a situações com temperatura e pressões elevadas, típicas das áreas de atrito, esse aditivo utiliza o lubrificante como veículo, migrando para as superfícies metálicas envolvidas. Desta maneira, ele utiliza do lubrificante como meio para chegar às superfícies metálicas. (Tribolub, 2020)

Essa movimentação cria uma barreira anti-atrito altamente resistente nas superfícies. Ao chegar nesses locais de interesse, o NANO® sai completamente do óleo lubrificante e adere às paredes dos objetos envolvidos. Esse processo tem como efeito tornar a superfície metálica mais rígida e, portanto, mais resistente ao desgaste, devido a redução do atrito e arrasto parasítico entre os metais. (Tribolub, 2020)

Além disso, de acordo com Tribolub (2020), as partidas a frio em motores são responsáveis por 80% do desgaste total, devido ao contato metal-metal temporário na ausência de lubrificação. No entanto, com a adesão das nanopartículas do aditivo NANO® nas paredes dos motores, as superfícies recebem uma proteção extra, evitando esse desgaste significativo.

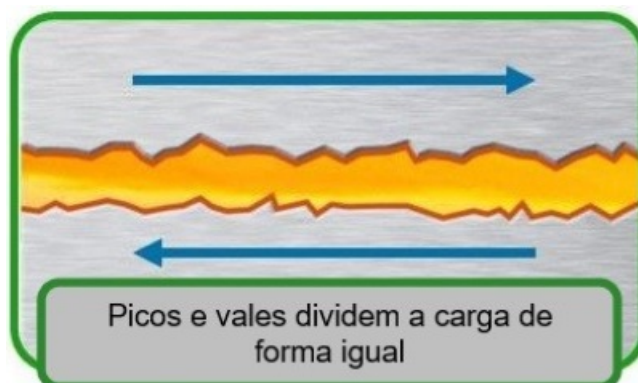
2.3.3 Regimes de lubrificação

Para a compreensão deste estudo, é importante entender 3 dos regimes de lubrificação existentes, sendo dois deles de película grossa - hidrodinâmico e elastohidrodinâmico - e um de película fina - limítrofe. (BUDYNAS; NISBETT, 2011)

2.3.3.1 Lubrificação hidrodinâmica (LH)

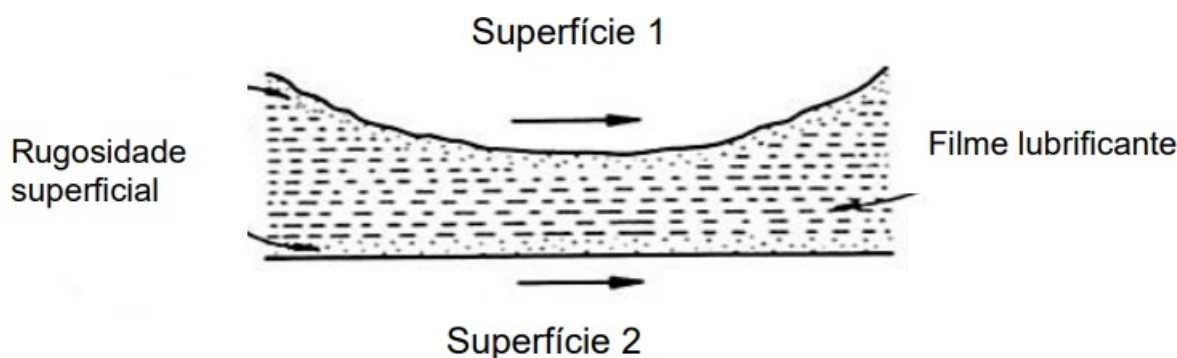
Esse fenômeno ocorre quando as superfícies, que se movimentam entre si, estão completamente separadas por um filme lubrificante (Figura 5 e Figura 6), ou seja, o fluido suporta o carregamento normal entre as superfícies. Portanto, é essencial que o contato entre as superfícies seja conforme, uma vez que a formação dessa camada de lubrificante é possível devido à convergência entre a forma e ângulos das superfícies. (HUTCHINGS, 1992)

Figura 5 – Representação de uma lubrificação hidrodinâmica - picos e vales dividindo igualmente o carregamento.



Fonte: Noria, 2017 - Adaptado. (Noria, 2017)

Figura 6 – Representação detalhada de uma lubrificação hidrodinâmica.



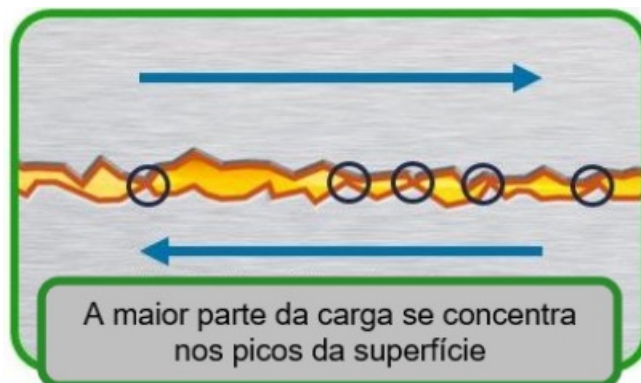
Fonte: Guimarães, 2022.

2.3.3.2 Lubrificação elastohidrodinâmica (LEH)

Segundo Hutchings (1992), a lubrificação elastohidrodinâmica, também conhecida como lubrificação mista, ocorre quando o contato entre as superfícies em movimento é do tipo não-conforme. Isso cria pontos de contato localizados ou em linha entre as superfícies, interações entre as asperezas, resultando em um aumento de pressão na área. A pressão elevada faz com que os pontos de contato se deformem elasticamente e provoca alterações na viscosidade do óleo.

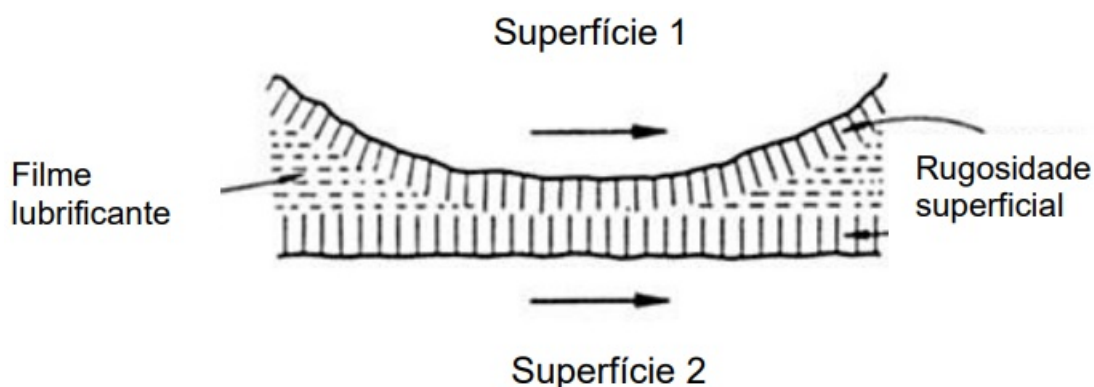
A lubrificação entre as superfícies também é influenciada pelo módulo de elasticidade dos materiais envolvidos. Quando ocorre uma deformação elástica, a área de contato aumenta, distribuindo a pressão exercida no local. Em materiais com módulos de elasticidade altos, essa lubrificação ocorre em uma escala micrométrica. (HUTCHINGS, 1992)

Figura 7 – Representação de uma lubrificação elastohidrodinâmica - a maior parte da carga se concentra nos picos das superfícies (asperezas).



Fonte: Noria, 2017 - Adaptado.

Figura 8 – Representação detalhada de uma lubrificação elastohidrodinâmica.



Fonte: Guimarães, 2022.

2.3.3.3 Lubrificação Limítrofe

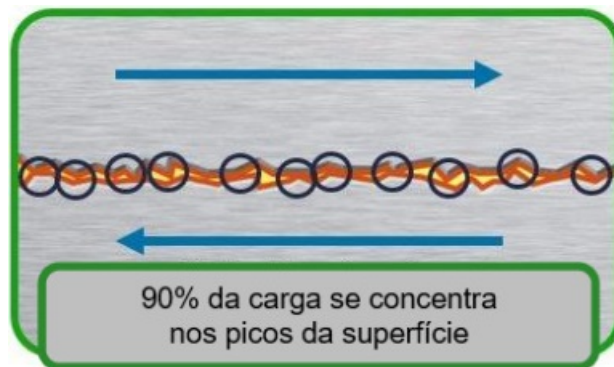
Caso as superfícies estejam sob ação de pressões de contato elevadas, ou com baixas velocidades de deslizamento, as forças hidrodinâmicas não são suficientes para criar uma película de lubrificante típica da LEH durante o deslizamento das superfícies. Isso resulta em um contato direto entre as asperezas das interfaces, levando a altos níveis de atrito e desgaste. (HUTCHINGS, 1992)

Ainda de acordo com Hutchings (1992), é possível realizar a proteção destas superfícies com aditivos desenvolvidos especialmente para a lubrificação limítrofe. Esses aditivos formam uma barreira nas interfaces das áreas de interesse dos objetos, protegendo-as do contato direto das asperezas.

Nesse tipo de regime de lubrificação, as moléculas de lubrificante são adsorvidas nas superfícies, o que resulta em uma reação química entre as moléculas de lubrificante e as superfícies. Dessa forma, a carga entre os corpos é suportada pelo lubrificante adsorvido,

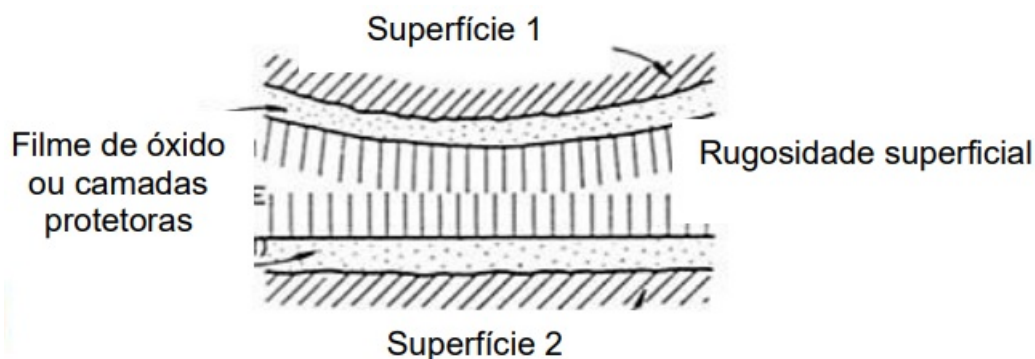
em vez do material não lubrificado. (HUTCHINGS, 1992)

Figura 9 – Representação de uma lubrificação limítrofe - 90% da carga se concentra em picos das superfícies.



Fonte: Noria, 2017 - Adaptado.

Figura 10 – Representação detalhada de uma lubrificação limítrofe.



Fonte: Guimarães, 2022.

2.4 Desgaste

De acordo com Bayer (2004), o desgaste, no contexto da engenharia, é o processo pelo qual ocorre o dano gradual em uma superfície causado pelo movimento relativo em relação à outra. Esse processo resulta na perda de material e/ou danos à estrutura das superfícies, causados pela interação entre elas.

Ainda segundo Bayer (2004), existem três maneiras de se identificar e analisar superfícies desgastadas e são elas:

- A trilha de desgaste: relacionado à comparação de uma situação de desgaste a outra superfície em seu estado de interesse, podendo variar de superfícies polidas até as já desgastadas;

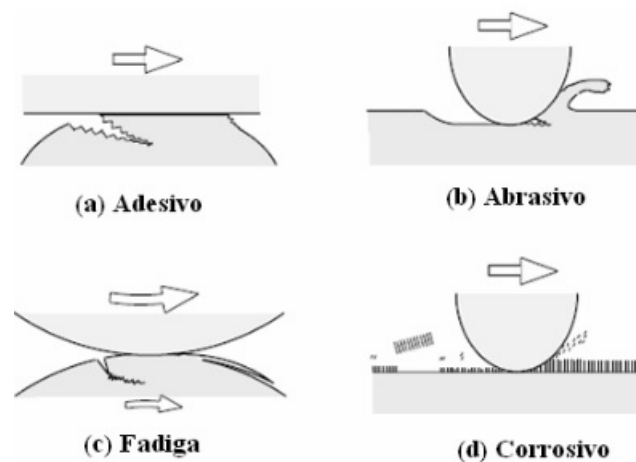
- Mecanismos físicos de remoção do material: classificação do desgaste de acordo com o mecanismo de remoção do material. Remetendo a termos como: adesão, abrasão, corrosão e fadiga;
- Condições que envolvem a situação de desgaste: identifica conforme as condições macroscópicas do desgaste, como por exemplo: desgaste a seco, lubrificado, por deslizamento, por rolagem e com gradiente de temperatura;

2.4.1 Mecanismos de desgaste por deslizamento

Embora existam diversas formas de desgaste, para interesse deste trabalho será tratado especificamente o desgaste por deslizamento. O desgaste por deslizamento ocorre quando as asperezas de duas superfícies interagem entre si. Esse tipo de desgaste é mais comum quando não há lubrificação adequada entre as superfícies ou quando a lubrificação é insuficiente, permitindo o contato direto das asperidades. ([Laboratório de Atrito e Desgaste - LTAD, 2023](#))

Desta maneira, é fundamental compreender os diferentes mecanismos de classificação desse tipo de desgaste. São exemplos: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste corrosivo e desgaste por fadiga. Cada um desses mecanismos apresenta características distintas e influencia o desgaste de maneiras específicas. ([BAYER, 2004](#))

Figura 11 – Mecanismos de desgaste por deslizamento.



Fonte: Radi et al., 2007. ([RADI et al., 2007](#))

- Desgaste por adesão: ocorre quando o movimento e a carga entre dois corpos resultam na transferência de material de uma superfície para outra. Isso acontece devido à soldagem entre as superfícies, o que impede o deslizamento e faz com que partículas de uma superfície fiquem temporária ou permanentemente aderidas à outra; ([ASM, 2001](#))

- Desgaste por abrasão: é provocado por partículas ou protuberâncias duras presente entre as superfícies em deslizamento. De maneira geral, um material sofre desgaste significativo ou arranhões quando é menos duro do que o material que o está desgastando. Esse tipo de desgaste é influenciado por diversos fatores, como as características da superfície, a presença de abrasivos, a velocidade do contato, a pressão exercida, entre outros; (HUTCHINGS, 1992)
- Desgaste por fadiga: ocorre quando partículas são removidas de uma superfície por fadiga, ou seja, variações cíclicas de esforços. Esses esforços causam o surgimento e a propagação de trincas no material. No contexto do desgaste, essas trincas ocorrem na superfície ou logo abaixo dela, resultando em fratura e desprendimento de partículas; (KAJDAS, 1990)
- Desgaste por corrosão: ocorre quando um dos corpos de contato sofre ataque químico, podendo ser causado pela própria composição do próprio lubrificante, pela presença de um corrosivo ou pela presença de oxigênio (desgaste oxidativo). No caso do lubrificante, embora isso possa fornecer alguma lubrificação, o desgaste significativo é praticamente inevitável; (STACHOWIAK, 2005)

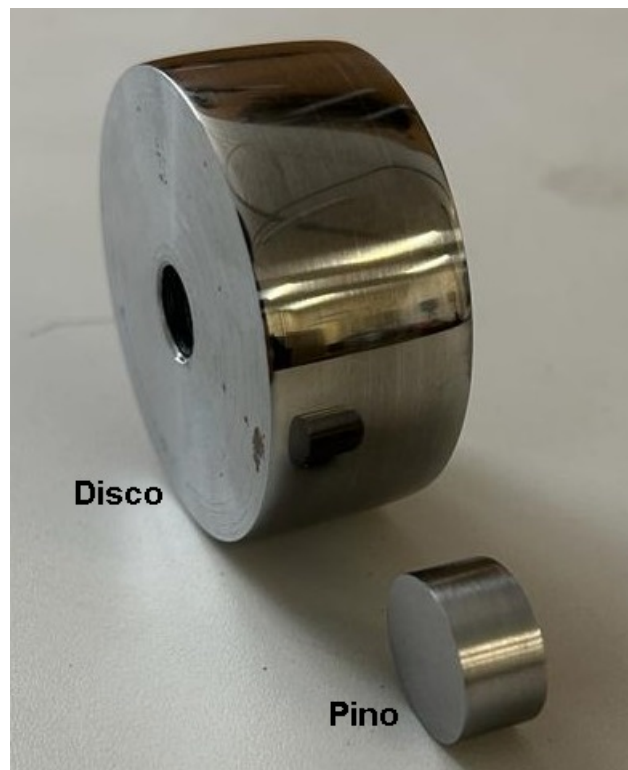
3 Metodologia

3.1 Materiais

3.1.1 Corpos de prova

Para a realização dos ensaios, primeiramente foram preparados os corpos de prova, que consistiram em discos e pinos de aço SAE 1045, com dimensões de aproximadamente 10 mm de espessura e 19mm (ou $\frac{3}{4}$ ") de diâmetro para os pinos e 25mm de espessura e 63mm de diâmetro para os discos.

Figura 12 – Corpos de prova utilizados no ensaio: disco (na esquerda e maior) e pino (na direita e menor).



Fonte: Autor, 2023.

Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova passaram por um processo de preparação, para que fosse estabelecida uma condição superficial padrão. Esse processo envolveu o lixamento das superfícies dos corpos de prova, utilizando lixas com diferentes granulometrias, conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação de lixas utilizadas para o lixamento dos pinos e discos.

Lixa (granulometria)	Pinos	Discos
80	X	X
100	X	X
220	X	X
340	X	X
400	X	X
600	X	X
800		X
1000		X
1200		X
1500		X
2000		X
2500		X
Polimento com massa de polir nº 1		X

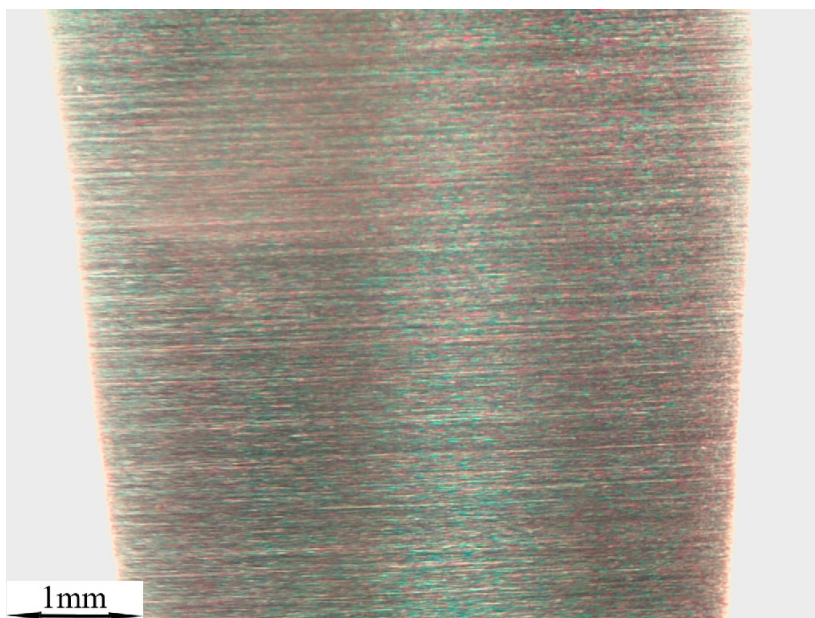
Fonte: Autor, 2023.

Os pinos foram lixados até a granulometria 600 para garantir a uniformidade da superfície. Em seguida, utilizou-se uma lixa de grana 400 para obter o acabamento superficial padrão nos pinos.

No caso dos discos, foi realizado o lixamento até a lixa de grana 2500. Para finalizar, foi feito o polimento utilizando uma massa de polir nº 1 nos discos, visando alcançar o acabamento padrão na superfície.

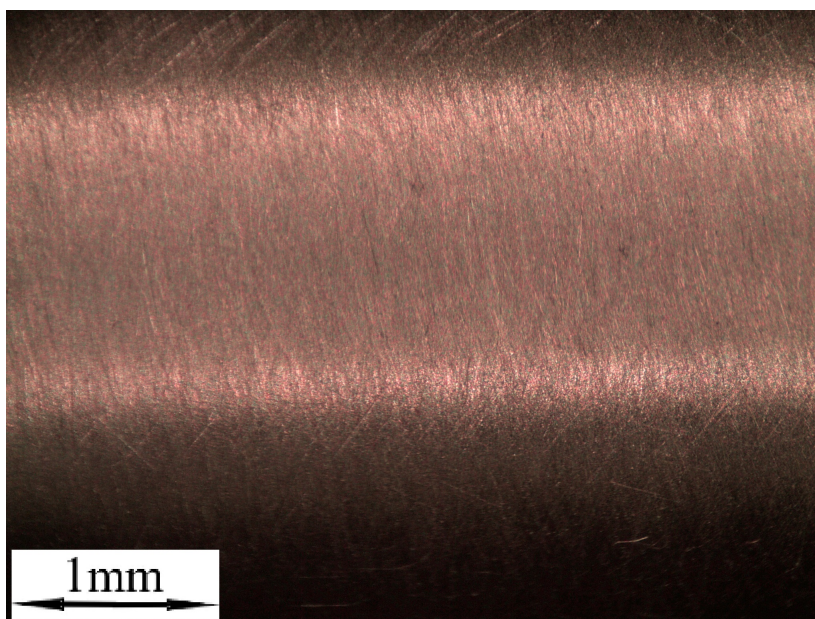
O acabamento superficial dos corpos de prova seguiu o padrão de lixamento, que foi o mesmo utilizado em trabalhos anteriores no Laboratório de Tribologia, facilitando uma futura comparação entre os estudos. Especialmente, no caso dos pinos, o uso de lixa 400 resultou numa superfície que favorece o processo de lubrificação, conceito amplamente utilizado em aplicações envolvendo superfícies fabricadas por brunimento. (MOOS; BAHRE, 2012)

Figura 13 – Superfície do disco após o acabamento superficial.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 14 – Superfície do pino após o acabamento superficial.



Fonte: Autor, 2023.

3.1.2 Lubrificantes

Levando em consideração que este trabalho seguiu uma linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida no Laboratório de Tribologia da Faculdade do Gama (FGA - UnB), a escolha do lubrificante seguiu as seleções feitas em estudos anteriores, como os realizados por Pacheco (2021) e Guimarães (2022), em conjunto com a preferência por duas soluções: uma contendo apenas o lubrificante base e outra com a adição de um aditivo condicionador de metais, que está amplamente disponível no mercado. (GUIMARÃES, 2022) (PACHECO, 2021)

Estes produtos são:

- Óleo sintético Lubrax Valora 5W40 - API SN da marca Petrobrás - [Figura 15](#);
- Condicionador de metais Nano Automotivo® - [Figura 16](#);

Figura 15 – Óleo 5W40.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 16 – Aditivo condicionador de metais Nano®.



Fonte: Autor, 2023.

3.2 Métodos

Anteriormente à descrição dos métodos utilizados, é essencial ressaltar que os ensaios de desgaste deslizante, utilizando a configuração pino sobre disco, foram conduzidos de acordo com as diretrizes estipuladas na norma ASTM G99.

3.2.1 Equipamentos

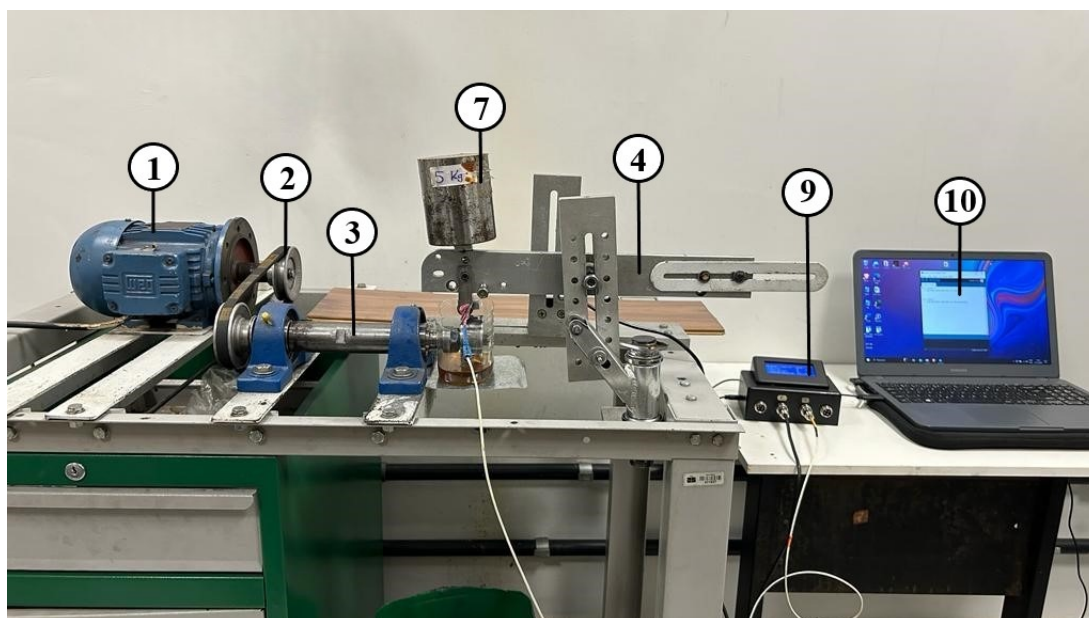
Para a realização dos ensaios de pino sobre disco, foram utilizados os equipamentos disponíveis no laboratório de Tribologia da Universidade de Brasília, na Faculdade do Gama (FGA-UnB). Dentre os equipamentos utilizados estão a bancada de ensaios de desgaste, também conhecida como tribômetro, e o microscópio óptico acoplado a uma câmera (ToupCam).

O projeto e a construção do tribômetro foi feito por Clemente e Cueva (2017) também no laboratório de tribologia. O tribômetro é composto por:

1. Motor de indução elétrico: marca WEG, potência de $\frac{1}{2}$ cv e velocidade de rotação de $1720RPM$.
2. Sistema de polias: para transmitir o movimento rotativo do motor ao eixo de transmissão por meio de uma correia.
3. Eixo de transmissão: recebe a rotação da polia movida e transmite ao disco (corpo de prova).
4. Suporte de fixação do pino e da carga normal.
5. Célula de carga ($5kg$): para medir a força de atrito entre os corpos de prova.
6. Sensor de temperatura (termopar de isolamento mineral tipo “k”): para adquirir os valores de temperatura nos pinos durante o período de ensaio.
7. Peso morto: utilizado como carga normal nos ensaios.
8. Reservatório com lubrificante: depósito de lubrificante para garantir uma lubrificação eficiente.
9. Arduino: para coletar os dados fornecidos pelos sensores (de temperatura e célula de carga) e transmiti-los ao computador.
10. Computador: para receber os dados coletados pelo Arduino e fazer análises posteriores.

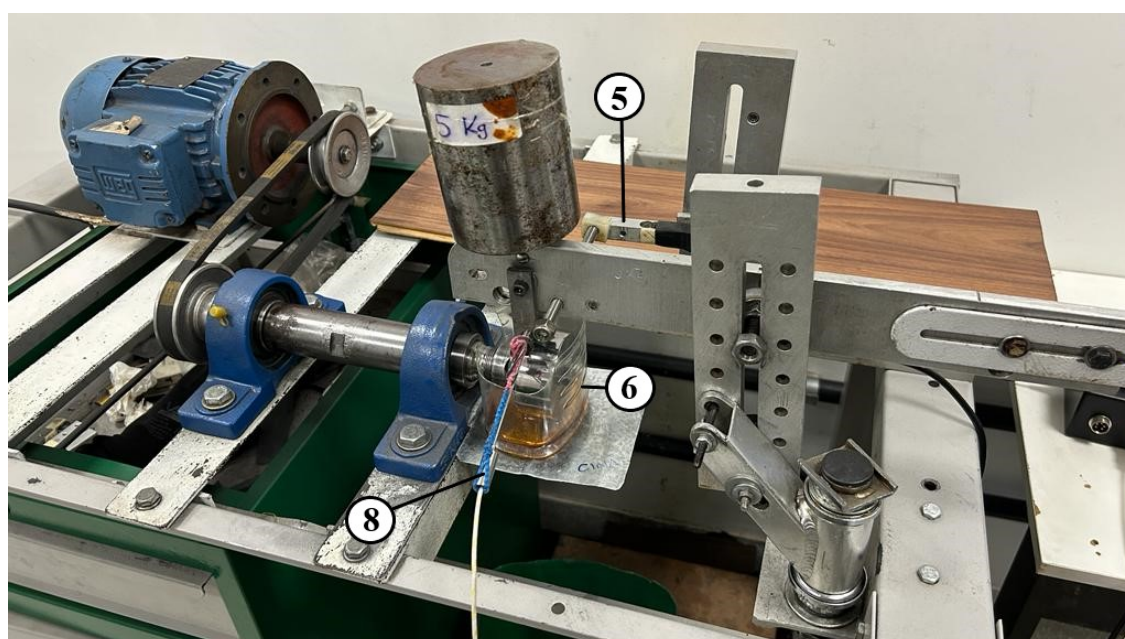
A bancada está equipada com sensores capazes de coletar informações em tempo real, incluindo temperatura e força de atrito. É possível observar fotos da bancada e de seus componentes listados acima na [Figura 17](#) e na [Figura 18](#).

Figura 17 – Bancada de testes com tribômetro e seus componentes complementares - vista frontal.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 18 – Bancada de testes com tribômetro e seus componentes complementares - vista isométrica.



Fonte: Autor, 2023.

3.2.2 Configurações das variáveis de ensaio

3.2.2.1 Velocidade

No tribômetro foram empregados dois conjuntos distintos de polias, cada um proporcionando uma velocidade final diferente na extremidade do eixo. No primeiro conjunto, a velocidade não passa por nenhuma redução, pois utiliza-se uma relação 1:1 entre as polias, isso mantém a rotação final em $1720RPM$ e uma velocidade tangencial no disco de $5,67 m/s$. No segundo conjunto, ocorre uma redução na velocidade, devido à relação entre a polia conectada ao motor (motora) e a polia ligada ao eixo (movida), que é de 1:5. Isso resulta em uma rotação final de $344RPM$ e uma velocidade tangencial no disco de $1,13m/s$, ou seja, um quinto da velocidade anterior.

No decorrer do trabalho, a velocidade tangencial de $5,67m/s$ será indicada como 5V e a velocidade de $1,13m/s$, como 1V.

3.2.2.2 Lubrificação

Nos testes foram empregados dois produtos para criar duas soluções distintas, sendo estes: o óleo lubrificante 5W40 e o aditivo condicionador de metais Nano Automotivo®. Para a preparação da solução utilizada nos ensaios, óleo e aditivo, foi seguida a recomendação do fabricante, que sugere a utilização de $30ml$ do Nano Automotivo® para cada litro de óleo, ou seja, uma concentração de 3%. (Tribolub, 2020)

Em função das características do tribômetro disponível e para manter a concentração de 3% sugerida pelo fabricante do aditivo, utilizou-se $50 ml$ de óleo lubrificante 5W40 e $1,5 ml$ do condicionador de metais Nano Automotivo®.

Na [Figura 19](#) exhibe-se o recipiente com o volume da mistura lubrificante e aditivo utilizados nos ensaios.

Figura 19 – Lubrificação correta do conjunto.



Fonte: Autor, 2023.

3.2.2.3 Carga

Os experimentos foram conduzidos com duas cargas normais diferentes ($2,5\text{kg}$ e $5,0\text{kg}$), permitindo a aplicação de forças normais de 25N e 50N , respectivamente.

A utilização de duas cargas distintas possibilita a análise e comparação dos resultados de desgaste, inclusive com outros trabalhos anteriormente realizados, permitindo a observação da influência da carga nos ensaios.

3.2.2.4 Proposta do ensaio

Foram conduzidos ensaios com duas propostas distintas, porém seus resultados finais são complementares.

3.2.2.4.1 Ensaios principais

Dois tipos de ensaios principais foram conduzidos: um com uma duração de 4min e outro com uma duração de 20min . Os dados coletados possibilitaram fazer análises e comparações dos resultados obtidos em diferentes condições.

É importante ressaltar que os ensaios de 4 minutos foram executados exclusivamente a uma velocidade tangencial 5V . Essa escolha se deve ao fato de que, conforme observado na Tabela 4, esses ensaios percorrem, ao final do ensaio, a mesma distância

Tabela 4 – Demonstrativo de distância linear percorrida em diferentes configurações de ensaio.

Velocidade tangencial	Tempo de ensaio	Distância linear percorrida
1V	4min.	272m
1V	20min.	1360m
5V	4min.	1360m
5V	20min.	6804m

Fonte: Autor, 2023.

linear (1360,8m) que os ensaios de 20 minutos, realizados a uma velocidade tangencial 1V.

Abaixo, encontram-se as configurações de todos os ensaios principais realizados no estudo:

1. Velocidade 5V - 20 minutos - Óleo 5W40 - 25N
2. Velocidade 5V - 20 minutos - Óleo 5W40 - 50N
3. Velocidade 5V - 20 minutos - Óleo 5W40 + Nano® - 25N
4. Velocidade 5V - 20 minutos - Óleo 5W40 + Nano® - 50N
5. Velocidade 1V - 20 minutos - Óleo 5W40 - 25N
6. Velocidade 1V - 20 minutos - Óleo 5W40 - 50N
7. Velocidade 1V - 20 minutos - Óleo 5W40 + Nano® - 25N
8. Velocidade 1V - 20 minutos - Óleo 5W40 + Nano® - 50N
9. Velocidade 5V - 4 minutos - Óleo 5W40 - 25N
10. Velocidade 5V - 4 minutos - Óleo 5W40 - 50N
11. Velocidade 5V - 4 minutos - Óleo 5W40 + Nano® - 25N
12. Velocidade 5V - 4 minutos - Óleo 5W40 + Nano® - 50N

Para os ensaios de 20 minutos de duração, em cada configuração, incluindo variações de velocidade, lubrificação e carga, foram realizados três ensaios, sendo uma duplicata, para avaliar as condições de desgaste e obter os parâmetros de interesse e, adicionalmente, foi realizado um ensaio para medir as condições de temperatura durante o experimento. No total, foram realizados 24 ensaios de 20 minutos.

Para os ensaios de 4 minutos, não houve necessidade de conduzir ensaios separados para medir a temperatura, pois os dados poderiam ser reaproveitados dos mesmos ensaios de 20 minutos, mas com uma duração mais curta. Portanto, ao final do estudo, totalizaram-se 32 ensaios principais.

3.2.2.4.2 Ensaios para determinação de perda de massa

Com o intuito de fazer uma análise mais detalhada da perda de massa em função do tempo de ensaio, foram realizados ensaios com intervalos menores de 1, 2,5, 5 e 10 minutos.

A construção da curva de perda de massa permite, por exemplo, identificar momentos em que a taxa de desgaste é mais elevada, evidenciada por perdas de massa mais significativas. Adicionalmente, ao representar graficamente os dados coletados, torna-se possível visualizar a tendência da curva ao longo do período de ensaio.

É importante ressaltar que, independentemente da duração do ensaio, eles foram conduzidos da mesma maneira, de acordo com a seção de procedimentos experimentais (??).

A seguir, estão listadas condições utilizadas para a obtenção das curvas de perda de massa em intervalos menores:

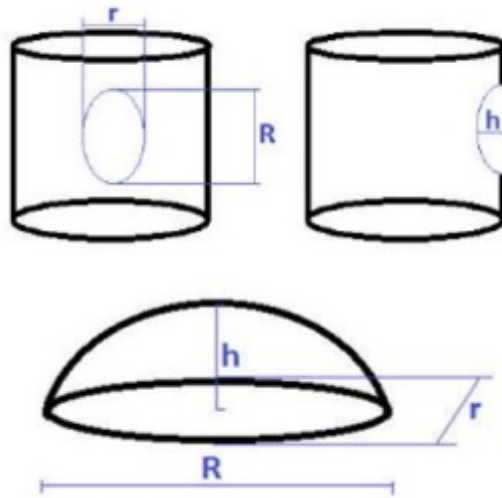
- Velocidade 5V - Óleo 5W40 - 25N
- Velocidade 5V - Óleo 5W40 - 50N
- Velocidade 5V - Óleo 5W40 + Nano® - 25N
- Velocidade 5V - Óleo 5W40 + Nano® - 50N

Como observado, os experimentos foram conduzidos exclusivamente a uma velocidade 5V. Isso ocorreu devido à complexidade em mensurar a perda de massa em ensaios curtos na velocidade 1V, devido às dimensões reduzidas das marcas de desgaste nas superfícies, que seriam menos expressivas ainda em ensaios mais curtos.

3.2.3 Cálculo do volume perdido

O volume perdido foi calculado levando em consideração que o formato da marca de desgaste possui uma forma geometricamente semelhante a uma calota elipsoidal, ou seja, uma parte de uma elipsóide. Essa suposição é demonstrada na [Figura 20](#), representando as medidas utilizadas para o cálculo, e então, a Equação 3.1 pôde ser utilizada para a determinação do volume perdido.

Figura 20 – Esquemático dos parâmetros para calcular o volume perdido.



Fonte: Pacheco, 2021.

$$V = \frac{r * R * h}{3} \quad (3.1)$$

Para a aplicação da Equação 3.1, é fundamental obter os valores das medidas indicadas na Figura 20. Para chegar nesses valores, inicialmente, é necessário medir as dimensões do pino utilizando um paquímetro. Posteriormente, a partir de uma foto capturada com o microscópio, pode-se utilizar a proporção das medidas originais do pino para calcular as dimensões da calota elipsoidal causada pelo desgaste. Além disso, para a determinação do "h" é necessário o valor do raio do disco, já que a penetração do disco no pino (h) é obtida a partir deste raio.

Essa abordagem permite uma avaliação precisa do desgaste nos pinos, entregando informações essenciais para a quantificação de material perdido durante o procedimento. Além disso, é importante ressaltar que para o cálculo da massa perdida, foi utilizado o valor de $7,87 \text{ g/cm}^3$ de densidade para o aço SAE 1045.

Ainda no que diz respeito ao volume perdido, a informação obtida permite avaliar a taxa de desgaste do ensaio. Essa taxa de desgaste pode ser apresentada de várias formas, mas no contexto em questão, é relevante expressá-la em unidades de volume ou massa por unidade de tempo ou distância percorrida.

3.2.4 Determinação da pressão de contato - Regime de lubrificação

A fim de determinar o regime de lubrificação presente e identificar o momento em que ocorre a transição entre os regimes durante o ensaio, foi necessário calcular a pressão de contato entre o disco e o pino. Através da análise da marca de desgaste deixada no

pino ao término do ensaio, é possível determinar a área de contato entre o disco e o pino, e assim encontrar a pressão de contato final utilizando a Equação 3.2.

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

Onde:

- P, é a pressão de contato entre o pino e o disco [Pa].
- F, é a força normal aplicada pela carga adotada no ensaio [N].
- A, é a área de contato entre os corpos de prova [m²].

Desta maneira, é possível identificar que a mudança do regime LEH para o LH ocorre quando a pressão de contato transita para valores abaixo de 50MPa. (HUTCHINGS, 1992)

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo, são apresentados os resultados e discussões dos ensaios conduzidos, abrangendo comparações relacionadas à velocidade, lubrificação, carregamento e distância linear percorrida. As seções foram organizadas para abordar os diversos fatores de influência, começando pela velocidade, seguida pela lubrificação, carga e, por último, a distância linear.

4.1 Ensaios determinação da perda de massa em velocidade 5V

Os experimentos conduzidos forneceram dados essenciais para a análise dos padrões de desgaste. Os principais pontos a serem abordados englobam as análises correspondentes ao desgaste, considerando massa, área e taxa de desgaste. Além disso, serão discutidas considerações sobre a pressão de contato e a transição de regimes de lubrificação.

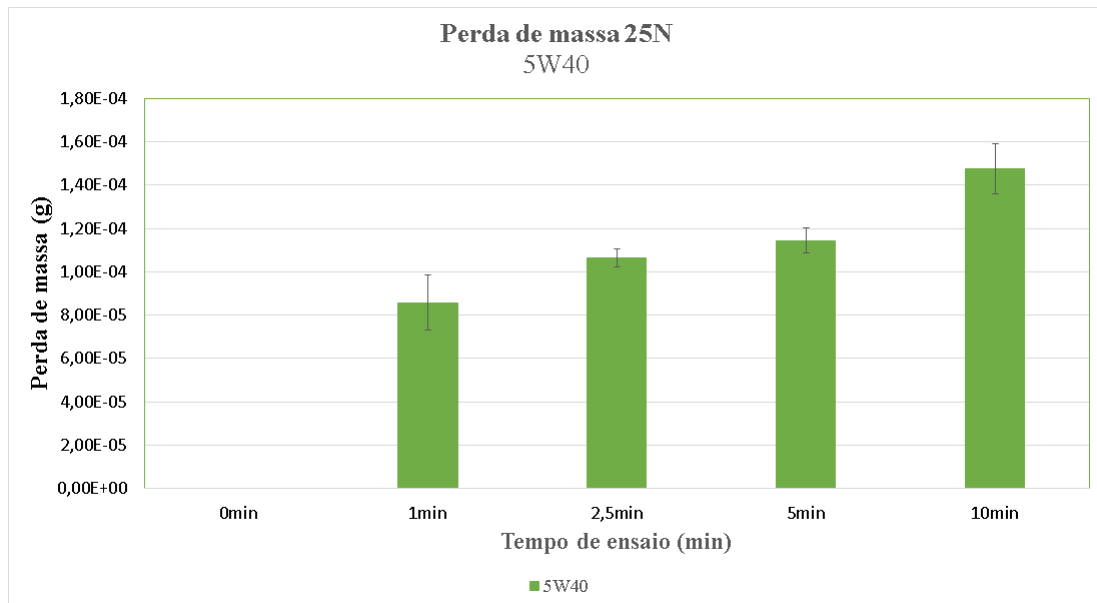
4.1.1 Ensaios lubrificados com óleo 5W40 com 25N de carga

4.1.1.1 Desgaste - Perda de massa

Com base nos dados experimentais, a Equação 3.1 foi utilizada para estimar o volume perdido, considerando a geometria da elipsoide. Em seguida, a conversão para a unidade de massa foi realizada utilizando a densidade do aço SAE 1045. Os resultados dessa conversão, expressos em gramas, estão apresentados na [Figura 21](#), proporcionando uma visualização gráfica das perdas de massa nos ensaios conduzidos.

Ao analisar os dados no gráfico, nota-se que no ensaio de 1 minuto, o desgaste já é significativo, representando uma parte substancial do desgaste total observado no ensaio de 10 minutos. Isso sugere uma não linearidade no desgaste ao longo do ensaio, indicando taxas de desgaste mais elevadas no início, principalmente na região de *running*, seguidas por uma redução ao longo do tempo. A linha de tendência no gráfico reforça essa inclinação.

Figura 21 – Gráfico referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações. Ensaio lubrificado com óleo 5W40 e com 25N de carregamento.



Fonte: Autor, 2023.

A intensidade inicial no desgaste pode ser atribuída à presença de fatores como:

- Transição de regime de lubrificação: O ensaio inicia com uma lubrificação do tipo elastohidrodinâmica e, posteriormente, se torna hidrodinâmica.
- Acomodação das superfícies não-conformes: Inicialmente, as superfícies apresentam contatos do tipo não-conforme, passando por um processo de acomodação ao longo do ensaio, tornando o contato conforme.
- Pressão de contato: No início do ensaio, devido ao contato não-conforme e a baixa área de contato, a carga concentrada em um ponto resulta em uma pressão de contato significativamente elevada.

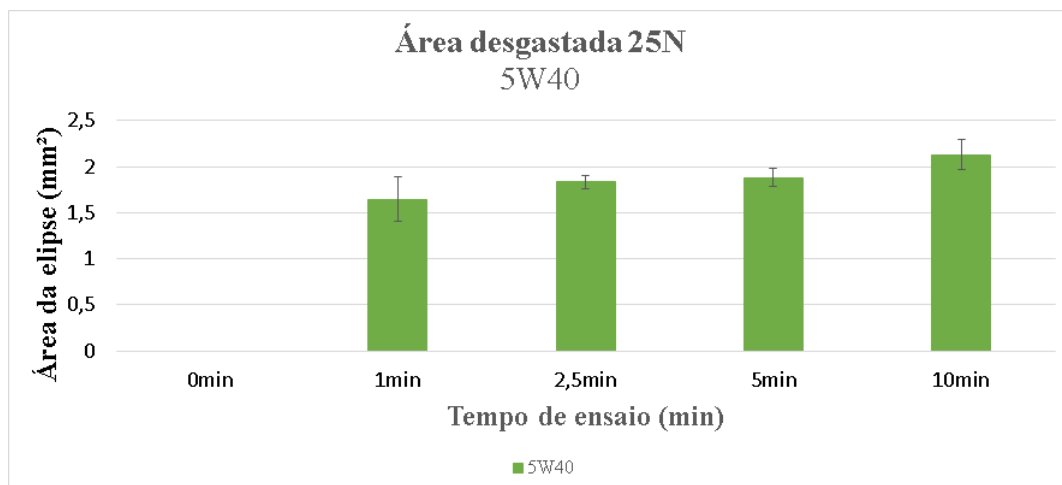
4.1.1.2 Desgaste - Área desgastada

Além da análise da perda de massa, é interessante examinar a área desgastada para calcular a pressão de contato, que está diretamente relacionada com a transição entre os regimes de lubrificação.

A determinação da pressão de contato do pino sobre o disco pode ser realizada utilizando a Equação 3.2. Assim, é possível calcular a pressão de contato com base na área desgastada final do ensaio. Para ensaios com uma carga de 25N, esse valor corresponde à força indicada na equação.

No gráfico na [Figura 22](#) são apresentadas as áreas desgastadas ao final dos ensaios para os cinco intervalos de tempo considerados.

Figura 22 – Gráfico referente à área desgastada em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 e com 25N de carregamento.



Fonte: Autor, 2023.

Ao calcular o momento em que a pressão de contato se torna inferior a 50 MPa, é possível identificar a transição entre os regimes de lubrificação, conforme discutido no tópico [subseção 3.2.4](#) e detalhado por Hutchings (1992). Dessa forma, torna-se interessante estimar o instante de transição do regime elastohidrodinâmico (LEH) para o hidrodinâmico (LH).

Ao calcular a área correspondente a uma pressão de 50 MPa, que marca a transição entre os regimes, e considerando a carga de 25N, obtém-se uma área de 0,5mm². Analisando o gráfico, pode-se afirmar que, no menor intervalo de ensaio de 1 minuto, a área já supera a necessária para a transição entre os regimes de lubrificação.

Embora a determinação exata do momento de transição exigisse uma discretização mais fina do ensaio, os gráficos de desgaste apresentados nas figuras ([Figura 22](#) e [Figura 21](#)) indicam que a transição tende a ocorrer antes do esperado, caso seja considerado um desgaste linear ao longo do ensaio, mas verifica-se que esse não é o caso. Esse comportamento pode ser atribuído à intensidade do desgaste nos primeiros momentos do ensaio.

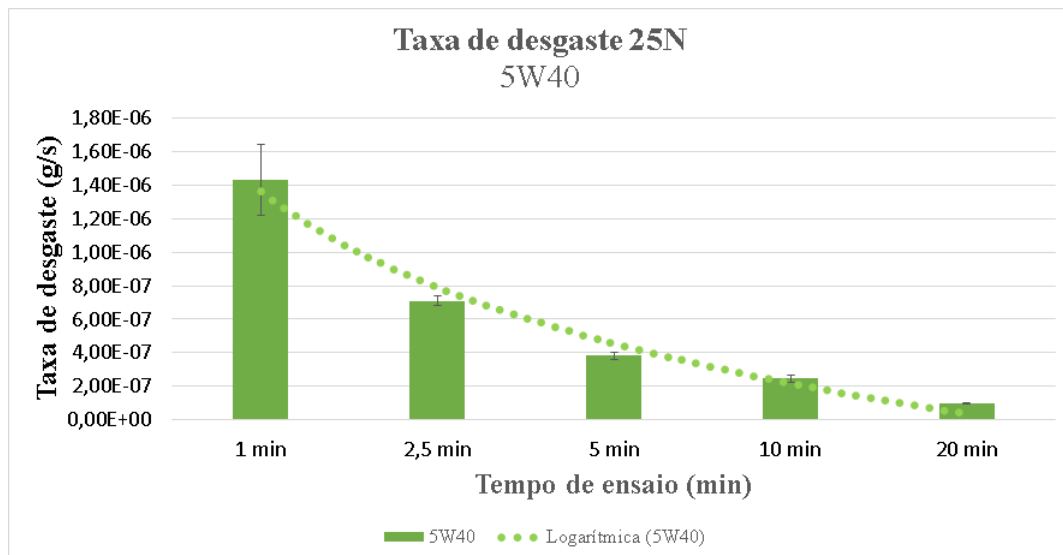
Contudo, para fins de comparação, considerando um desgaste linear até 1 minuto, a transição de um regime para outro ocorreria aproximadamente aos 18,25 segundos. No entanto, dada a compreensão de que o comportamento do desgaste não é linear, é possível afirmar que a transição para o regime de lubrificação hidrodinâmico ocorre antes desse tempo.

4.1.1.3 Taxa de desgaste

No gráfico da [Figura 23](#), que utiliza também os valores obtidos nos ensaios principais realizados com 20 minutos de duração, é representada a taxa de desgaste em cinco

ensaios com diferentes intervalos de tempo, observa-se uma tendência de declínio na curva, indicando que ao longo do ensaio, a taxa de desgaste diminui. Confirmando o afirmado nos tópicos acima, demonstrado pelo decaimento não-linear que se aproxima de uma curva com formato logarítmico.

Figura 23 – Gráfico referente à taxa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 e com 25N de carregamento.



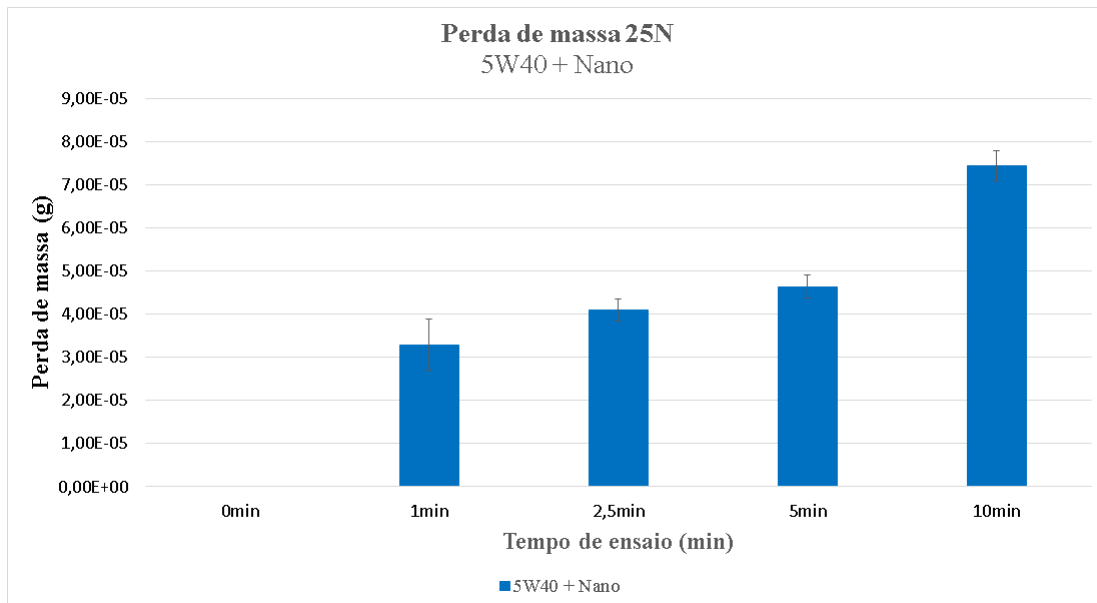
Fonte: Autor, 2023.

4.1.2 Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano Automotivo® - 25N

4.1.2.1 Desgaste - Perda de massa

Ao examinar os dados no gráfico, observa-se que no ensaio de 1 minuto, o desgaste já é notável, constituindo uma parte considerável do desgaste total observado no ensaio de 10 minutos. Isso sugere uma não linearidade e uma taxa de desgaste mais elevada no início do experimento.

Figura 24 – Gráfico referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 25N de carregamento.

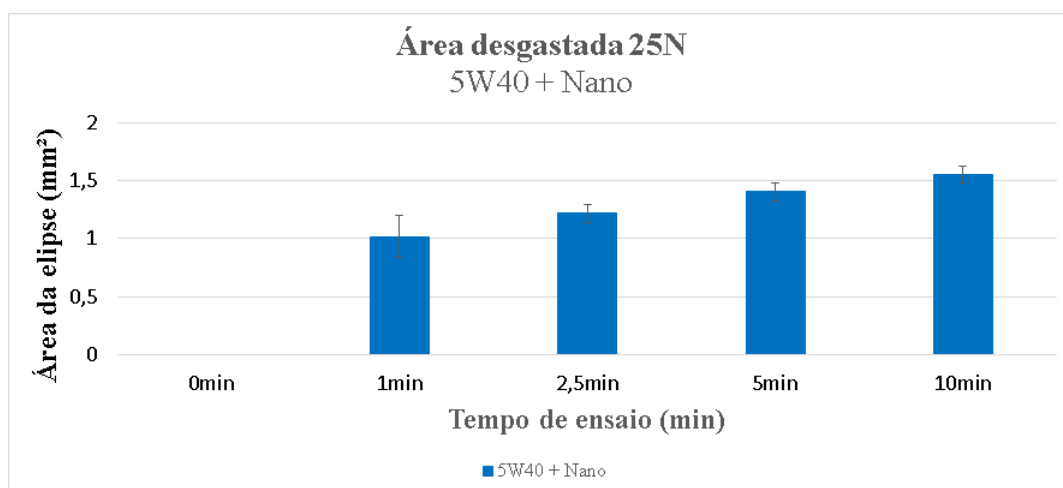


Fonte: Autor, 2023.

4.1.2.2 Desgaste - Área desgastada

A área correspondente a uma pressão de 50MPa , ainda considerando a carga de 25N , é de $0,5\text{mm}^2$. Ao examinar o gráfico, é evidente que, no menor intervalo de ensaio de 1 minuto, a área já ultrapassa a necessária para a transição entre os regimes de lubrificação.

Figura 25 – Gráfico referente à área desgastada em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 25N de carregamento.



Fonte: Autor, 2023.

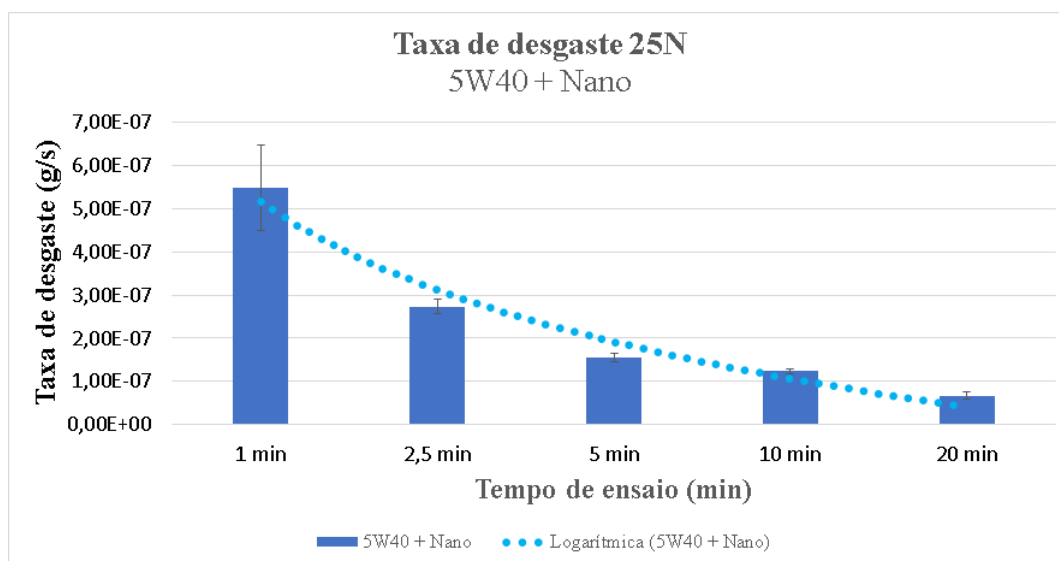
Contudo, para efeitos de comparação, se considerado um desgaste linear até 1 minuto, a transição de um regime para outro ocorreria por volta dos 29,5 segundos. No entanto, dado o entendimento de que o comportamento do desgaste não é linear, é seguro

afirmar que a transição para o regime de lubrificação hidrodinâmico ocorre antes desse período.

4.1.2.3 Taxa de desgaste

Com base na [Figura 26](#), nota-se uma tendência de declínio na curva, sugerindo uma redução na taxa de desgaste ao longo do ensaio. Isso é evidenciado pela linha de tendência na curva.

Figura 26 – Gráfico referente à taxa em ensaios com diferentes durações. Ensaio lubrificado com óleo 5W40 + Nano® e com 25N de carregamento.



4.1.3 Comparativo dos ensaios com 25N em diferentes condições de lubrificação

Nessa seção é feito um comparativo dos ensaios realizados sob as mesmas condições de carregamento (25N) e velocidade (5V) mas variando a lubrificação.

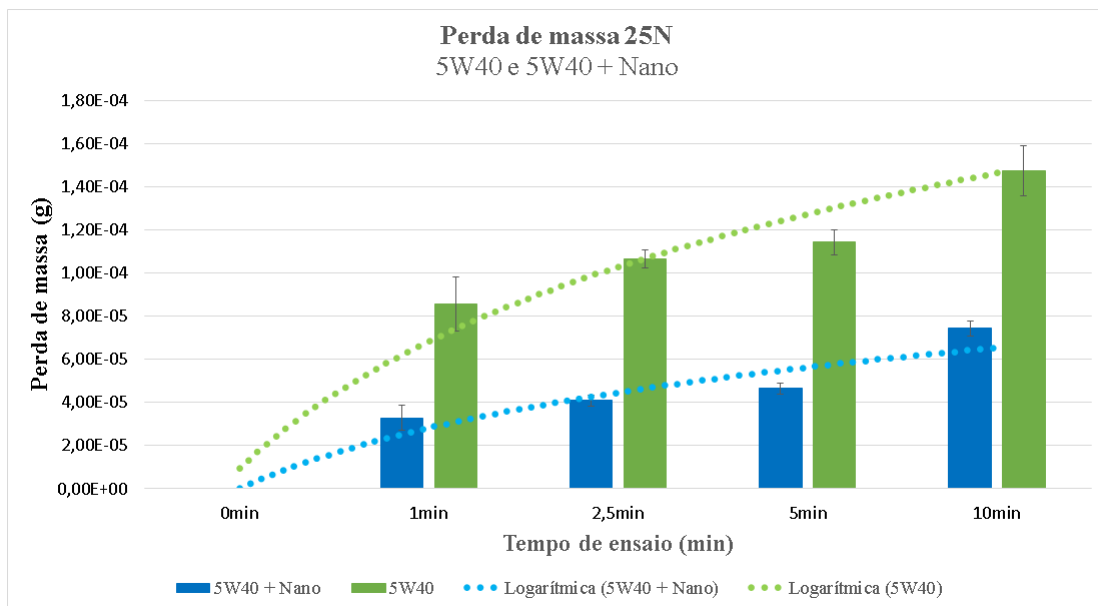
4.1.3.1 Desgaste

Inicialmente, é possível observar na [Figura 27](#) que, independentemente do intervalo de duração do experimento, os valores e a tendência de perda de massa nos ensaios com lubrificação apenas utilizando o óleo 5W40 são superiores em comparação aos ensaios com adição do Nano automotivo®. Isso destaca a eficácia do condicionador de metais.

Além disso, considerando que o início do ensaio é o intervalo crucial para os valores de desgaste, a utilização do aditivo reduz significativamente o desgaste nos primeiros momentos do ensaio.

Para corroborar essa hipótese, ao levar em consideração os tempos estimados para a transição dos regimes de lubrificação, os ensaios apenas com o óleo 5W40 apresentam um tempo menor para atingir uma área maior de desgaste, referente à pressão de contato de 50 MPa.

Figura 27 – Gráfico comparativo referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações e condições de lubrificação para a carga de 25N.

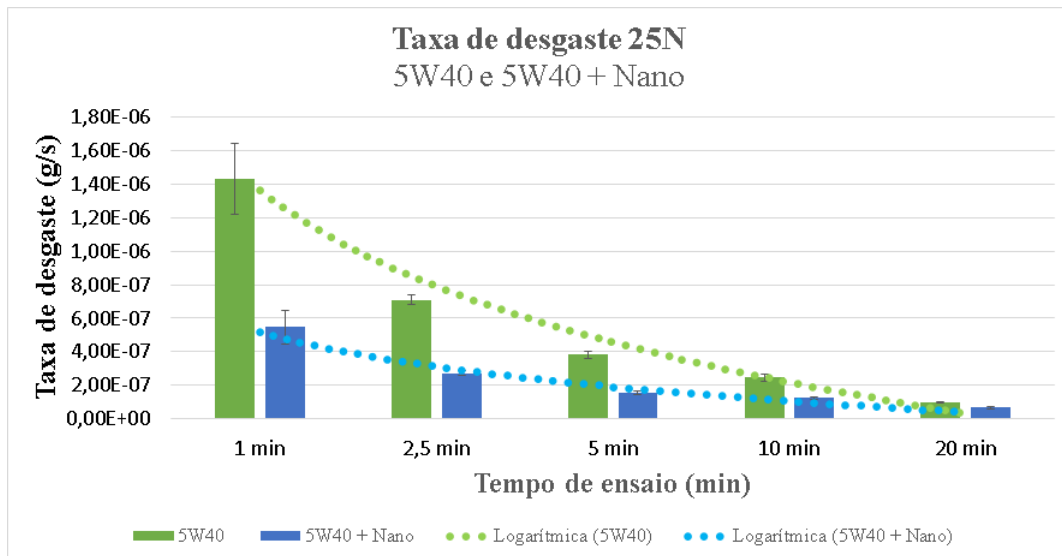


Fonte: Autor, 2023.

4.1.3.2 Taxa de desgaste

Para uma melhor comparação da taxa de desgaste nas diferentes condições de lubrificação, a [Figura 28](#) é utilizada, reforçando as afirmações feitas anteriormente. Ao longo de todo o intervalo analisado, a taxa de desgaste nos ensaios apenas com o óleo 5W40 é maior em comparação aos testes com a adição do Nano automotivo®.

Figura 28 – Gráfico comparativo referente à taxa de desgaste em ensaios com diferentes durações e condições de lubrificação para a carga de 25N.



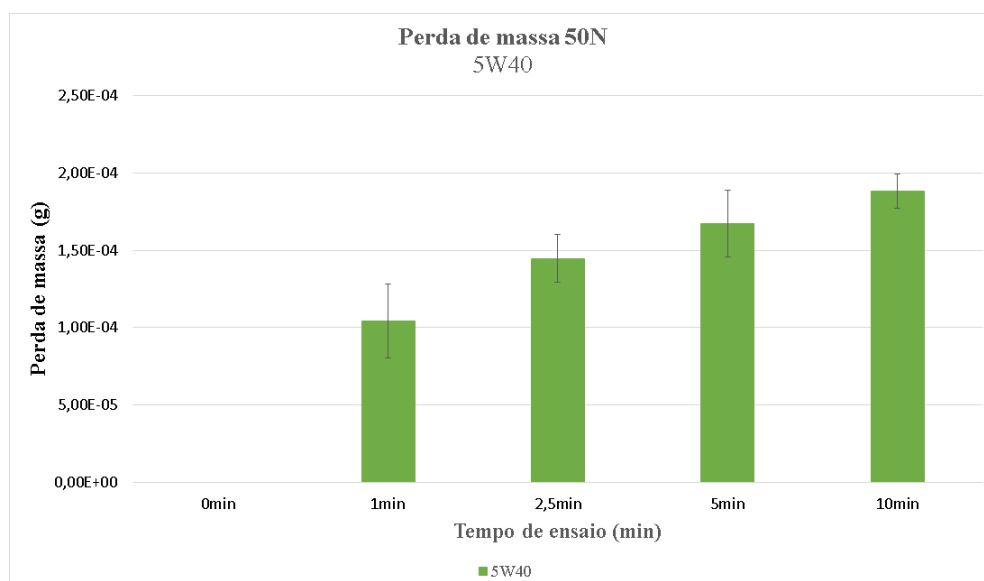
Fonte: Autor, 2023.

4.1.4 Ensaios lubrificados com óleo 5W40 - 50N

4.1.4.1 Desgaste - Perda de massa

Assim como nas configurações anteriores, no ensaio de um minuto, o desgaste já é significativo, representando uma parte substancial do desgaste total observado no ensaio de 10 minutos. Isso reforça a ideia da não-linearidade do desgaste ao longo do tempo.

Figura 29 – Gráfico referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 e com 50N de carregamento.

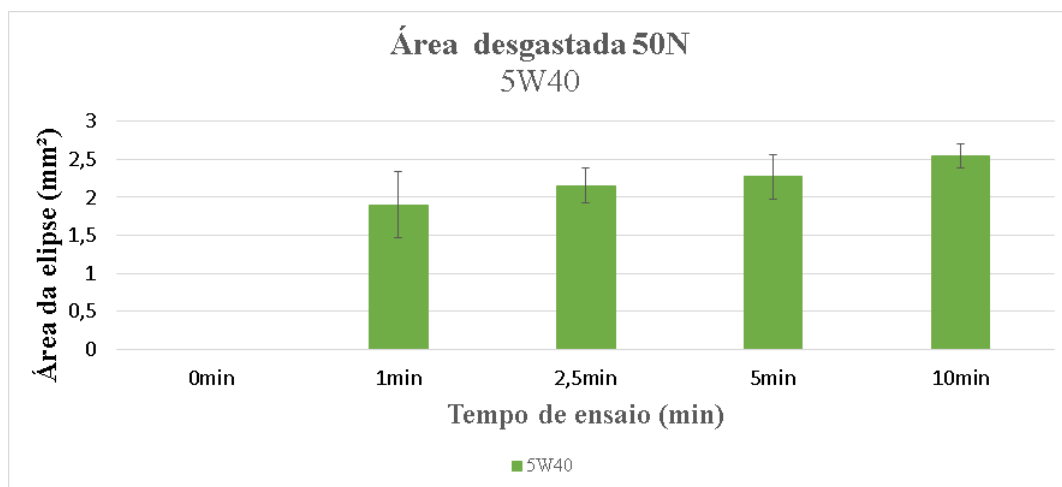


Fonte: Autor, 2023.

4.1.4.2 Desgaste - Área desgastada

A área correspondente a uma pressão de $50MPa$, com uma carga de $50N$, é de $1,0mm^2$. Ao analisar o gráfico, fica claro que, no ensaio de 1 minuto, a área ultrapassa a necessária para a transição entre os regimes de lubrificação. Considerando um desgaste linear até 1 minuto, a transição ocorreria por volta dos 31,5 segundos. Entretanto, dada a não-linearidade do desgaste, é seguro afirmar que a transição para o regime de lubrificação hidrodinâmica ocorre antes desse período.

Figura 30 – Gráfico referente à área desgastada em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 e com $50N$ de carregamento.

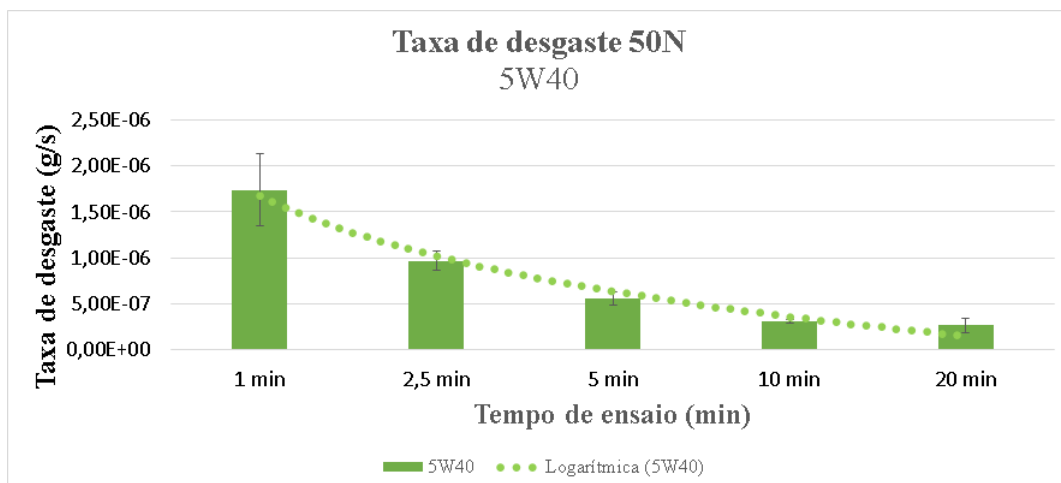


Fonte: Autor, 2023.

4.1.4.3 Taxa de desgaste

Observando a [Figura 31](#), percebe-se uma tendência de declínio na curva, indicando uma redução na taxa de desgaste ao longo do ensaio. Isso é destacado pela presença da linha de tendência na curva.

Figura 31 – Gráfico referente à taxa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 e com 50N de carregamento.



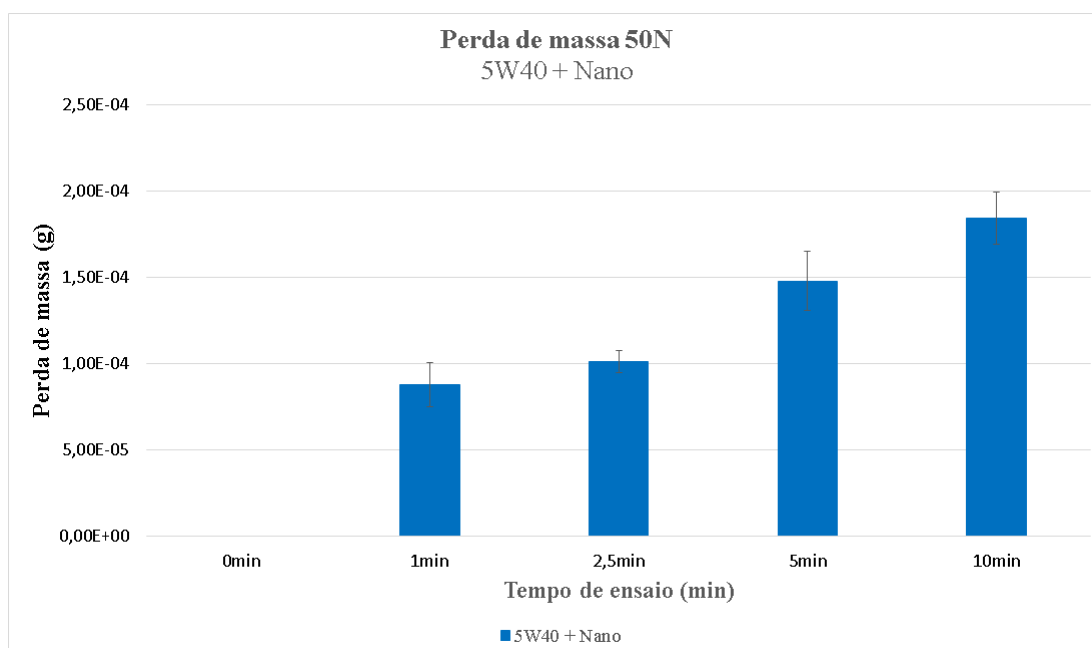
Fonte: Autor, 2023.

4.1.5 Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano Automotivo® - 50N

4.1.5.1 Desgaste - Perda de massa

Semelhante às configurações anteriores, no ensaio de um minuto, o desgaste já é significativo, constituindo uma parte substancial do desgaste total observado no ensaio de 10 minutos. Essa observação reforça a noção da não-linearidade do desgaste ao longo do tempo.

Figura 32 – Gráfico referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 50N de carregamento.

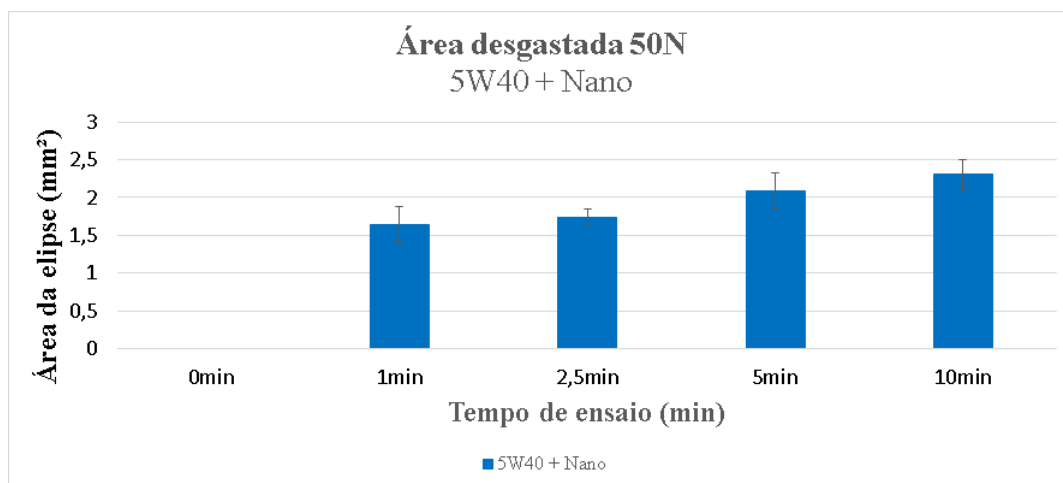


Fonte: Autor, 2023.

4.1.5.2 Desgaste - Área desgastada

A área correspondente a uma pressão de 50 MPa, com uma carga de 50 N, é de 1,0 mm². Observando o gráfico, é possível concluir que, no ensaio de 1 minuto, a área excede a necessária para a transição entre os regimes de lubrificação (1mm²). Se considerarmos um desgaste linear até 1 minuto, a transição ocorreria por volta dos 36,5 segundos. No entanto, devido à não-linearidade do desgaste, é seguro afirmar que a transição para o regime de lubrificação hidrodinâmica ocorre antes desse período.

Figura 33 – Gráfico referente à área desgastada em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 50N de carregamento.

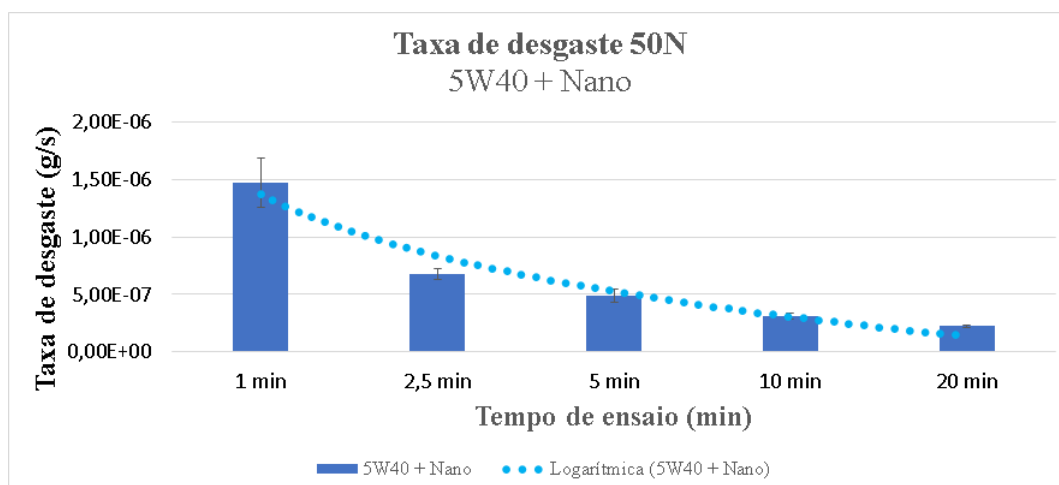


Fonte: Autor, 2023.

4.1.5.3 Taxa de desgaste

Analisando a [Figura 31](#), nota-se uma tendência de declínio na curva, sugerindo uma redução na taxa de desgaste ao longo do ensaio. Essa observação é ressaltada pela presença da linha de tendência na curva.

Figura 34 – Gráfico referente à taxa em ensaios com diferentes durações. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Nano® e com 50N de carregamento.



Fonte: Autor, 2023.

4.1.6 Comparativo dos ensaios com 50N em diferentes condições de lubrificação

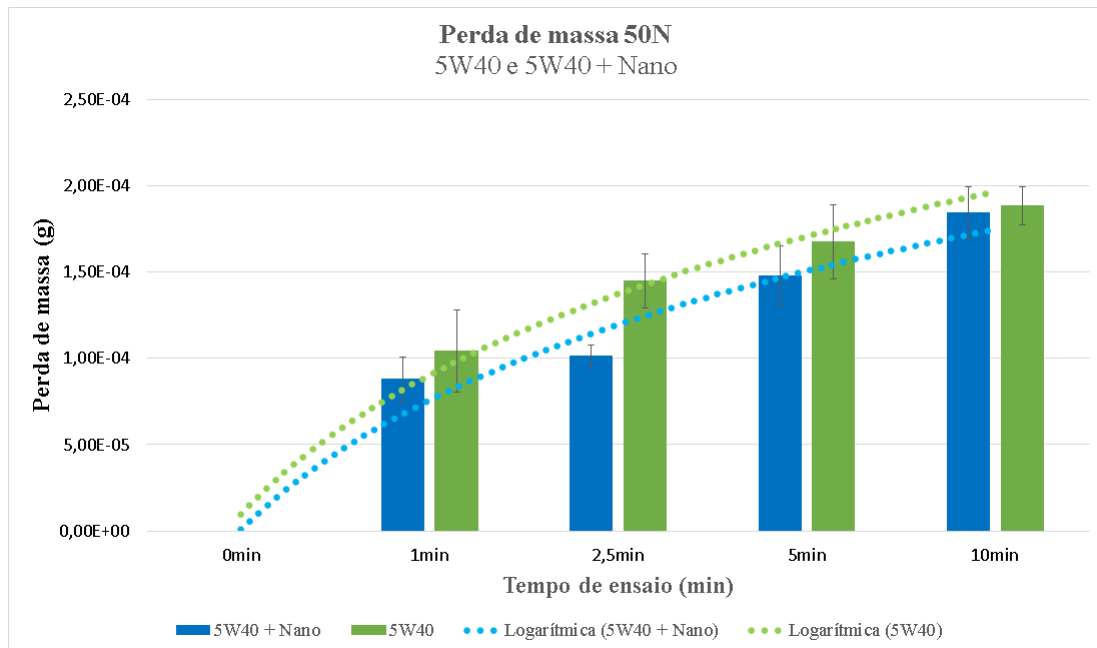
Nessa secção é feito um comparativo dos ensaios realizados sob as mesmas condições de carregamento (50N) e velocidade (5V) mas variando a lubrificação.

4.1.6.1 Desgaste

Na [Figura 35](#), fica claro que, independentemente da duração do experimento, nos ensaios com apenas o óleo 5W40, os valores médios e a tendência de perda de massa são superiores em comparação aos ensaios com a adição do Nano automotivo®. Entretanto, em alguns intervalos, os ensaios em diferentes condições de lubrificação compartilham a região de erro, representada pelas barras verticais. Adicionalmente, considerando a importância do início do ensaio, a utilização do aditivo reduz o desgaste nos primeiros momentos do experimento, como pode ser observado no teste de 2 minutos.

Ao analisar os tempos estimados para a transição dos regimes de lubrificação, nota-se que os ensaios apenas com o óleo 5W40 atingem uma área maior de desgaste, referente à pressão de contato de 50MPa, em um tempo menor.

Figura 35 – Gráfico comparativo referente à perda de massa em ensaios com diferentes durações e condições de lubrificação para a carga de 50N.

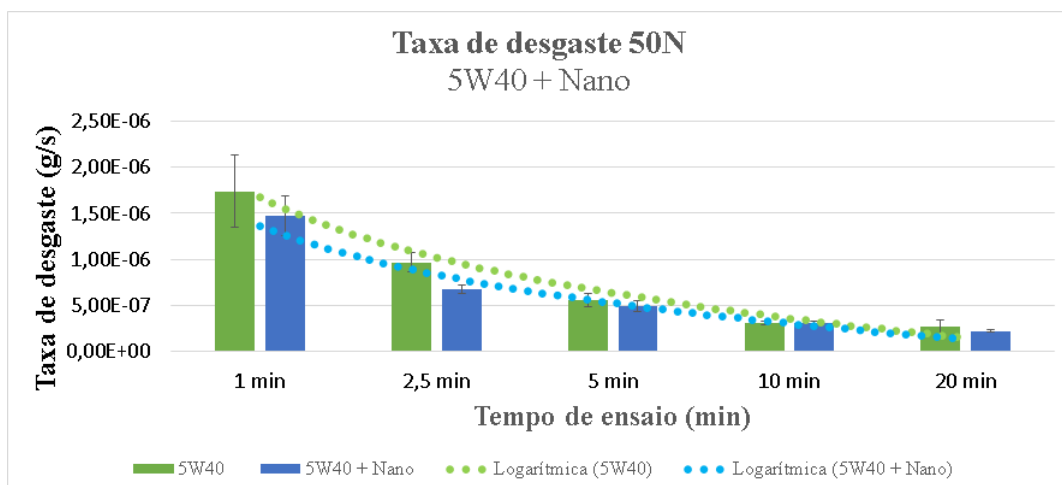


Fonte: Autor, 2023.

4.1.6.2 Taxa de desgaste

Para uma análise mais precisa da taxa de desgaste nas distintas condições de lubrificação, recorre-se à [Figura 36](#), reforçando as observações anteriores. Ao longo de todo o intervalo considerado, a taxa média de desgaste nos ensaios apenas com o óleo 5W40 é superior em relação aos testes com a adição do Nano automotivo®.

Figura 36 – Gráfico comparativo referente à taxa de desgaste em ensaios com diferentes durações e condições de lubrificação para a carga de 50N.



Fonte: Autor, 2023.

4.1.7 Considerações finais sobre pressão de contato e transição entre regimes de lubrificação - Velocidade 5V

Considerando que os ensaios a seguir foram conduzidos nas mesmas condições de carga e lubrificação para essa velocidade, é seguro afirmar que, com base nos cálculos realizados para ensaios de 1 minuto, em todos os experimentos o momento de transição entre os regimes de lubrificação ocorre antes do intervalo de 1 minuto.

4.2 Ensaios de 20 minutos na velocidade 5V - $5,67m/s$ de velocidade tangencial ($1720RPM$)

4.2.1 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 25N

4.2.1.1 Força de atrito

Os dados gráficos da força de atrito ao longo dos 20 minutos do ensaio estão representados na [Figura 37](#). Ao analisá-los, destaca-se um aumento rápido da força no início do ensaio, atribuído à falta inicial de uma lubrificação eficiente devido à alta pressão de contato entre os corpos de prova. Isso inicialmente impede que o regime de lubrificação seja o hidrodinâmico, resultando em maior desgaste.

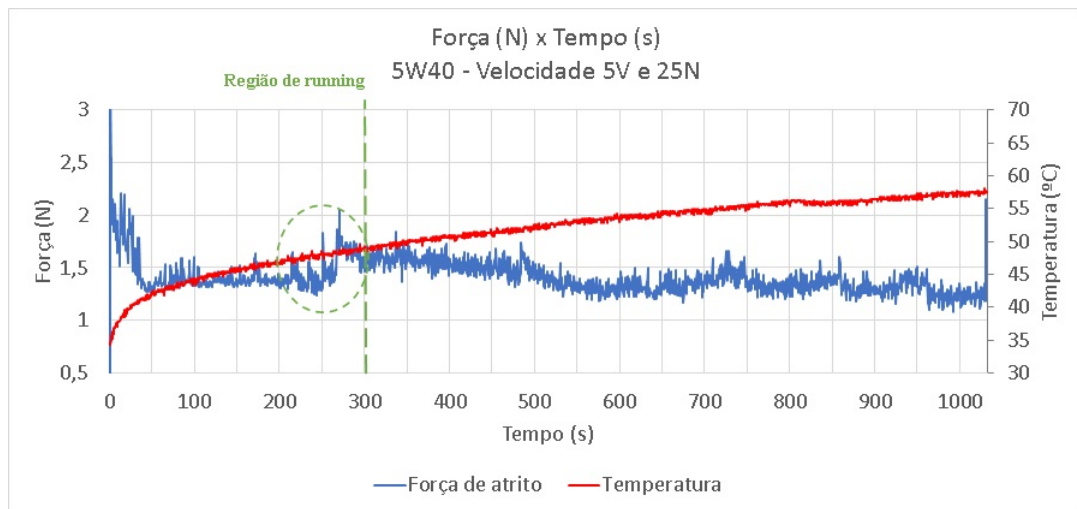
O contato inicial entre os corpos é não conforme, resultando em uma área de contato inicialmente pequena que aumenta ao longo do ensaio. Isso pode ter contribuído para produzir um incremento gradual na força de atrito durante o ensaio.

A fase inicial é marcada por um pico na força e por flutuações significativas nos valores até que o pino se acomode sob o disco, identificado no gráfico como a região de "*running*", estendendo-se aproximadamente até os 300 segundos. Após esse período, ocorre uma estabilização nos valores da força de atrito em torno de 1,4 N.

Além disso, destacam-se notáveis oscilações na força de atrito entre os 200 e 300 segundos, conforme evidenciado pela área verde no gráfico. Essas flutuações indicam a presença de desgaste abrasivo e sugerem a possibilidade de desgaste adesivo. No contexto do desgaste abrasivo, os picos ocorrem quando partículas previamente removidas são reintroduzidas na região de contato devido à dinâmica do ensaio. Uma vez que os detritos são expulsos da região de contato, a força de atrito tende a estabilizar novamente.

Já no contexto do desgaste pelo mecanismo adesivo, essas oscilações podem estar relacionadas à deformação plástica, possivelmente resultante da adesão e descolamento de material entre as superfícies de contato, conforme pode ser observado na [Figura 39](#)

Figura 37 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.

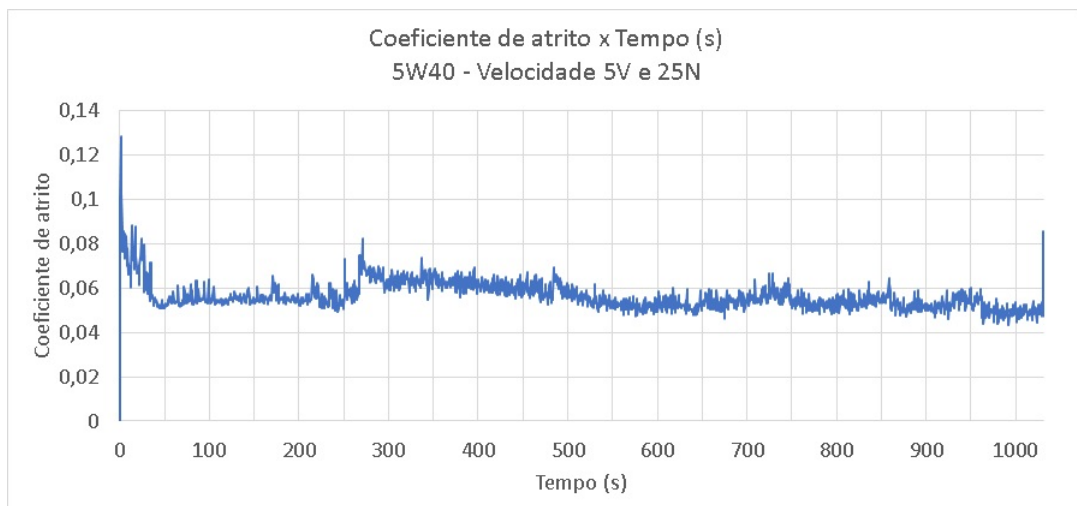


Fonte: Autor, 2023.

4.2.1.2 Coeficiente de atrito

Na Figura 38, a curva espelha a do gráfico de força de atrito, mas agora os valores do coeficiente de atrito são mostrados no eixo Y como " μ " (adimensional). Além disso, durante a maior parte do ensaio, os valores de " μ " se situam entre 0,05 e 0,07, com o pico inicial de 0,13 e o final atingindo aproximadamente 0,09 de coeficiente de atrito.

Figura 38 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.1.3 Temperatura

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 37, que representa, além da força de atrito, a variação de temperatura durante o ensaio, percebe-se a linha vermelha, que

indica as temperaturas registradas ao longo do tempo. Inicialmente, a temperatura é de aproximadamente 35°C , refletindo uma temperatura quente do dia em que o ensaio foi conduzido.

Observa-se um aumento rápido da temperatura nos estágios iniciais do ensaio, atingindo 40°C em cerca de apenas 25 segundos. Após 50 segundos, a curva de temperatura mostra uma tendência de estabilização, mantendo um crescimento relativamente constante até o final do ensaio, quando atinge 58°C . Desta maneira, observa-se uma variação térmica de 23°C ao longo do ensaio.

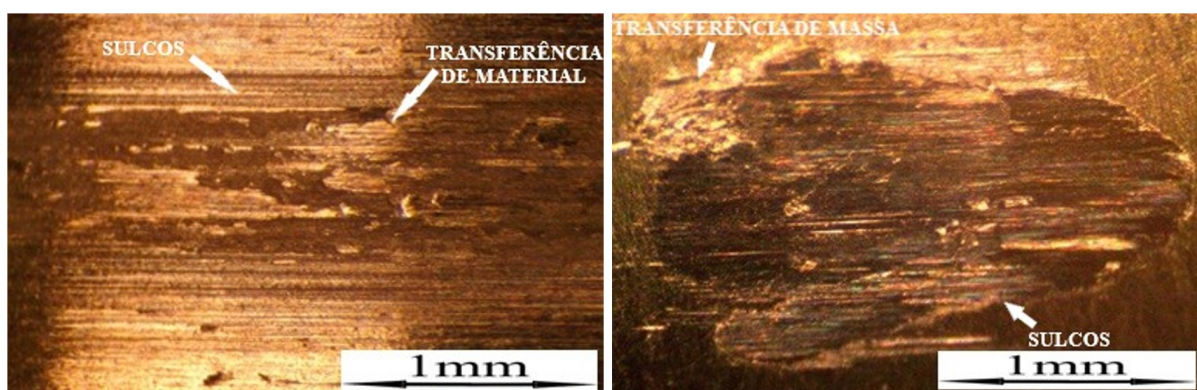
Cabe ressaltar que o aumento de temperatura, especialmente na região de contato entre os corpos de prova, favorece a ocorrência dos mecanismos de desgaste por adesão e por fadiga.

4.2.1.4 Análise superficial

Na [Figura 39](#), é possível observar sulcos na trilha de desgaste da superfície do disco, esses sulcos são resultantes do desgaste do tipo abrasivo. Sulcos mais profundos, aparecem mais escuros nas fotografias. O uso de lubrificante não impede o desprendimento e a acumulação de partículas metálicas na mistura lubrificante ou na superfície do disco. Quando reintroduzidas na região de contato atuam como agentes abrasivos. Além disso, observa-se uma região caracterizada pela deformação plástica da superfície, com isso, é notável a transferência de material e esse mecanismo é possível devido a partículas do contato ficarem aderidas na superfície do disco por conta da alta temperatura na região de contato, como uma espécie de material derretido, deformado plasticamente.

A análise do pino na [Figura 39](#) revela os mesmos mecanismos de desgaste atuantes no disco, a abrasão e a adesão. A abrasão é responsável pela formação dos sulcos visíveis na imagem, enquanto o desgaste por adesão se manifesta nas áreas onde ocorre transferência de material, bastante evidente nesse caso.

Figura 39 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V .



Fonte: Autor, 2023.

4.2.1.5 Desgaste

A perda de massa observada no experimento está apresentada na Tabela 5. Esse decréscimo de massa foi calculado utilizando a Equação 3.1 e, em seguida, convertido de volume para massa com base na densidade teórica do aço SAE 1045, conforme o especificado na metodologia.

Tabela 5 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, óleo 5W40 e carga 25N.

Ensaio lubrificado - 5W40	Massa perdida [$10^{-4}g$]
25N - 5V	1,17 ± 0,06

Fonte: Autor, 2023.

4.2.2 Ensaio lubrificado com a mistura 5W40 + Nano automotivo® - 25N

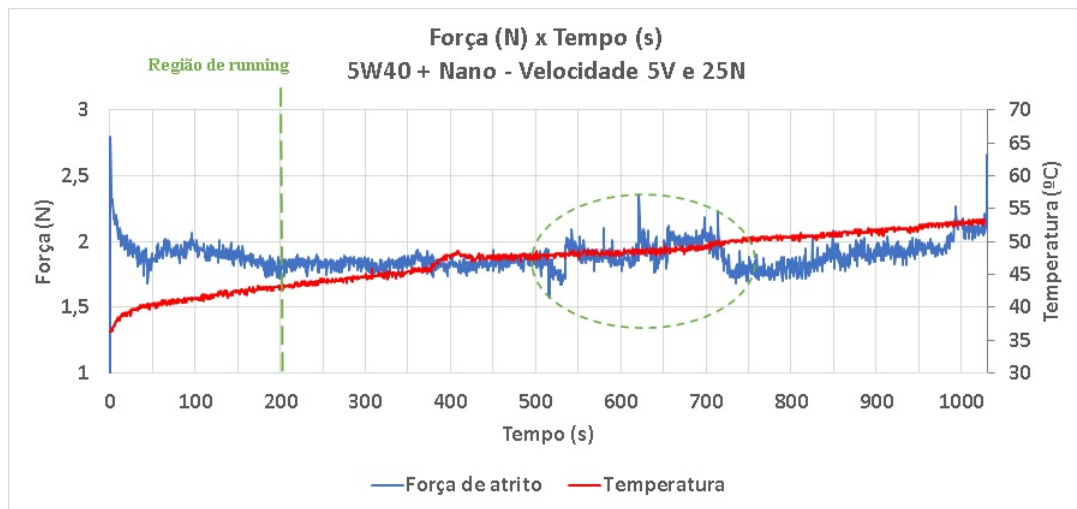
4.2.2.1 Força de atrito

Ao examinar a curva de força de atrito na [Figura 40](#), é perceptível um aumento imediato da força no início do ensaio devido à falta inicial de lubrificação no disco. Este aumento é seguido por oscilações nos valores de força, caracterizando o período de *running*.

Após o período de *running*, que se estende aproximadamente até os 200 segundos, observa-se a acomodação do pino sob o disco, resultando em uma estabilização dos valores de força em torno de 1,8N.

Além disso, é possível notar uma série de oscilações significativas na força de atrito entre os 500 e 750 segundos, como indicado pela marcação verde no gráfico. Essas flutuações são indícios da presença de desgaste abrasivo e adesivo. Como mencionado anteriormente, esses picos podem ser decorrentes da reintrodução de detritos desgastados na região de contato (abrasão) ou à deformação plástica e ao descolamento de material entre as superfícies (adesão). E no final do ensaio, os valores de atrito mostram uma tendência ao crescimento, indicando instabilidade no comportamento.

Figura 40 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.

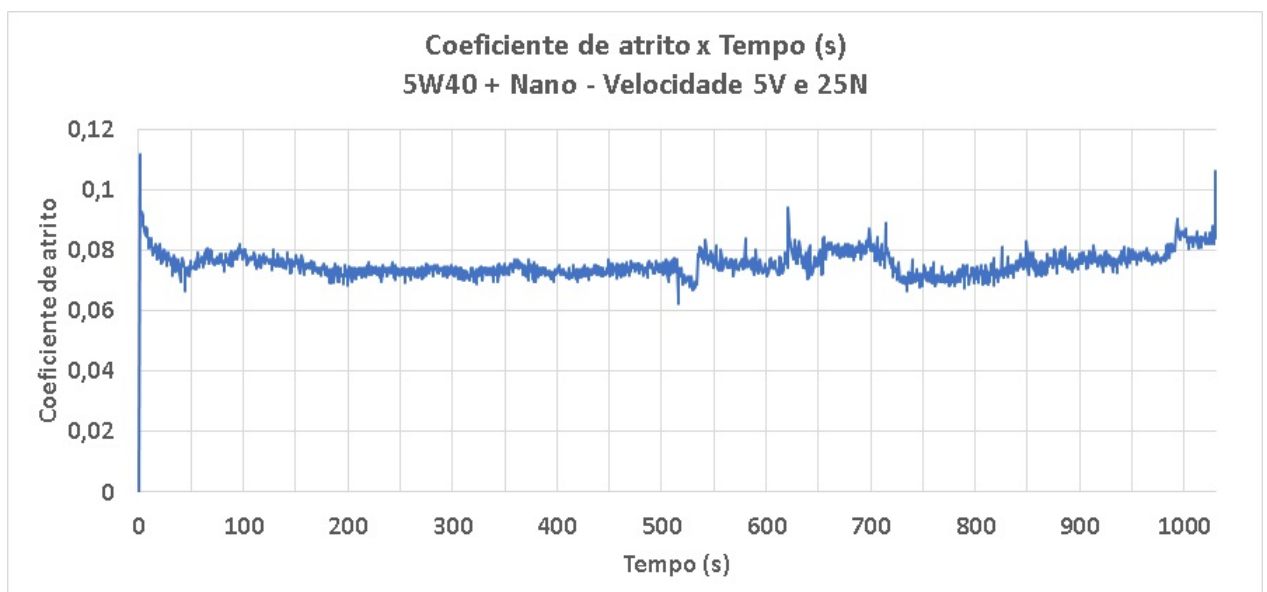


Fonte: Autor, 2023.

4.2.2.2 Coeficiente de atrito

Na Figura 41, a curva é a mesma observada no gráfico de força de atrito. No entanto, é importante ressaltar que os valores no eixo Y representam os coeficientes de atrito (μ). Ao longo da maior parte do ensaio, os valores de coeficiente de atrito variam entre 0,06 e 0,08. Destaca-se, ainda, que os picos inicial e final da curva atingem aproximadamente 0,11 de coeficiente de atrito.

Figura 41 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.2.3 Temperatura

O gráfico apresentado na [Figura 37](#) permite acompanhar a variação de temperatura ao longo do tempo, como indicado pela linha vermelha.

Ao iniciar o ensaio, a temperatura registrada é de aproximadamente 36°C , refletindo a condição ambiental do dia em que o experimento foi realizado. Nos primeiros 30 segundos, observa-se um rápido aumento da temperatura, alcançando 40°C . Posteriormente, a curva exibe uma tendência de estabilização linear até o término do ensaio, momento em que atinge 53°C . Consequentemente, a amplitude térmica do ensaio foi de 17°C .

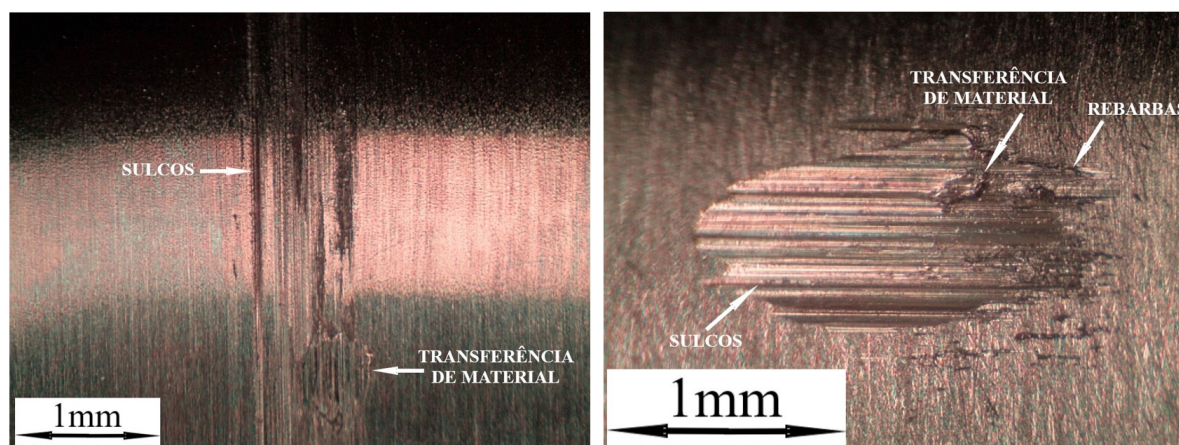
4.2.2.4 Análise superficial

Na [Figura 42](#), é possível identificar sulcos bem marcados na trilha de desgaste da superfície do disco. Esses sulcos evidenciam o desgaste abrasivo resultante da reintrodução de partículas abrasivas no contato.

Além disso, é perceptível uma área caracterizada pelo desgaste por adesão, evidenciado pela transferência de material. Este mecanismo surge da adesão entre as superfícies dos diferentes corpos em contato, influenciado pela temperatura no ensaio, o que causa a soldagem e descolamento de partículas. Também são observadas crateras que podem ter sido originadas de descolamentos (adesão) ou pela fadiga.

Ao analisar o pino, na [Figura 42](#), observa-se a atuação dos mesmos mecanismos de desgaste observados no disco. A abrasão é responsável pela formação dos sulcos visíveis, enquanto o desgaste por adesão se manifesta nas áreas onde ocorre a transferência de material. Adicionalmente, a presença de rebarbas de natureza frágil indica uma deformação plástica ocorrida no processo, possivelmente ocasionada pelo mecanismo de fadiga.

Figura 42 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.2.5 Desgaste

A perda de massa no experimento é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, óleo 5W40 + Nano® e carga 25N.

Ensaio lubrificado - 5W40 + Nano®	Massa perdida [$10^{-5}g$]
25N - 5V	7,98 ± 1,04

Fonte: Autor, 2023.

4.2.3 Comparativo dos ensaios com 25N em diferentes condições de lubrificação

A seguir é feito um comparativo dos ensaios realizados sob as mesmas condições de carregamento (25N) e velocidade (5V) mas variando a lubrificação.

4.2.3.1 Força de atrito

Os gráficos dos dois ensaios (Figura 37 e Figura 40) inicialmente apresentam picos semelhantes na força de atrito, atribuídos à falta inicial de lubrificação do disco, alta pressão de contato e superfícies não-conformes. Após a fase de *running*, as curvas se estabilizam em valores distintos: aproximadamente 1,4N para o ensaio com o óleo 5W40 e 1,8N para o ensaio com a adição do Nano Automotivo®.

No ensaio com o óleo 5W40, a força de atrito é mais uniforme quando comparada com a do ensaio com Nano®, onde as instabilidades foram mais evidentes.

Em termos gerais, os valores de força de atrito foram mais elevados no ensaio com a adição de Nano®.

4.2.3.2 Coeficiente de atrito

No ensaio com apenas a lubrificação utilizando o óleo 5W40, o coeficiente de atrito, após a estabilização, variou entre 0,05 e 0,07. Em contraste, no ensaio com a adição de Nano®, os valores situaram-se na faixa de 0,06 a 0,08. Assim, de acordo com os gráficos de força de atrito, a média dos valores do coeficiente de atrito no ensaio com aditivo foi maior do que no ensaio apenas com o óleo 5W40.

4.2.3.3 Temperatura

Ao analisar os dados de temperatura (Figura 37 e Figura 40), nota-se que os ensaios começaram com temperaturas muito semelhantes, diferindo apenas por 1°C. O termopar indica uma elevação de temperatura para 40°C em um intervalo de tempo semelhante nos dois ensaios, seguido por uma tendência à estabilização nas curvas. Entretanto, ao final

dos ensaios, a temperatura no ensaio apenas com óleo 5W40 atinge 58°C, apresentando uma variação térmica de 23°C. Por outro lado, no ensaio com aditivo, a temperatura final é de 53°C, com uma amplitude térmica de 17°C. Assim, a temperatura no ensaio sem aditivo apresenta um aumento mais significativo, considerando a amplitude térmica demonstrada.

4.2.3.4 Superfícies desgastadas

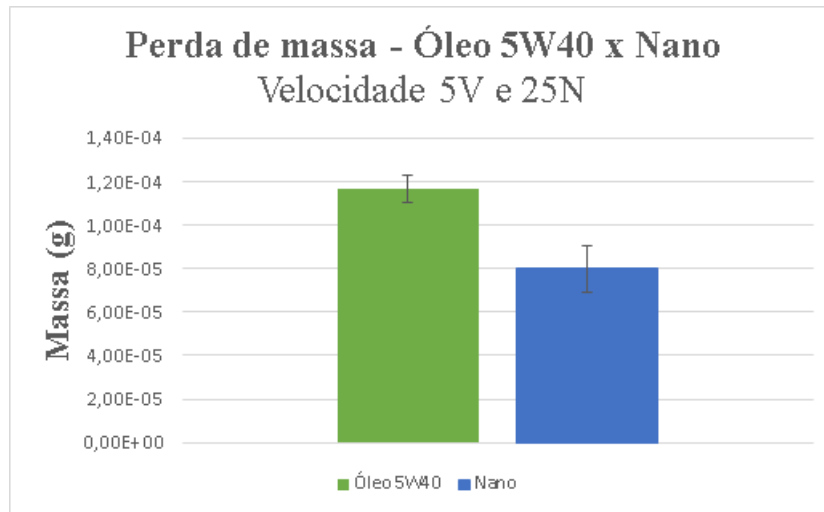
Ao comparar as figuras que representam as superfícies do pino e do disco após os ensaios ([Figura 39](#) e [Figura 42](#)), observa-se uma notável semelhança nas marcas de desgaste, indicando a atuação dos mesmos mecanismos de desgaste. Entretanto, é evidente uma maior presença de deformação plástica, característica da transferência de material, no ensaio apenas com o óleo 5W40, sugerindo uma maior incidência do mecanismo de adesão. Esse fenômeno pode ser atribuído aos dados de temperatura, sendo o valor mais elevado no ensaio sem aditivo.

Além disso, vale ressaltar que as superfícies do ensaio com Nano® demonstram uma predominância do mecanismo de abrasão, com indícios adicionais da ocorrência do mecanismo de fadiga. É notável também que as elipsóides e as trilhas apresentam tamanhos claramente diferentes, sendo que as do ensaio com aditivo são menores.

4.2.3.5 Desgaste

A partir dos dados de desgaste apresentados, foi gerado o gráfico da [Figura 43](#), proporcionando uma representação visual das diferenças nos resultados. Ao analisar o gráfico, observa-se uma redução significativa da perda de massa, cerca de 32% em relação ao valor médio, ao utilizar o aditivo Nano®. Além disso, ao considerar os valores de erro relacionados ao desvio padrão do desgaste, verifica-se que o desgaste permanece reduzido, contudo menos uniforme.

Figura 43 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios de velocidade 5V e 25N de carga, nas configurações de lubrificação: lubrificado apenas com óleo 5W40 e lubrificado com mistura óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.



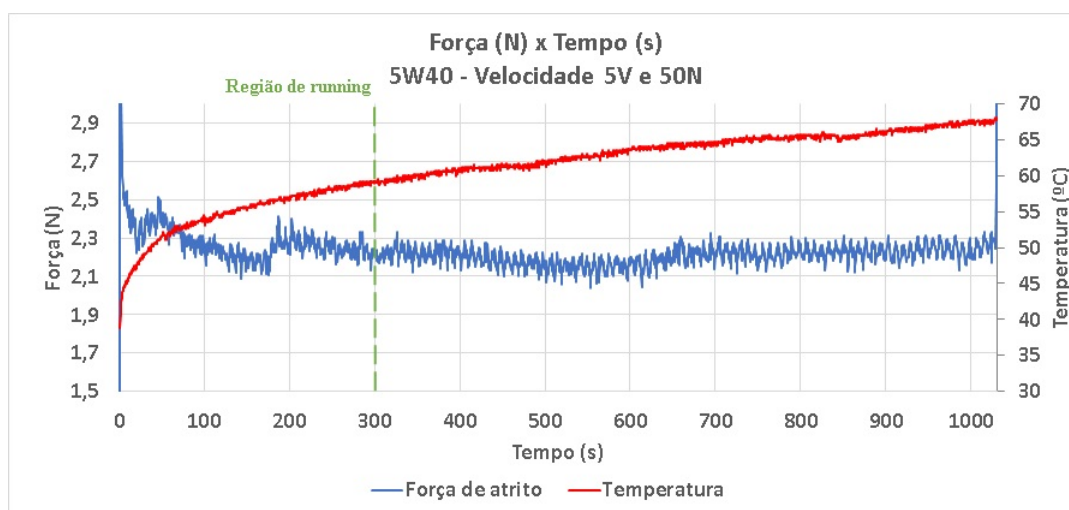
Fonte: Autor, 2023.

4.2.4 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 50N

4.2.4.1 Força de atrito

Ao analisar a curva de força de atrito na [Figura 44](#), nota-se que o período de *running* tem uma duração de aproximadamente 300 segundos, conforme evidenciado pela linha verde. Durante esse intervalo, após atingir um pico inicial em torno de 5,8N, a curva demonstra uma tendência à estabilização, mantendo-se em valores próximos a 2,3N. Além disso, é relevante destacar a ausência de flutuações significativas nos valores ao longo do ensaio. Desta maneira não foi indicada nenhuma região de instabilidade no gráfico após o *running*.

Figura 44 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.

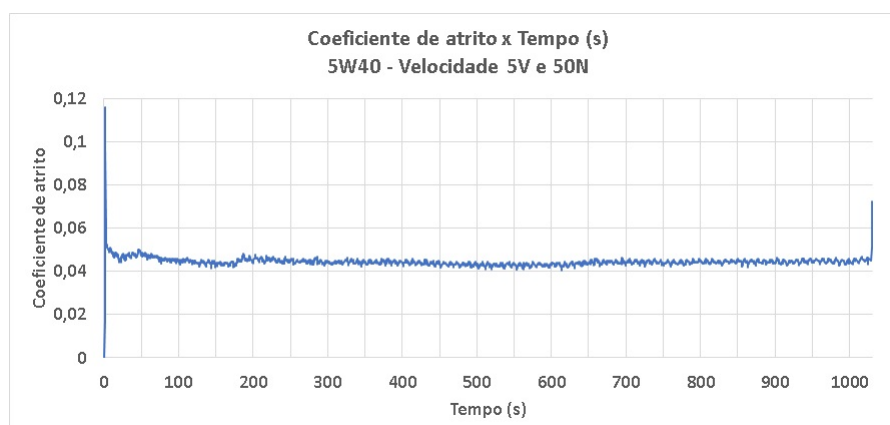


Fonte: Autor, 2023.

4.2.4.2 Coeficiente de atrito

Na Figura 45, a curva corresponde à do gráfico de força de atrito. Ao longo da maior parte do ensaio, que os valores de " μ " se mantêm entre 0,04 e 0,05, com um pico inicial de aproximadamente 0,12.

Figura 45 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.4.3 Temperatura

A análise do gráfico na Figura 44 permite também a observação da curva de temperatura durante o ensaio. Inicialmente, a temperatura registrada é de cerca de 37°C. Ao iniciar o ensaio ocorre um rápido aumento da temperatura e, aos 40 segundos de ensaio, alcança um valor de 50°C. Posteriormente, a curva de temperatura demonstra uma

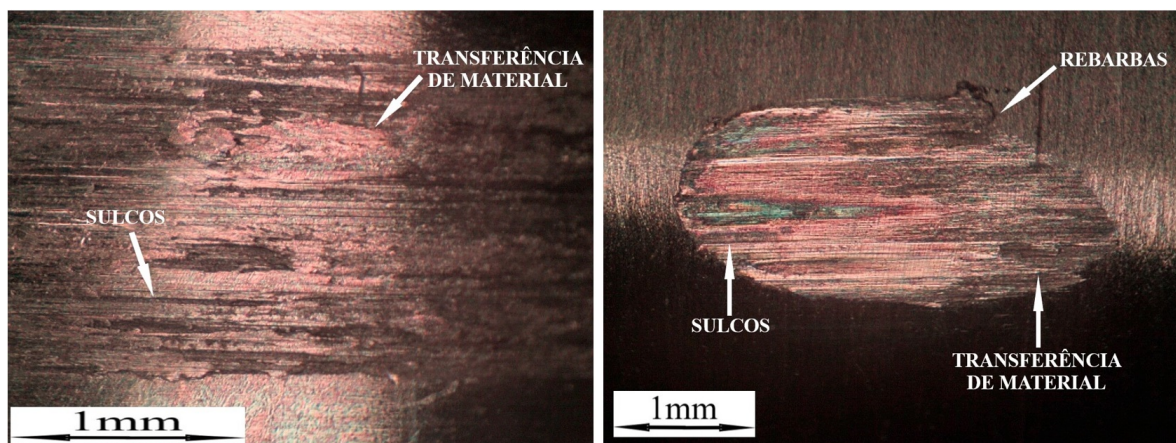
tendência à estabilização, porém se comporta quase que de maneira linear, continuando assim até o final do ensaio, momento em que atinge 68°C. Portanto, a variação térmica ao longo do ensaio totalizou 31°C.

4.2.4.4 Análise superficial

Na esquerda da [Figura 46](#), a superfície desgastada do disco é visível. Os indícios presentes na imagem apontam para a existência de sulcos e deformações, características da transferência de material. Os sulcos na trilha indicam um desgaste provocado por abrasão, originado pelos detritos gerados durante o processo de desgaste. Além disso, observa-se a transferência de material por adesão, especialmente em áreas com depósitos ou descolamento de material, sendo essa transferência influenciada pela temperatura na área de contato entre os corpos de prova. Adicionalmente, são encontradas crateras que podem ter sido formadas pelos mecanismos já citados ou até mesmo pela fadiga.

A análise do pino, situado à direita na [Figura 46](#), revela a atuação dos mesmos mecanismos de desgaste identificados no disco. A abrasão se manifesta na formação de sulcos visíveis, enquanto o desgaste por adesão ocorre nas áreas onde há transferência de material. Além disso, são percebidas rebarbas características de uma fratura frágil no pino, possivelmente resultantes do mecanismo de fadiga, cuja ocorrência é facilitada pelo aumento da temperatura na região de contato.

Figura 46 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.4.5 Desgaste

A perda de massa no experimento estão registrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, óleo 5W40 e carga 50N.

Ensaio lubrificado - 5W40	Massa perdida [$10^{-4}g$]
50N - 5V	3,22 ± 0,95

Fonte: Autor, 2023.

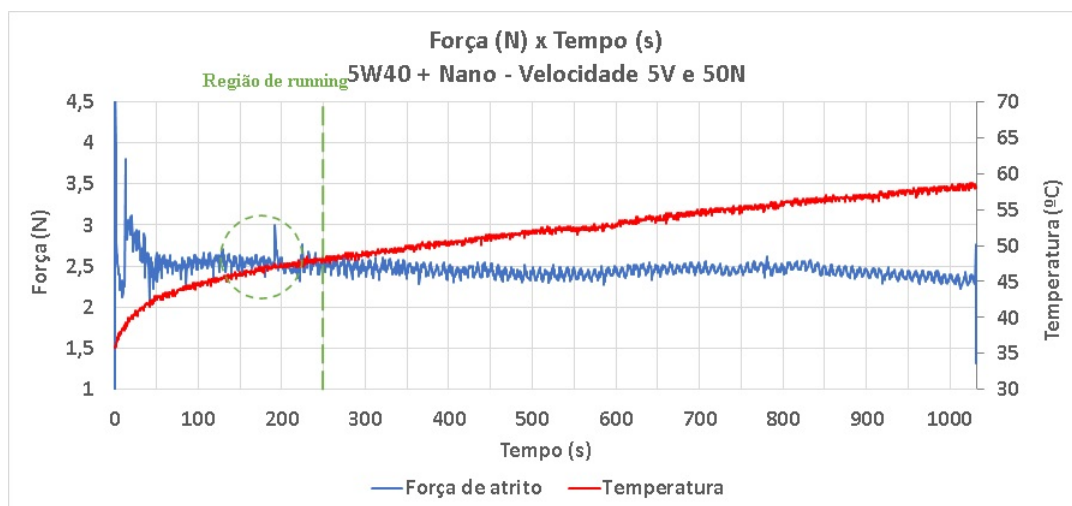
4.2.5 Ensaio lubrificado com a mistura 5W40 + Nano automotivo® - 50N

4.2.5.1 Força de atrito

Ao analisar a curva de força de atrito na [Figura 47](#), observa-se que o período de *running*, tem uma duração de aproximadamente 250 segundos, como indicado pela linha verde. Durante esse intervalo, a curva atinge um pico inicial em torno de 4,8N e, em seguida, demonstra uma tendência à estabilização, mantendo-se em valores próximos a 2,4N.

É relevante salientar as flutuações destacadas pelo círculo verde. Essas oscilações podem ser atribuídas à possível reintrodução de detritos resultantes do desgaste na região de contato (abrasão) ou ao descolamento de material (adesão).

Figura 47 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.



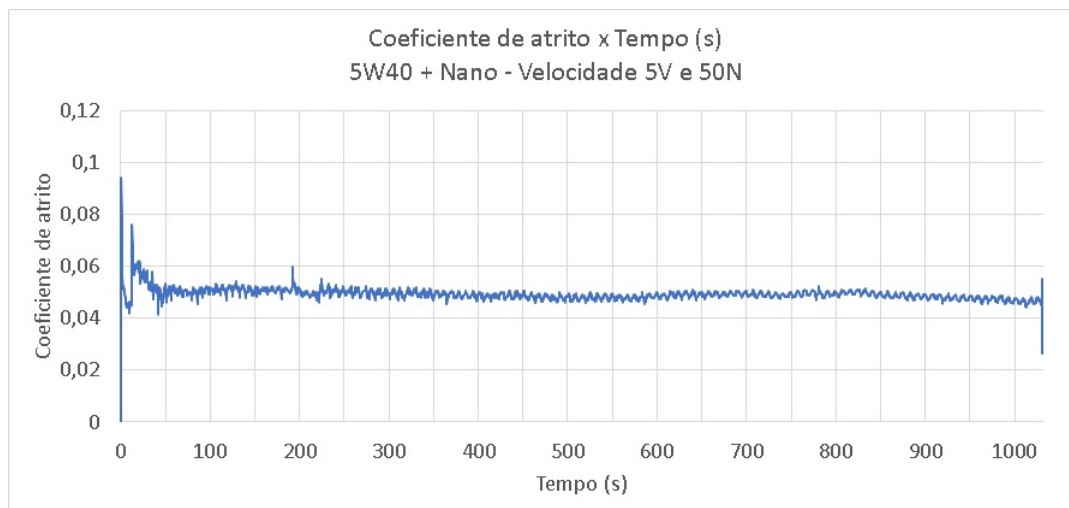
Fonte: Autor, 2023.

4.2.5.2 Coeficiente de atrito

Na [Figura 48](#), a curva representa os valores do coeficiente de atrito, denotado por " μ ". Essa curva corresponde ao gráfico de força de atrito mencionado anteriormente. Ao

longo da maior parte do ensaio, os valores de " μ " permanecem consistentemente entre 0,04 e 0,06, com um pico inicial atingindo aproximadamente 0,09.

Figura 48 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.5.3 Temperatura

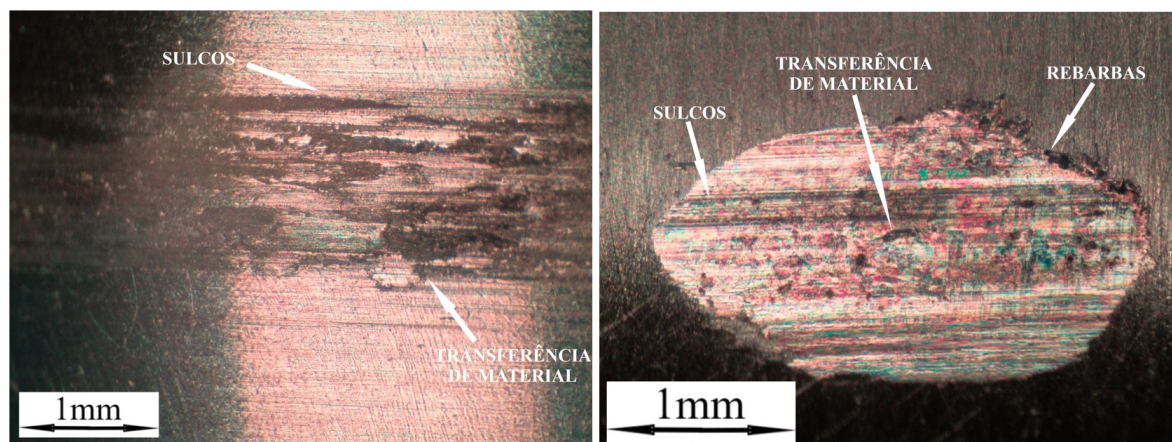
Na Figura 47, a análise do gráfico também possibilita a observação da curva de temperatura durante o ensaio. Inicialmente, a temperatura registrada é de aproximadamente 35°C. Ao iniciar o ensaio, há um rápido aumento da temperatura, atingindo 40°C aos 20 segundos de ensaio. Posteriormente, a curva de temperatura demonstra uma tendência à estabilização, adotando um comportamento quase linear até o final do ensaio, momento em que atinge 58°C. Portanto, a variação térmica ao longo do ensaio totalizou 23°C.

4.2.5.4 Análise superficial

Na análise da imagem à esquerda da Figura 49, nota-se a presença da superfície desgastada do disco. Conforme evidenciado na imagem, são identificáveis sulcos distintos, indicativos de desgaste por abrasão, juntamente com áreas onde ocorre a transferência de material, manifestada pelo depósito ou descolamento de material, características do mecanismo de adesão.

No pino localizado à direita, são evidentes sinais dos mesmos mecanismos de desgaste presentes no disco, tais como abrasão e adesão. Além disso, observam-se indícios de fadiga, manifestados por rebarbas com características de fraturas frágeis, essa hipótese reforça a possibilidade de que as crateras presentes no disco podem ter sido formadas também devido à fadiga.

Figura 49 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.5.5 Desgaste

A perda de massa no experimento foram registrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, óleo 5W40 + Nano® e carga 50N.

Ensaio lubrificado - 5W40 + Nano®	Massa perdida [$10^{-4}g$]
50N - 5V	2,69 ± 0,14

Fonte: Autor, 2023.

4.2.6 Comparativo dos ensaios com 50N em diferentes condições de lubrificação

A seguir, apresentam-se os comparativos entre os ensaios realizados sob as mesmas condições de carregamento (50N) e velocidade (5V) mas variando a lubrificação.

4.2.6.1 Força de atrito

Os gráficos dos dois ensaios (Figura 44 e Figura 47) inicialmente apresentam picos semelhantes na força de atrito. Após a fase de acomodação, as curvas se estabilizam em valores semelhantes: cerca de 2,3N para o ensaio com o óleo 5W40 e 2,4N para o ensaio com a adição do Nano Automotivo®.

Ao analisar os gráficos, observa-se um comportamento bastante similar nas curvas após a região de *running*. Entretanto, no ensaio com Nano automotivo®, há um breve período de instabilidade na região indicada, característico da ocorrência dos mecanismos de abrasão ou adesão.

Em termos gerais, os valores de força de atrito foram ligeiramente mais elevados no ensaio com a adição de Nano®, e as curvas demonstram uma notável semelhança.

4.2.6.2 Coeficiente de atrito

No ensaio com lubrificação utilizando o óleo 5W40, o coeficiente de atrito, após a estabilização, variou entre 0,04 e 0,05. Em contraste, no ensaio com a adição de Nano®, os valores situaram-se em uma faixa semelhante, porém mais ampla, variando de 0,04 a 0,06. Portanto, de acordo com os gráficos de força de atrito, a média dos valores do coeficiente de atrito no ensaio com aditivo foi maior do que no ensaio apenas com o óleo 5W40.

4.2.6.3 Temperatura

Ao correlacionar os dados de temperatura presentes nos gráficos de força de atrito (Figura 37 e Figura 40), observa-se que os ensaios iniciaram com temperaturas muito próximas, diferindo apenas por 2°C . Durante o ensaio sem aditivo, houve um rápido aumento de temperatura para 50°C em 40 segundos, enquanto no ensaio com aditivo, esse valor foi atingido em aproximadamente 350 segundos. Após uma fase de crescimento mais acentuado, ambas as condições mostram uma tendência à estabilização térmica.

Ao término dos ensaios, a temperatura no ensaio apenas com óleo 5W40 alcançou 68°C , apresentando uma variação térmica de 31°C . Em contraste, no ensaio com aditivo, a temperatura final foi de 58°C , com uma amplitude térmica de 23°C . Portanto, o ensaio com apenas óleo 5W40 exibiu um aumento mais rápido expressivo de temperatura, considerando a velocidade em que a temperatura chegou aos 50°C , a amplitude térmica e a temperatura final mais elevada.

4.2.6.4 Superfícies desgastadas

As figuras das superfícies do pino e do disco após os ensaios (Figura 46 e Figura 49) revelam semelhanças notáveis nos mecanismos de desgaste. Contudo, no disco do ensaio com óleo 5W40, há evidências mais acentuadas de deformação plástica, indicando uma maior incidência do mecanismo de adesão, possivelmente relacionado aos dados de temperatura mais elevados nesse ensaio. Nesse ensaio, também é possível observar mais evidências que indicam a ocorrência do mecanismo de fadiga.

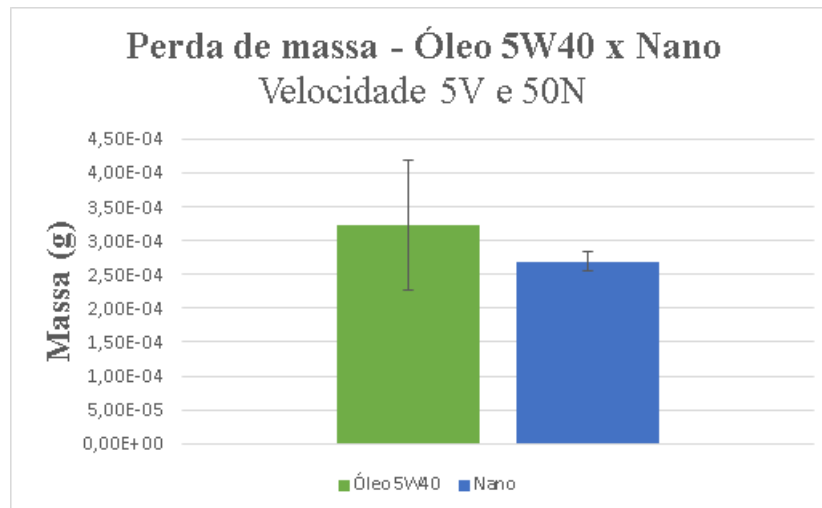
Além disso, é interessante observar diferenças claras nos tamanhos das elipsóides e das trilhas entre os ensaios, sendo que as do ensaio com aditivo são menores.

4.2.6.5 Desgaste

A partir da Figura 50, é possível fazer uma comparação visual dos valores de perda de massa nos ensaios de interesse. Ao analisar o gráfico, nota-se uma redução significativa da perda de massa, aproximadamente 16,5% em relação ao valor médio, ao utilizar o aditivo Nano®. No entanto, ao considerar os valores de erro relacionados ao desvio padrão de massa, percebe-se que as perdas nas diferentes condições de lubrificação estão dentro

do intervalo de erro comum. Portanto, não é possível afirmar a redução do desgaste nos ensaios com 50N de carregamento com base nos dados disponíveis.

Figura 50 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios de velocidade 5V e 50N de carga, nas configurações de lubrificação: lubrificado apenas com óleo 5W40 e lubrificado com mistura óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.



Fonte: Autor, 2023.

4.2.7 Comparativo dos ensaios com diferentes cargas

Uma outra abordagem útil para comparações é analisar ensaios sob as mesmas condições de lubrificação e velocidade (5V), porém com diferentes cargas. Abaixo, apresentam-se comparativos relacionados a ensaios com diferentes cargas.

4.2.7.1 Força e coeficiente de atrito

Em geral, independentemente da lubrificação, ao comparar os ensaios com 25N e 50N, observa-se nas curvas de força e coeficiente de atrito uma maior uniformidade nas curvas com maior carga. Ou seja, os ensaios com 25N apresentam um formato de curva com picos e vales com maior amplitude, ou seja, com oscilações mais relevantes durante todos os ensaios. Isso ocorre mesmo com médias maiores de força e coeficiente de atrito durante os ensaios para os com carregamento de 50N. Desta maneira, conclui-se que ao aumentar o carregamento, as curvas vão tomando uma configuração mais uniforme.

4.2.7.2 Temperatura

Em relação à temperatura, observa-se que o formato das curvas e a tendência de estabilização se mantêm para diferentes cargas. Entretanto, ao aumentar a carga normal dos ensaios, a temperatura final aumenta em todos os casos, independentemente da lubrificação.

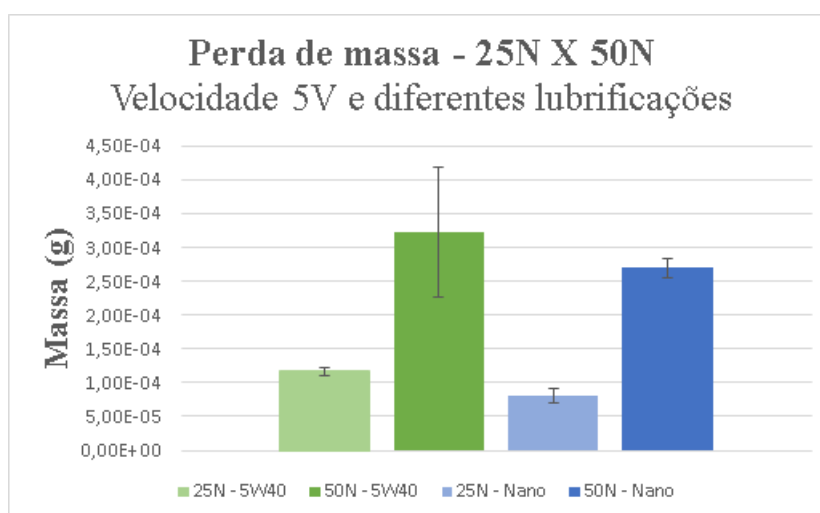
4.2.7.3 Superfícies

Ao levar em conta as superfícies, observa-se nas imagens que, em todos os casos, os mecanismos de desgaste e seus indícios estão presentes nos ensaios de mesma lubrificação independentemente da carga. Entretanto, é notável que a intensidade do desgaste e a presença dos mecanismos são, em geral, maiores nos ensaios com maior carregamento.

4.2.7.4 Desgaste

Ao considerar o desgaste, é evidente que os valores de perda de massa são maiores nos ensaios com maiores cargas, para as mesmas condições de lubrificação. Para observar visualmente esse comparativo, basta observar a [Figura 51](#).

Figura 51 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios com as mesmas condições de lubrificação, porém diferentes cargas.



Fonte: Autor, 2023.

4.3 Ensaios de 20 minutos na velocidade 1V - $1,13m/s$ de velocidade tangencial ($344RPM$)

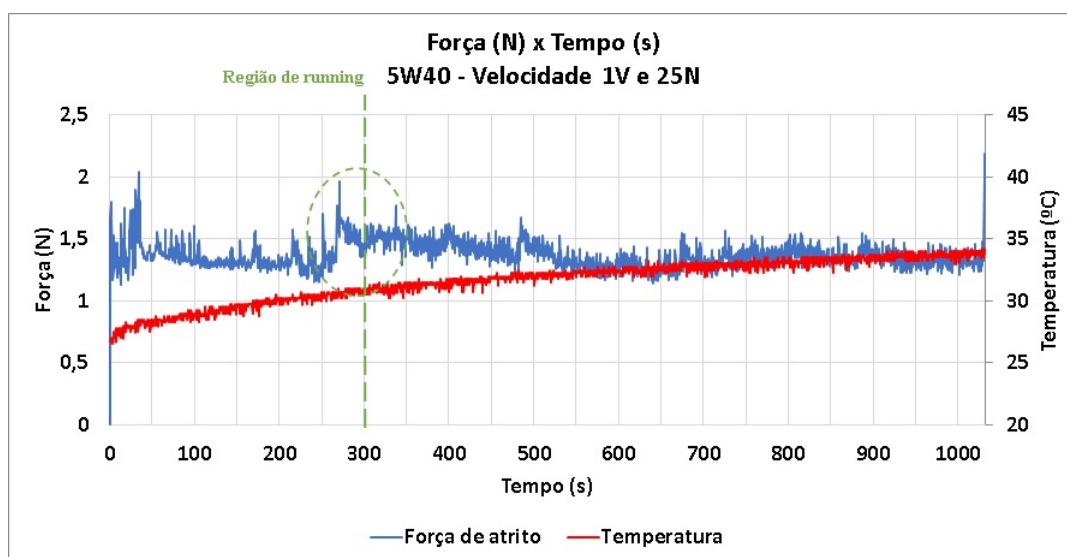
4.3.1 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 25N

4.3.1.1 Força de atrito

Ao examinar a curva de força de atrito na [Figura 52](#), é possível identificar que o período de *running*, tem uma duração de aproximadamente 300 segundos, conforme indicado pela linha verde. Durante esse intervalo, a curva atinge um pico em torno de $2,0N$ e, subsequentemente, mostra uma tendência à estabilização, permanecendo em valores próximos a $1,4N$.

Vale ressaltar as flutuações destacadas pelo círculo verde, as quais podem ser atribuídas à possível reintrodução de detritos resultantes do desgaste na região de contato (abrasão) ou ao descolamento de material (adesão).

Figura 52 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 1V.

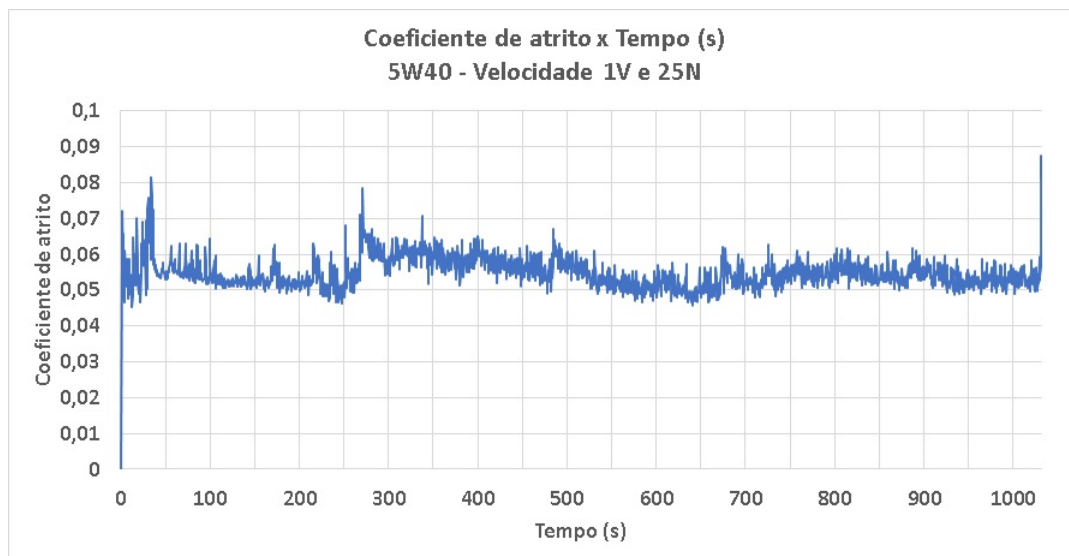


Fonte: Autor, 2023.

4.3.1.2 Coeficiente de atrito

Na [Figura 53](#), a curva representa os valores do coeficiente de atrito, indicado por " μ ". Essa curva é correlata ao gráfico de força de atrito mencionado anteriormente. Durante a maior parte do ensaio, os valores de " μ " mantêm-se entre 0,05 e 0,06, com um pico na região de *running* atingindo aproximadamente 0,08.

Figura 53 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 1V.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.1.3 Temperatura

Na [Figura 52](#), a análise do gráfico também permite a observação da curva de temperatura durante o ensaio. Inicialmente, a temperatura registrada é de aproximadamente 27°C , alcançando 30°C aos 200 segundos de ensaio.

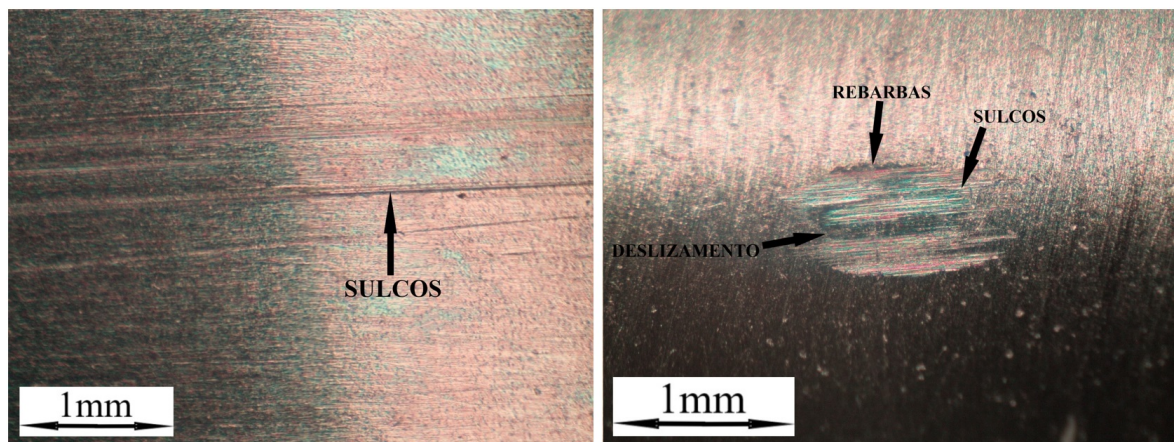
Além disso, nota-se que nos primeiros momentos do ensaio, o aumento de temperatura ocorre de forma mais intensa do que no final, indicando uma tendência à estabilização ao longo do tempo. Ao término do experimento, a temperatura atinge 34°C . Portanto, a variação térmica ao longo do ensaio totalizou 7°C .

4.3.1.4 Análise superficial

Na [Figura 54](#), a inspeção da superfície do disco (imagem da esquerda) revela uma trilha de desgaste evidenciada por sulcos e marcas de deslizamento que se estendem ao longo da trilha. Nesse contexto, a trilha parece ser predominantemente constituída por marcas de deslizamento geradas durante o ensaio, com micro sulcos adicionais resultantes de partículas abrasivas presentes na região de contato.

A análise da superfície do pino, localizado à direita na [Figura 54](#), sustenta a hipótese de desgaste abrasivo. Este desgaste é atribuído a pequenas partículas que se desprendem durante o contato, retornando à região de contato e gerando os sulcos observados. Além disso, é notável uma região que indica o movimento de deslizamento entre os corpos, evidenciada como uma espécie de mancha.

Figura 54 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 1V.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.1.5 Desgaste

A diminuição de massa no experimento foram documentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 1V, óleo 5W40 e 25N.

Ensaio lubrificado - 5W40	Massa perdida [$10^{-6}g$]
25N - 1V	$5,10 \pm 3,56$

Fonte: Autor, 2023.

4.3.2 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 25N

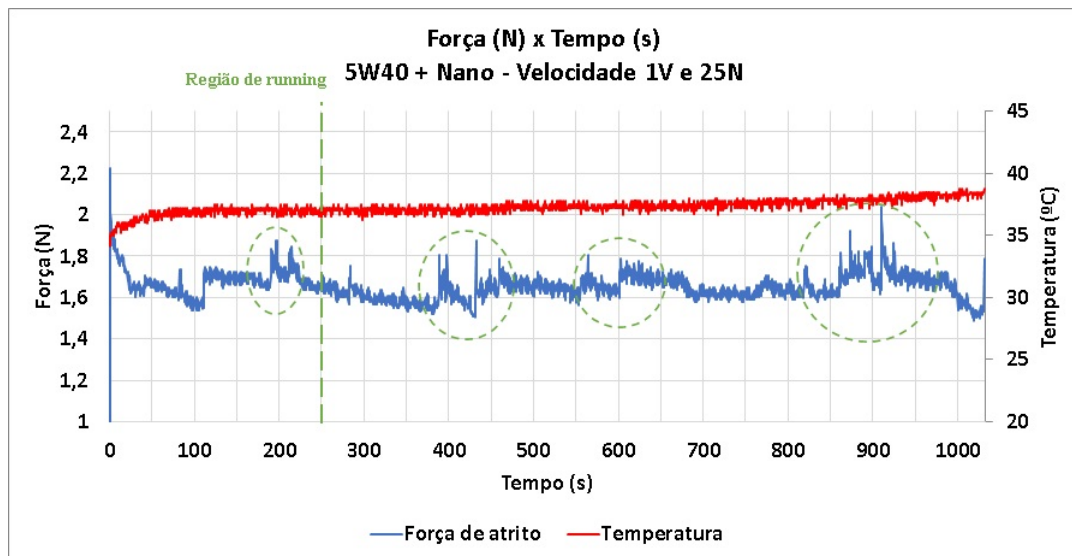
4.3.3 Ensaio lubrificado com a mistura 5W40 + Nano automotivo® - 25N

4.3.3.1 Força de atrito

Ao analisar a curva de força de atrito na [Figura 55](#), é possível identificar que o período de *running*, tem uma duração de aproximadamente 250 segundos, conforme indicado pela linha verde. Durante esse intervalo, a curva atinge um pico em torno de 2,3N e, posteriormente, demonstra uma tendência à estabilização, mantendo-se em valores próximos a 1,7N.

Além disso, é notável a presença de diversas oscilações nos períodos sinalizados no gráfico pelas marcações em verde, indicando possivelmente picos de desgaste abrasivo, provenientes da reintrodução de detritos na zona de contato.

Figura 55 – Gráfico da variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 1V.

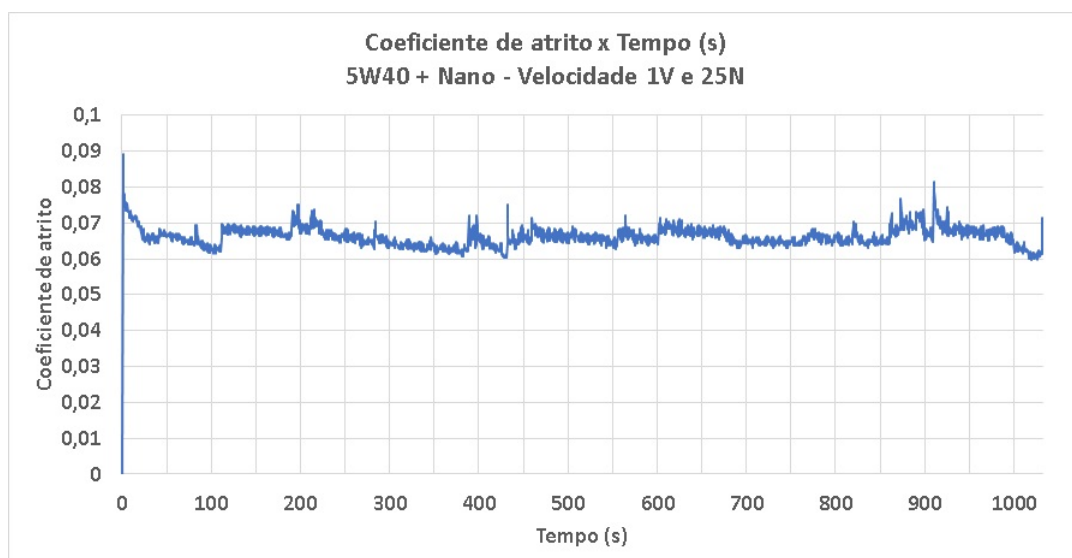


Fonte: Autor, 2023.

4.3.3.2 Coeficiente de atrito

Na Figura 56, a curva corresponde à do gráfico de força de atrito, mas neste caso, os valores do coeficiente de atrito são exibidos no eixo Y como " μ ". Durante a maior parte do ensaio, os valores de " μ " se situam entre 0,06 e 0,07, com um pico inicial de aproximadamente 0,09.

Figura 56 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 1V.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.3.3 Temperatura

Na [Figura 52](#), a análise do gráfico também permite observar a curva de temperatura durante o ensaio. Inicialmente, a temperatura registrada é de aproximadamente 34°C .

Além disso, é perceptível que nos primeiros momentos do ensaio, o aumento de temperatura ocorre de maneira mais pronunciada do que no final, sugerindo uma tendência à estabilização ao longo do tempo. Ao término do experimento, a temperatura atinge 38°C . Portanto, a variação térmica ao longo do ensaio totalizou 4°C .

4.3.3.4 Análise superficial

Na [Figura 57](#), ao examinar a superfície do disco, observa-se uma trilha de desgaste notável, embora relativamente pequena. Nesse contexto, a trilha parece ser predominantemente constituída por marcas de deslizamento geradas durante o ensaio, com micro sulcos adicionais resultantes de partículas abrasivas presentes na região de contato.

A análise da superfície do pino, posicionado à direita na [Figura 57](#), reforça a hipótese de desgaste abrasivo. Além disso, é visível uma mancha com formato elipsoidal, indicando uma deformação plástica generalizada na superfície, resultado do movimento de deslizamento entre os corpos.

Figura 57 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 25N e velocidade 1V.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.3.5 Desgaste

A perda de massa no experimento foram documentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 1V, óleo 5W40 + Nano® e 25N.

Ensaio lubrificado - 5W40 + Nano®	Massa perdida [$10^{-7}g$]
25N - 1V	$7,95 \pm 1,13$

Fonte: Autor, 2023.

4.3.4 Comparativo dos ensaios com 25N em diferentes condições de lubrificação

Comparativo realizado para ensaios sob as mesmas condições de carregamento (25N) e velocidade (1V) mas variando a lubrificação.

4.3.4.1 Força de atrito

Após a fase inicial de *running*, evidenciada nos gráficos dos dois ensaios (Figura 52 e Figura 55), as curvas se estabilizam valores distintos: aproximadamente 1,4N no ensaio com o óleo 5W40 e 1,7N no ensaio com a introdução do Nano Automotivo®.

Ao examinar os gráficos, destaca-se que no ensaio com o óleo 5W40, a curva exibe mais picos e vales, com uma amplitude mais acentuada. Em contrapartida, no ensaio com Nano automotivo®, há períodos mais evidentes de instabilidade, identificados em verde.

Em resumo, os valores de força de atrito foram mais elevados no ensaio com a adição de Nano®. No entanto, a curva apresenta uma configuração mais uniforme ao longo do ensaio, apesar dos períodos notáveis de instabilidade. Isso contrasta com o ensaio utilizando apenas o óleo 5W40, onde picos e vales são consistentemente observados ao longo do gráfico

4.3.4.2 Coeficiente de atrito

No ensaio exclusivo com lubrificação utilizando o óleo 5W40, o coeficiente de atrito, após a estabilização, variou entre 0,05 e 0,06. No entanto, no ensaio com a adição de Nano®, os valores situaram-se em uma faixa semelhante, variando de 0,06 a 0,07. Dessa forma, conforme indicado pelos gráficos de força de atrito, a média dos valores do coeficiente de atrito no ensaio com aditivo foi maior do que no ensaio apenas com o óleo 5W40.

4.3.4.3 Temperatura

Ao analisar os dados de temperatura nos gráficos de força de atrito (Figura 37 e Figura 40), observa-se que os ensaios iniciaram com temperaturas distintas, variando em 7°C, com o ensaio apenas com óleo começando a 27°C e o com aditivo a 34°C. Durante os ensaios, a temperatura apresentou uma taxa inicial mais elevada de crescimento, que

diminuiu ao longo do tempo. As curvas exibem um formato semelhante, indicando uma tendência de estabilização.

Ao término dos ensaios, a temperatura no ensaio apenas com óleo 5W40 atingiu 34°C, com uma variação térmica de 7°C. Por outro lado, no ensaio com aditivo, a temperatura final foi de 38°C, com uma amplitude térmica de 4°C. Assim, o ensaio com apenas óleo 5W40 apresentou uma maior amplitude, mas sua temperatura inicial é relativamente mais baixa, resultando em uma diferença não muito significativa entre as temperaturas dos ensaios em diferentes condições de lubrificação.

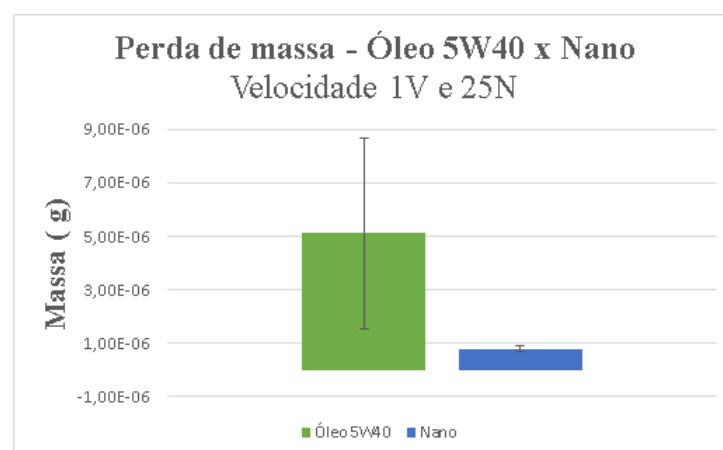
4.3.4.4 Superfícies desgastadas

Ao comparar as figuras que representam as superfícies do pino e do disco após os ensaios (Figura 46 e Figura 49), nota-se, na do ensaio com óleo 5W40, evidências mais acentuadas de desgaste do tipo abrasivo, caracterizado por sulcos mais pronunciados. Além disso, é interessante observar diferenças nítidas nos tamanhos das elipsóides e das trilhas entre os ensaios, sendo que aquelas do ensaio com aditivo são menores.

4.3.4.5 Desgaste

A partir da Figura 58, é possível realizar uma comparação visual dos valores de perda de massa nos ensaios em questão. Ao examinar o gráfico, observa-se uma redução significativa da perda de massa, aproximadamente 84% em relação ao valor médio, ao utilizar o aditivo Nano®. Além disso, ao levar em consideração os valores de erro associados ao desvio padrão do desgaste, nota-se que o desgaste permanece menor. Portanto, é possível afirmar que houve uma redução na perda de massa com a utilização do aditivo nas condições avaliadas.

Figura 58 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios de velocidade 1V e 25N de carga, nas configurações de lubrificação: lubrificado apenas com óleo 5W40 e lubrificado com mistura óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.



Fonte: Autor, 2023.

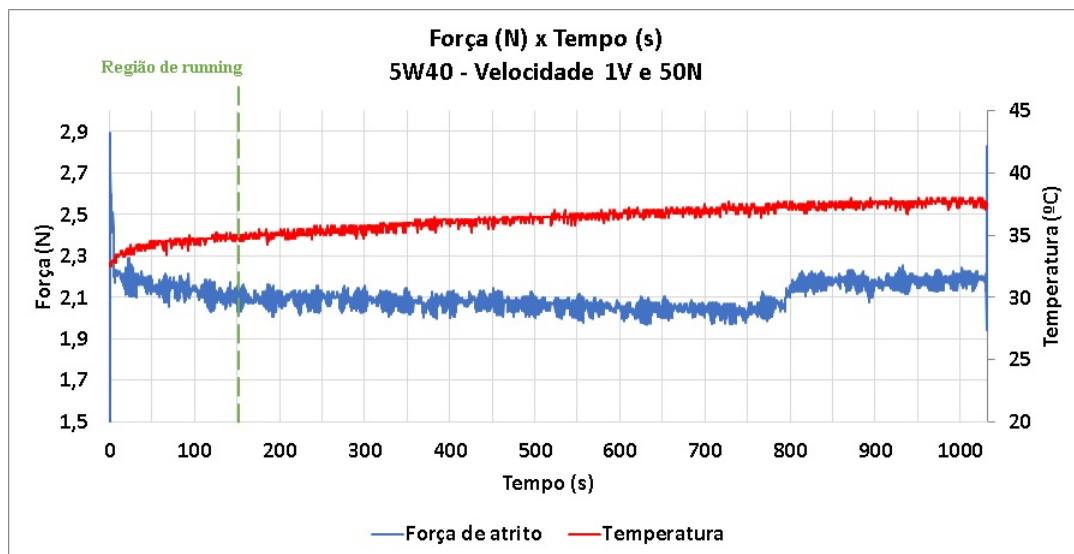
4.3.5 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 50N

4.3.5.1 Força de atrito

Ao examinar a curva de força de atrito na [Figura 59](#), observa-se que o período de *running* tem uma duração de aproximadamente 150 segundos, como evidenciado pela linha verde. Durante esse intervalo, a curva atinge um pico inicial em torno de 2,8N e, posteriormente, demonstra uma tendência à estabilização, mantendo-se em valores próximos a 2,1N.

É relevante ressaltar a ausência de oscilações com grandes amplitudes nos valores de força, diferentemente do ensaio com 25N, apesar da presença de várias oscilações de baixa intensidade. Assim, não foi indicada nenhuma região de instabilidade no gráfico após o *running*.

Figura 59 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 1V.

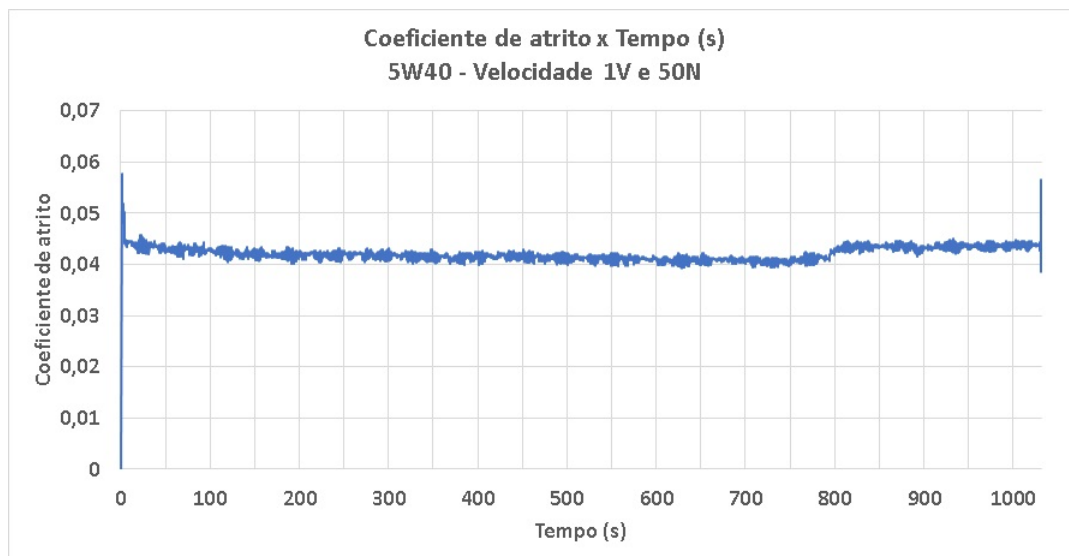


Fonte: Autor, 2023.

4.3.5.2 Coeficiente de atrito

Na [Figura 45](#), a curva representa os valores do coeficiente de atrito, indicado por " μ ". Esta curva é correlata ao gráfico de força de atrito mencionado anteriormente. Durante a maior parte do ensaio, os valores de " μ " permanecem situados entre 0,04 e 0,05, com um pico inicial atingindo aproximadamente 0,06.

Figura 60 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 1V.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.5.3 Temperatura

Na [Figura 59](#), a análise do gráfico também permite observar a curva de temperatura durante o ensaio. Inicialmente, a temperatura registrada é de aproximadamente 33°C .

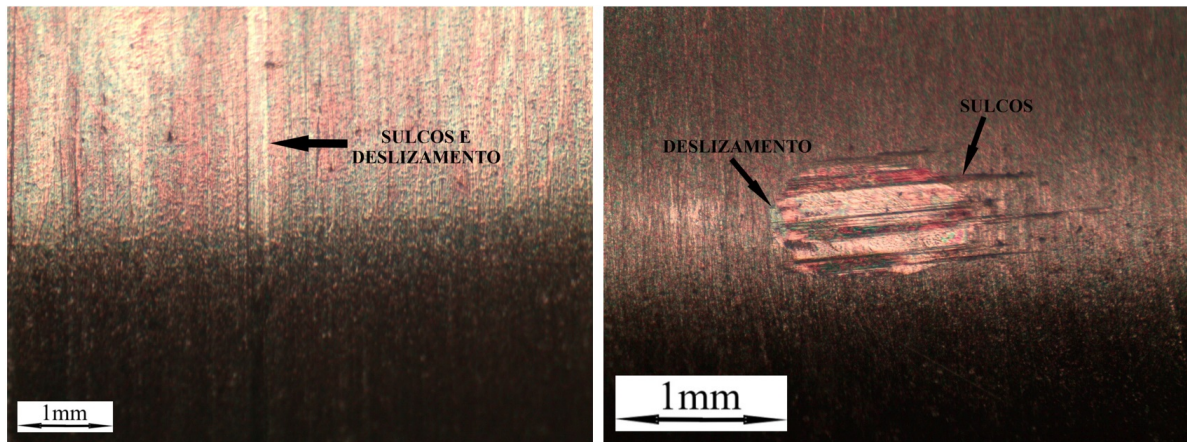
Além disso, é perceptível que nos primeiros momentos do ensaio, o aumento de temperatura ocorre de maneira mais pronunciada do que no final, sugerindo uma tendência à estabilização ao longo do tempo. Ao término do experimento, a temperatura atinge 37°C . Portanto, a variação térmica ao longo do ensaio totalizou 4°C .

4.3.5.4 Análise superficial

Na [Figura 61](#), ao examinar a superfície do disco, destaca-se uma trilha de desgaste bem definida, principalmente composta por marcas de deslizamento, acompanhadas por microsulcos que requerem uma observação cuidadosa para serem identificados. Esses microsulcos são gerados pela presença de partículas abrasivas reintroduzidas na região de contato.

A análise da superfície do pino, localizado à direita na [Figura 61](#), reforça a hipótese do deslizamento predominante, evidenciado por uma região plana e uma deformação plástica generalizada. Além disso, são observados sulcos que corroboram a presença do desgaste abrasivo, embora em menor intensidade quando comparado ao deslizamento.

Figura 61 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 1V.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.5.5 Desgaste

A diminuição de massa no experimento foram documentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 1V, óleo 5W40 e 50N.

Ensaio lubrificado - 5W40	Massa perdida [$10^{-5}g$]
50N - 1V	1,05 ± 0,15

Fonte: Autor, 2023.

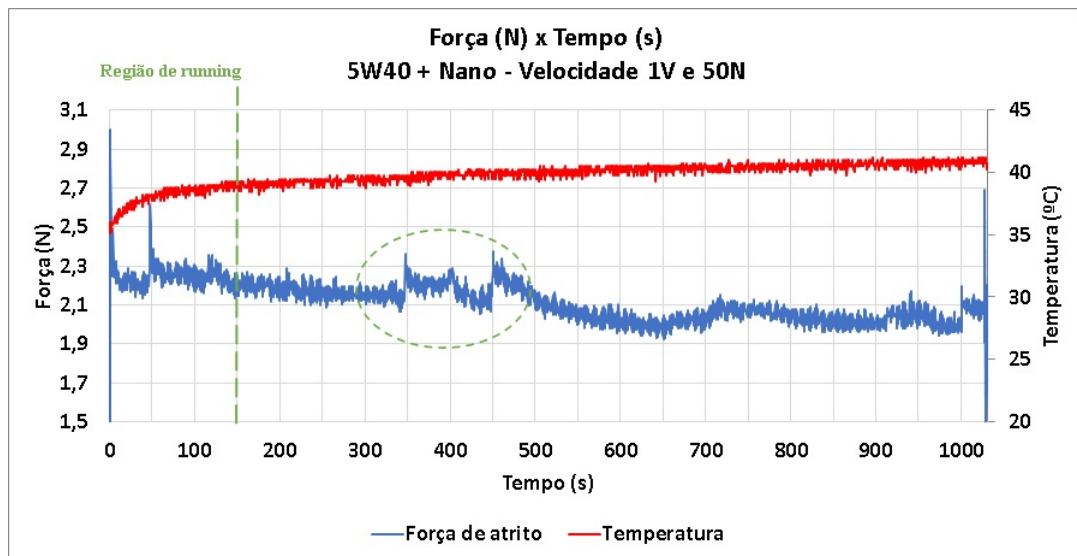
4.3.6 Ensaio lubrificado com a mistura 5W40 + Nano automotivo® - 50N

4.3.6.1 Força de atrito

Ao analisar a curva de força de atrito na [Figura 62](#), observa-se que o período de *running* tem uma duração de aproximadamente 150 segundos, como evidenciado pela linha verde. Durante esse intervalo, a curva atinge um pico inicial em torno de 3,0N e, subsequentemente, demonstra uma tendência à estabilização, mantendo-se em valores próximos a 2,2N.

Adicionalmente, é notável a presença de oscilações no período sinalizado no gráfico pela marcação em verde, indicando possíveis picos de desgaste abrasivo.

Figura 62 – Gráfico de variação da força de atrito e da temperatura em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 1V.

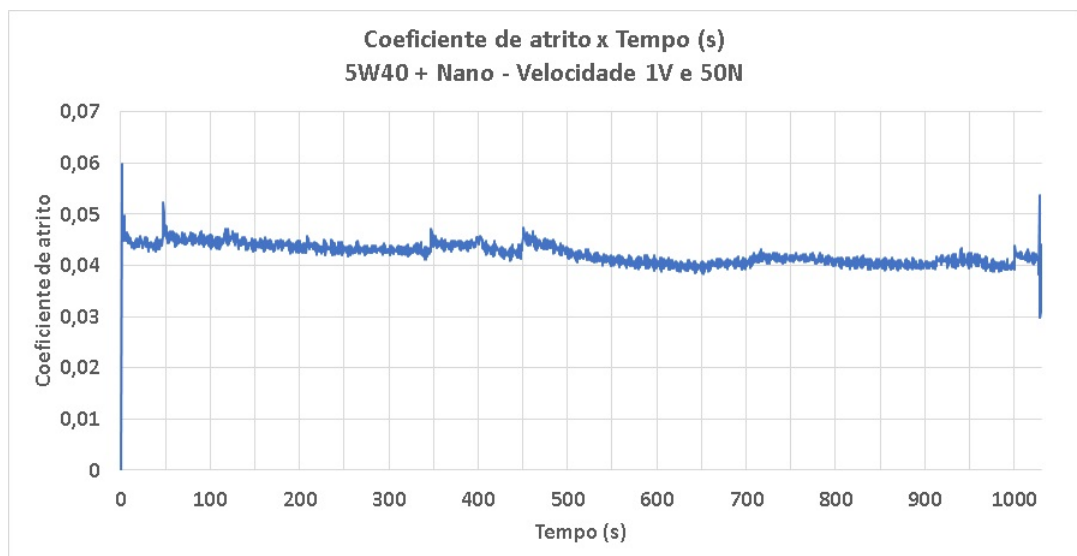


Fonte: Autor, 2023.

4.3.6.2 Coeficiente de atrito

Na Figura 48, a curva representa os valores do coeficiente de atrito, expresso como " μ ". Essa representação está associada ao gráfico anterior de força de atrito. Ao longo da maior parte do ensaio, os valores de " μ " permanecem na faixa de 0,04 a 0,05, atingindo um pico inicial em torno de 0,06.

Figura 63 – Gráfico da variação do coeficiente de atrito em função do tempo de ensaio. Ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 1V.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.6.3 Temperatura

Na [Figura 59](#), a análise do gráfico também possibilita a observação da curva de temperatura durante o ensaio. Inicialmente, a temperatura registrada é de aproximadamente 35°C .

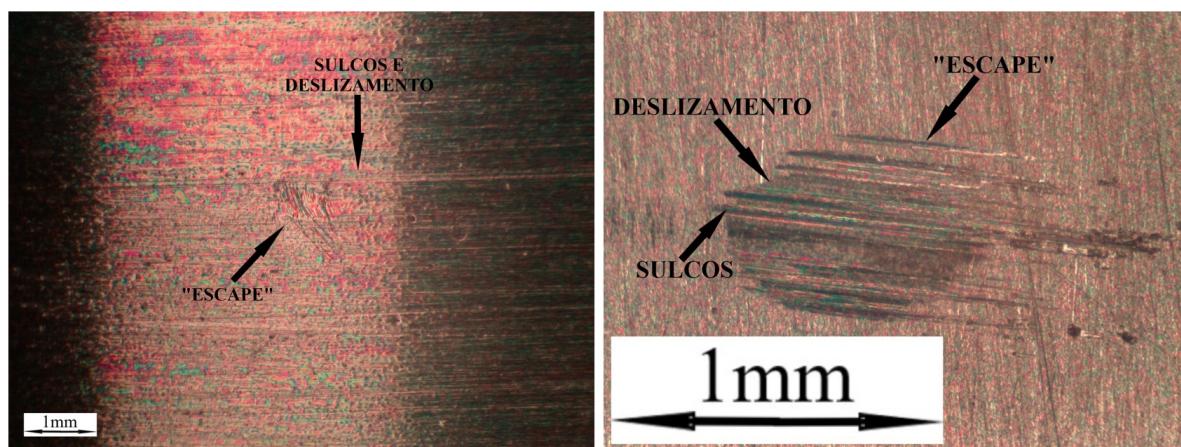
Além disso, é evidente que nos primeiros momentos do ensaio, o aumento de temperatura ocorre de forma mais acentuada do que no final, indicando uma tendência à estabilização ao longo do tempo. Ao término do experimento, a temperatura atinge 41°C . Portanto, a variação térmica ao longo do ensaio totalizou 6°C .

4.3.6.4 Análise superficial

Na [Figura 61](#), ao examinar a superfície do disco, destaca-se uma trilha de desgaste bem definida, embora pequena na imagem. Essa trilha é predominantemente composta por marcas de abrasão, representadas por microsulcos, e pelo deslizamento entre os corpos. Nota-se também uma região denominada "escape", onde aparentemente ocorria o deslizamento lateral do pino sobre o disco, resultando no aspecto combinado de deslizamento e abrasão nessa área de escape.

A análise da superfície do pino, posicionado à direita na [Figura 57](#), reforça a hipótese de desgaste abrasivo, evidenciado pelos microsulcos na trilha do disco e pelos sulcos presentes na superfície do pino. Além disso, é visível uma mancha com formato elipsoidal, indicando uma deformação plástica generalizada na superfície, resultante do movimento de deslizamento entre os corpos. Observa-se ainda que, além da região da elipse, há sulcos distintos, possivelmente formados durante o momento de "escape".

Figura 64 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) sob as seguintes condições: 50N e velocidade 1V.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.6.5 Desgaste

A diminuição de massa no experimento estão registrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 1V, óleo 5W40 + Nano® e 50N.

Ensaio lubrificado - 5W40 + Nano®	Massa perdida [$10^{-6}g$]
50N - 1V	3,18 ± 0,37

Fonte: Autor, 2023.

4.3.7 Comparativo dos ensaios com 50N em diferentes condições de lubrificação

Comparativo realizado para ensaios sob as mesmas condições de carregamento (50N) e velocidade (1V) mas variando a lubrificação.

4.3.7.1 Força de atrito

Após a fase inicial de acomodação (*running*), evidenciada nos gráficos dos dois ensaios (Figura 52 e Figura 55) as curvas se estabilizam em valores semelhantes: aproximadamente 2,1N no ensaio com o óleo 5W40 e 2,2N no ensaio com a introdução do Nano Automotivo®.

Ao examinar os gráficos, destaca-se que no ensaio com o óleo 5W40 com adição de Nano automotivo® há um período evidente de instabilidade, que pode ser responsável pelos sulcos visíveis. Em resumo, os valores de força de atrito foram mais elevados no ensaio com a adição de Nano®.

4.3.7.2 Coeficiente de atrito

No ensaio exclusivo com lubrificação utilizando o óleo 5W40, o coeficiente de atrito, após a estabilização, variou entre 0,05 e 0,06. No entanto, no ensaio com a adição de Nano®, os valores situaram-se em uma faixa semelhante, variando de 0,04 a 0,05. Dessa forma, conforme indicado pelos gráficos de força de atrito, a média dos valores do coeficiente de atrito no ensaio com aditivo foi maior do que no ensaio apenas com o óleo 5W40.

4.3.7.3 Temperatura

Ao analisar os dados de temperatura nos gráficos de força de atrito (Figura 37 e Figura 40), observa-se que os ensaios iniciaram com temperaturas semelhantes, variando em apenas 2°C, com o ensaio apenas com óleo começando a 33°C e o com aditivo a 35°C. Durante os ensaios, a temperatura apresentou uma taxa inicial mais elevada de crescimento, que diminuiu ao longo do tempo, indicando uma tendência de estabilização.

Ao término dos ensaios, a temperatura no ensaio apenas com óleo 5W40 atingiu 37°C, com uma variação térmica de 4°C. Por outro lado, no ensaio com aditivo, a temperatura final foi de 41°C, com uma amplitude térmica de 7°C. Assim, o ensaio com apenas óleo 5W40 apresentou uma menor amplitude, porém não resultando em uma diferença muito significativa com as temperaturas do ensaios com aditivo. É relevante destacar que as curvas apresentaram um formato bastante semelhante.

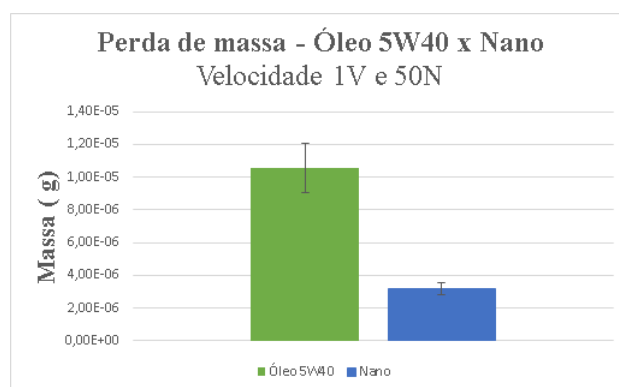
4.3.7.4 Superfícies desgastadas

Ao comparar as figuras que representam as superfícies do pino e do disco após os ensaios (Figura 46 e Figura 49), nota-se, na do ensaio com óleo 5W40 e adição de Nano®, evidências mais acentuadas de desgaste do tipo abrasivo, caracterizado por sulcos mais pronunciados, possivelmente causados pelo escape. Além disso, é interessante observar diferenças nítidas nos tamanhos das elipsóides e das trilhas entre os ensaios, sendo que aquelas do ensaio com aditivo são menores.

4.3.7.5 Desgaste

A partir da Figura 65, é possível realizar uma comparação visual dos valores de perda de massa nos ensaios em questão. Ao examinar o gráfico, observa-se uma redução significativa da perda de massa, aproximadamente 70% em relação ao valor médio, ao utilizar o aditivo Nano®. Além disso, ao levar em consideração os valores de erro associados ao desvio padrão do desgaste, nota-se que o desgaste permanece significativamente menor. Portanto, é possível afirmar que houve uma redução real na perda de massa com a utilização do aditivo nas condições avaliadas.

Figura 65 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios de velocidade 1V e 50N de carga, nas configurações de lubrificação: lubrificado apenas com óleo 5W40 e lubrificado com mistura óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.



Fonte: Autor, 2023.

4.3.8 Comparativo dos ensaios com diferentes cargas

Comparativo realizado para ensaios sob as mesmas condições de lubrificação e velocidade (1V) mas variando a carga.

4.3.8.1 Força e coeficiente de atrito

Em geral, independentemente da lubrificação, ao comparar os ensaios com 25N e 50N, observa-se nas curvas de força e coeficiente de atrito uma maior uniformidade nas curvas com maior carga. Ou seja, os ensaios com 25N apresentam um formato de curva com picos e vales com maior amplitude, com oscilações mais relevantes durante todos os ensaios. Desta maneira, conclui-se que ao aumentar o carregamento, as curvas vão tomando uma configuração mais uniforme.

4.3.8.2 Temperatura

Em relação à temperatura, observa-se que o formato das curvas e a tendência de estabilização se mantêm para diferentes cargas. Entretanto, ao aumentar a carga normal dos ensaios, a temperatura final aumenta em todos os casos, independentemente da lubrificação.

4.3.8.3 Superfícies

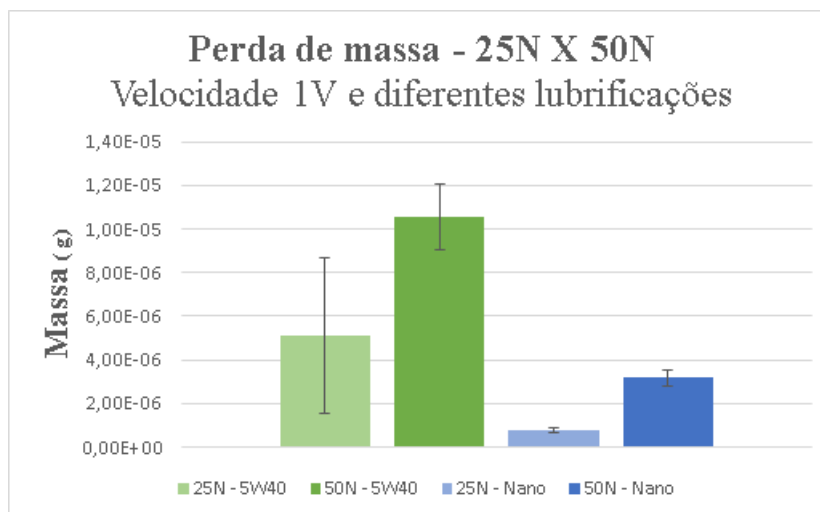
Ao levar em conta as superfícies, observa-se nas imagens que, em todos os casos, os mecanismos de desgaste e seus indícios estão presentes nos ensaios de mesma lubrificação independentemente da carga. Entretanto, é notável que a intensidade do desgaste e a presença dos mecanismos são, em geral, mais acentuados nos ensaios com maior carregamento.

4.3.8.4 Desgaste

Ao considerar o desgaste, é evidente que os valores de perda de massa são maiores nos ensaios com maiores cargas, para as mesmas condições de lubrificação. Para observar visualmente esse comparativo, basta observar a [Figura 66](#).

A partir dos dados expostos no gráfico, é possível concluir que para os ensaios com 5W40 houve um aumento de aproximadamente 2,07 vezes no valor médio com aumento da carga de 25N para 50N. Já para o ensaio lubrificado com a adição de Nano®, o aumento foi ainda maior, de cerca de 4,01 vezes.

Figura 66 – Gráfico comparativo da perda de massa dos ensaios com as mesmas condições de lubrificação, porém diferentes cargas.



Fonte: Autor, 2023.

4.4 Comparativo entre os ensaios com diferentes velocidades

Os comparativos desta seção foram realizados para ensaios sob as mesmas condições de carregamento e lubrificação mas variando a velocidade.

4.4.0.1 Força e coeficiente de atrito

Apesar da alteração significativa na velocidade, que difere em magnitude por um fator de 5 vezes entre os ensaios, a força e o coeficiente de atrito não acompanharam essas mudanças de forma proporcional. Como citado anteriormente nas leis do atrito, a força de atrito independe da velocidade. Desta maneira, a diferença entre os valores após a estabilização (pós *running*) não é significativa.

4.4.0.2 Temperatura

Em relação à temperatura, os ensaios realizados em uma maior velocidade (5V - $5,67m/s$) atingiram temperaturas muito superiores às do ensaio com velocidade 1V, chegando a valores entre $20^{\circ}C$ e $30^{\circ}C$ a mais.

4.4.0.3 Superfícies

Ao observar e comparar as superfícies desgastadas em diferentes velocidades, é possível concluir que mesmo com alterações mínimas nos valores de força e coeficiente de atrito, as imagens de diferentes velocidades exibem desgastes substancialmente distintos. Entretanto, é possível identificar evidências de mecanismos de desgaste em comum, porém, nos ensaios de velocidade 1V não existem indícios de ocorrência dos mecanismos de adesão e de fadiga.

Além disso, os ensaios na velocidade 5V percorrem uma distância linear 5 vezes maior que o ensaio de menor velocidade, sendo essa a justificativa para a realização de ensaios de 4 minutos em 5V, pois possuem a mesma distância linear dos ensaios 1V.

A diferença significativa de temperatura citada anteriormente pode ser fundamental para a atuação do mecanismo de desgaste por adesão, e até mesmo por fadiga, observados nos ensaios de velocidade 5V, os quais não apresentam indícios de ocorrência nos ensaios de menor velocidade.

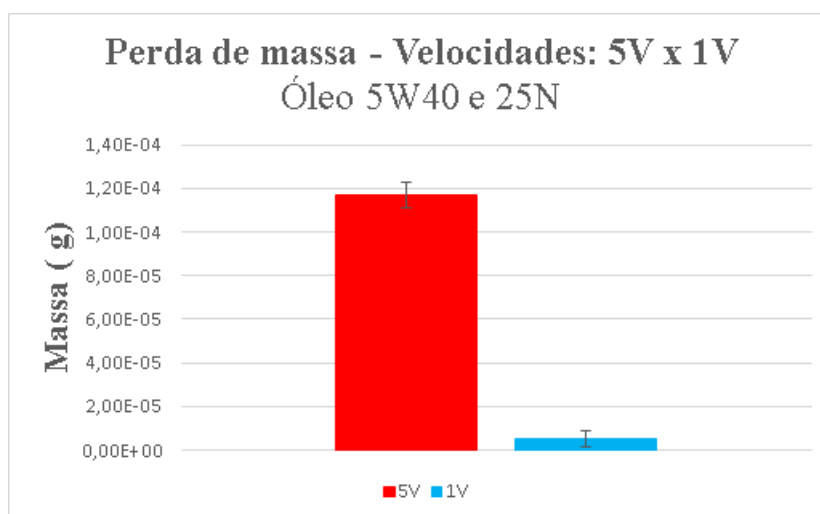
4.4.0.4 Desgaste

Os gráficos apresentados abaixo evidenciam a discrepância na perda de massa entre os ensaios conduzidos em diferentes velocidades. Considerando também os valores de força e coeficiente de atrito, destaca-se a notável contraposição nos valores de perda de massa.

Entretanto, com os dados apresentados, é possível concluir que os experimentos realizados em maior velocidade possuem uma maior perda de massa, tornando a velocidade um fator de alta influência no desgaste. A temperatura, por exemplo, também é um fator relevante, conforme observado nos dados, porém a velocidade está correlacionada à temperatura durante o ensaio.

Além disso, é importante ressaltar que na fase mais crítica do ensaio, particularmente na região de "running", ocorre uma taxa de desgaste mais elevada, sugerindo que, com a velocidade mais alta, o desgaste é ainda mais acentuado.

Figura 67 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades nas configurações: 25N de carga e lubrificado apenas com óleo 5W40.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 68 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades nas configurações: 25N de carga e lubrificado com óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.

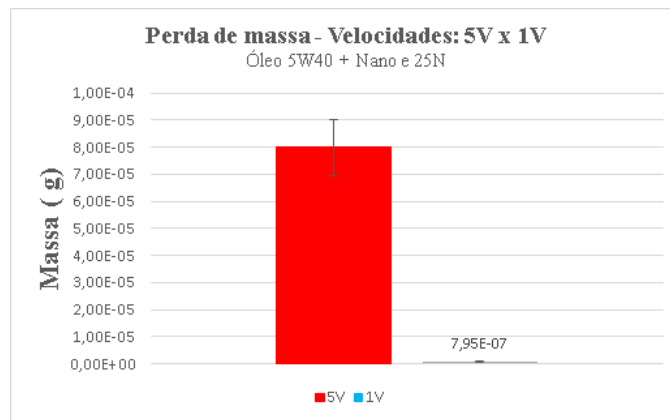


Figura 69 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades nas configurações: 50N de carga e lubrificado apenas com óleo 5W40.

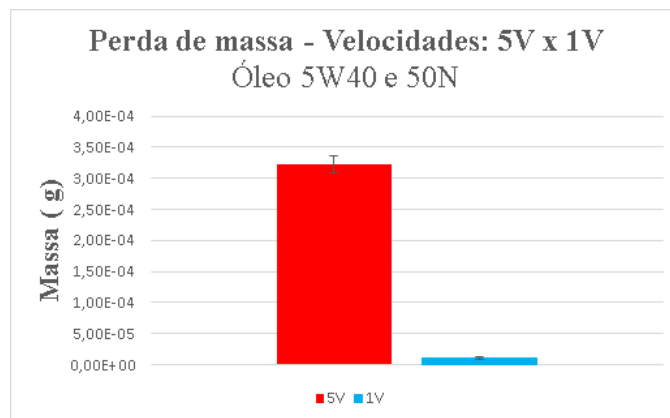
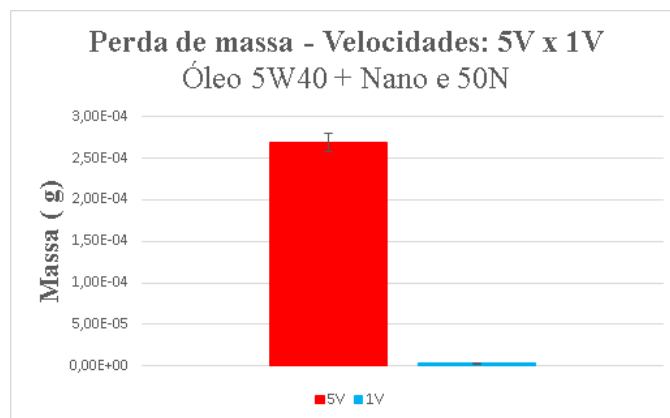


Figura 70 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades nas configurações: 50N de carga e lubrificado com óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.



4.5 Ensaios de 4 minutos e com velocidade 5V - $5,67m/s$ de velocidade tangencial e $1720RPM$

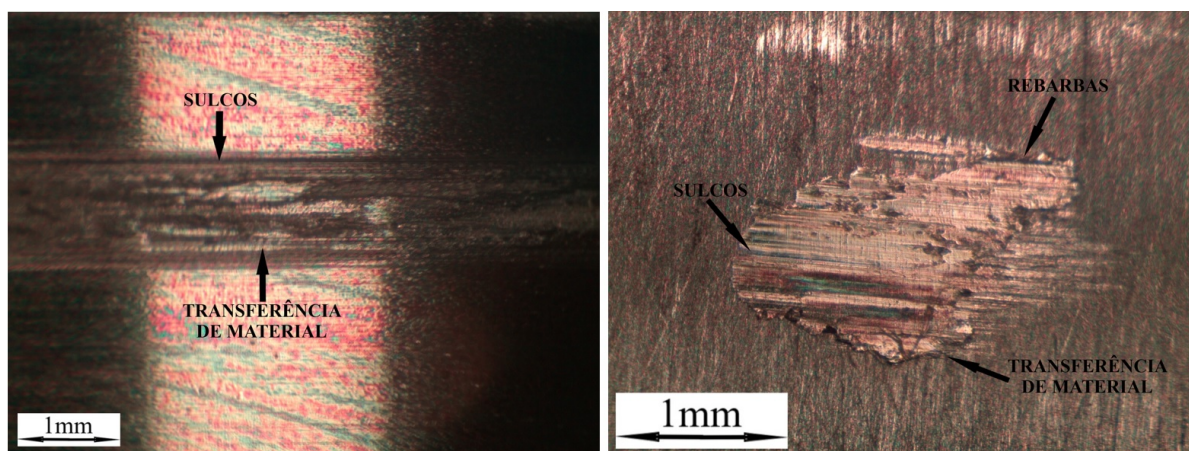
4.5.1 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 25N

4.5.1.1 Análise superficial

Ao analisar a imagem à esquerda da [Figura 71](#), é possível observar a superfície desgastada do disco. Conforme evidenciado na imagem, destacam-se a presença significativa de sulcos, indicativos de desgaste por abrasão, juntamente com a ocorrência de transferência de material, manifestada pelo depósito ou descolamento de material. Esses elementos são características do mecanismo de adesão. Além disso, observam-se crateras, características da fadiga.

No pino posicionado à direita da figura, são evidentes sinais dos mesmos mecanismos de desgaste presentes no disco, como abrasão e adesão. Adicionalmente, observam-se indícios de fadiga, manifestados por rebarbas com características de fraturas frágeis.

Figura 71 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) de 4 minutos sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.5.1.2 Desgaste

A diminuição de massa no experimento foi registrada na Tabela abaixo.

Tabela 13 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, 4 minutos, óleo 5W40 e 25N.

Ensaio lubrificado - 5W40	Massa perdida	Massa perdida [$10^{-5}g$]
4min - 5V - 25N		$8,12 \pm 1,78$

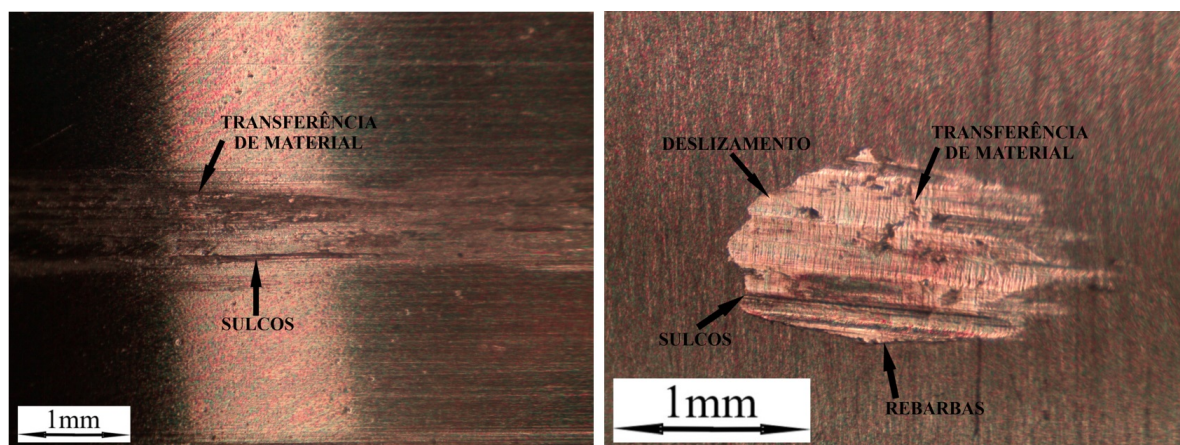
4.5.2 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 e + Nano Automotivo® - 25N

4.5.2.1 Análise superficial

Ao examinar a imagem à esquerda da [Figura 72](#), é possível observar a superfície desgastada do disco. Como evidenciado na imagem, notam-se sulcos proeminentes, indicativos do desgaste por abrasão, juntamente com a presença de transferência de material, destacada pelo depósito de material na região indicada, traços característicos do mecanismo de adesão.

No pino posicionado à direita na figura, são evidentes sinais dos mesmos mecanismos de desgaste presentes no disco, tais como abrasão e adesão. Adicionalmente, observa-se uma deformação plástica generalizada na superfície, característica do deslizamento, e indícios de fadiga, manifestados por rebarbas com características de fraturas frágeis.

Figura 72 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) de 4 minutos sob as seguintes condições: 25N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.5.2.2 Desgaste

Os registros na Tabela 14 apresentam os detalhes da diminuição de massa no experimento.

Tabela 14 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, 4 minutos, óleo 5W40 + Nano® e 25N.

Ensaio lubrificado - 5W40 + Nano®	Massa perdida	Massa perdida [$10^{-5}g$]
4min - 5V - 25N		5,87 ± 1,79

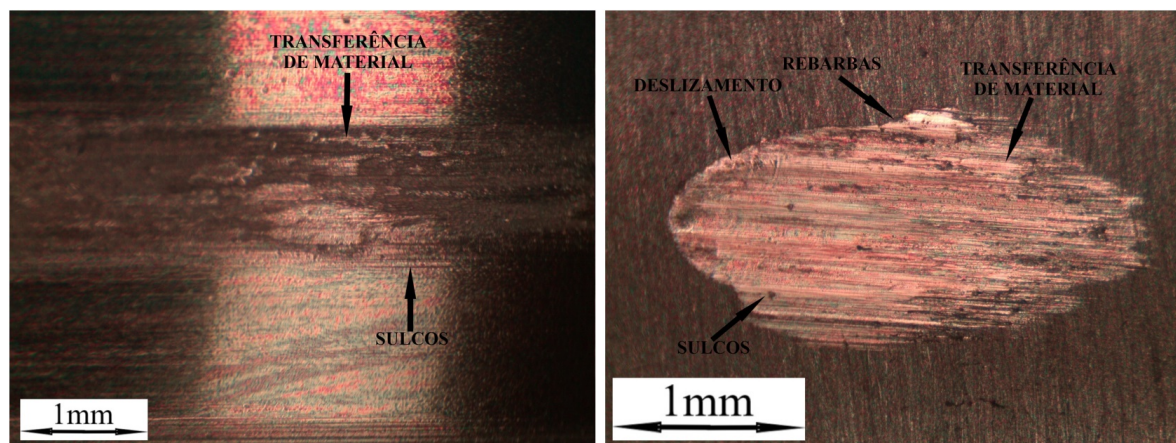
4.5.3 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 - 50N

4.5.3.1 Análise superficial

Na imagem à esquerda da [Figura 73](#), a superfície desgastada do disco exibe sulcos evidentes, indicativos de desgaste por abrasão, e uma notável transferência de material, caracterizada pelo depósito e descolamento de material, sinalizando o mecanismo de adesão.

No pino à direita, são notáveis sinais dos mesmos mecanismos de desgaste presentes no disco, incluindo abrasão e adesão. Além disso, observa-se uma deformação plástica generalizada na superfície, indicativa de deslizamento, e indícios de fadiga, manifestados por rebarbas com características de fraturas frágeis.

Figura 73 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40) de 4 minutos sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.5.3.2 Desgaste

A Tabela 15 fornece informações sobre a perda de massa no experimento.

Tabela 15 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, 4 minutos, óleo 5W40 e 50N.

Ensaio lubrificado - 5W40	Massa perdida	Massa perdida [$10^{-4}g$]
4min - 5V - 50N		1,73 ± 0,15

4.5.4 Ensaio lubrificado com óleo 5W40 + Nano Automotivo® - 50N

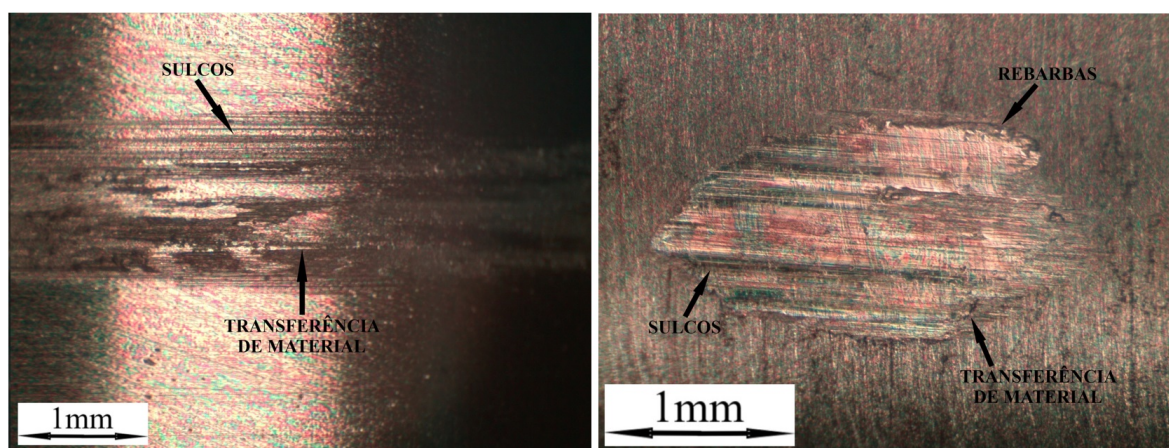
4.5.4.1 Análise superficial

Na imagem à esquerda da [Figura 73](#), o disco apresenta sulcos evidentes, indicativos de desgaste por abrasão, e uma marcante transferência de material, indicando o mecanismo

de adesão. Adicionalmente, são observadas crateras, que podem ser indicativos de desgaste por adesão e/ou por fadiga.

No pino à direita, observam-se indícios dos mesmos mecanismos de desgaste do disco, como abrasão e adesão. Além disso, há uma deformação plástica generalizada na superfície, sugerindo deslizamento, e evidências de fadiga, indicadas por rebarbas com características de fraturas frágeis.

Figura 74 – Superfície do disco (esquerda) e do pino (direita), após ensaio lubrificado (5W40 + Nano®) de 4 minutos sob as seguintes condições: 50N e velocidade 5V.



Fonte: Autor, 2023.

4.5.4.2 Desgaste

Os detalhes sobre a diminuição de massa estão registrados na Tabela abaixo.

Tabela 16 – Perda de massa após o ensaio com velocidade 5V, 4 minutos, óleo 5W40 + Nano® e 50N.

Ensaio lubrificado - 5W40 + Nano®	Massa perdida [10 ⁻⁴ g]
4min - 5V - 50N	1,47 ± 0,19

4.6 Comparativo entre os ensaios de mesma distância linear - 5V com 4 minutos X 1V com 20 minutos.

Como parte desse trabalho de dedica a investigar a influência da velocidade no desgaste, a comparação de ensaios com diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, permite isolar esse fator e avaliar qual dos dois exerce uma maior influência no desgaste: a velocidade ou a distância percorrida.

4.6.0.1 Temperatura

A análise da temperatura considera que os gráficos de força de atrito e temperatura são os mesmos para o ensaio com 20 minutos na velocidade 5V. Desta maneira, mesmo com ensaios mais curtos (4 minutos), a temperatura alcançada na velocidade 5V é significativamente maior em comparação com os ensaios de menor velocidade (1V) com 20 minutos, apresentando uma diferença que chega de $15^{\circ}C$ a $25^{\circ}C$ entre as condições.

4.6.0.2 Superfícies

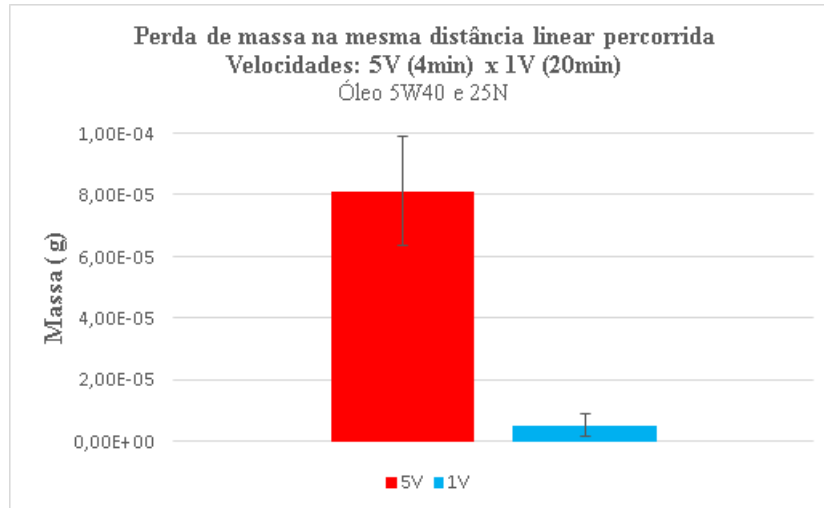
Ao comparar as superfícies desgastadas em diferentes velocidades, mesmo considerando a diferença de duração dos ensaios, é evidente que a alteração na velocidade resulta em desgastes substancialmente distintos. Embora se identifiquem evidências comuns de mecanismos de desgaste, os ensaios a velocidade 1V não apresentam indícios dos mecanismos de adesão observados nos ensaios a velocidade 5V.

A disparidade significativa na temperatura mencionada anteriormente pode ser crucial para o desencadeamento do mecanismo de desgaste por adesão observado nos ensaios a velocidade 5V, o qual não manifesta indícios nos ensaios de menor velocidade. Adicionalmente, na fase mais crítica do ensaio, especialmente na região de "running", ocorre a taxa mais elevada de desgaste, indicando que, com a velocidade mais alta, o desgaste é ainda mais pronunciado.

4.6.0.3 Desgaste

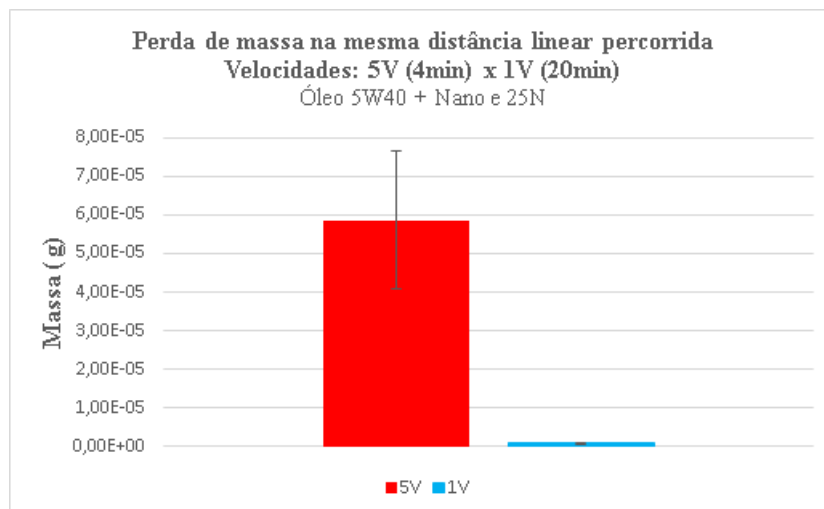
Certamente, conforme evidenciado nos tópicos anteriores sobre temperatura e características das superfícies, a disparidade nos resultados persiste quando se observa o desgaste, mesmo considerando a mesma distância linear. Isso sugere que, nesse caso, o fator determinante para o aumento do desgaste é a velocidade do ensaio. A seguir, estão os gráficos que comparam os ensaios em diferentes velocidades, mas nas mesmas condições de carga e lubrificação.

Figura 75 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, nas configurações: 25N de carga e lubrificado apenas com óleo 5W40.



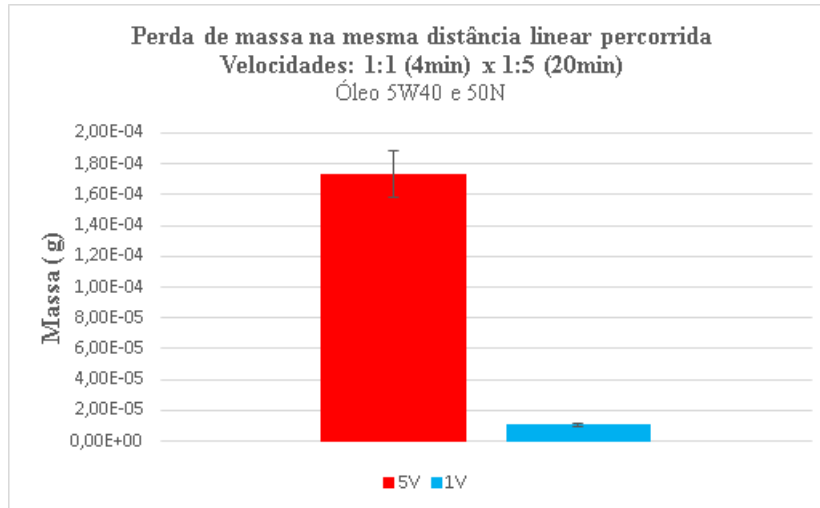
Fonte: Autor, 2023.

Figura 76 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, nas configurações: 25N de carga e lubrificado com óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.



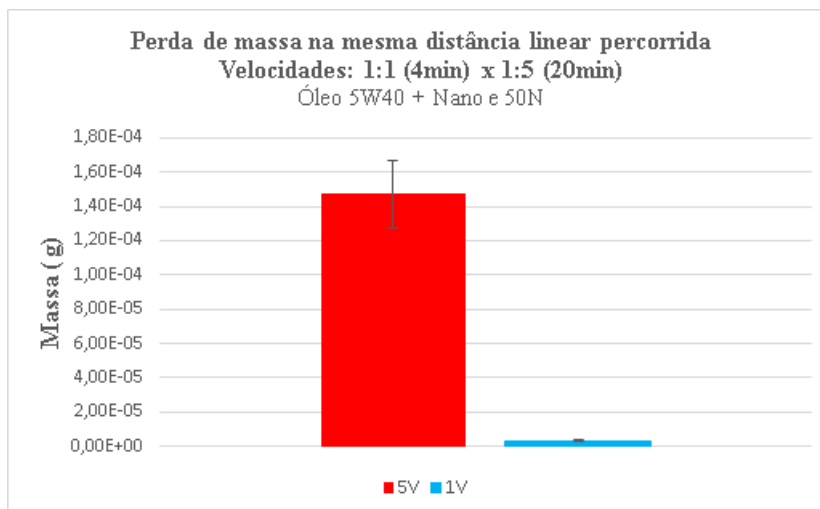
Fonte: Autor, 2023.

Figura 77 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, nas configurações: 50N de carga e lubrificado apenas com óleo 5W40.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 78 – Gráfico comparativo da perda de massa entre os ensaios de diferentes velocidades, mas com a mesma distância linear percorrida, nas configurações: 25N de carga e lubrificado com óleo 5W40 e aditivo Nano Automotivo®.



Fonte: Autor, 2023.

5 Conclusão

A partir dos resultados obtidos, é possível afirmar que o fator que exerce a maior influência sobre as variáveis de interesse é a velocidade, pois com o aumento dela, os valores de interesse crescem de maneira mais pronunciada, resultando em desgastes mais acentuados. Portanto, ao observar uma redução considerável nos valores de perda de massa e desgaste superficial com a velocidade 1V, conclui-se que esse resultado está diretamente relacionado aos mecanismos de desgaste. Isso sugere que, em velocidades de deslizamento mais baixas, a influência dos mecanismos presentes é menor, e vice-versa.

O aumento da velocidade possibilita um aumento significativo da reintrodução de partículas provenientes do desgaste no contato, aumentando a abrasão, e da temperatura e, conseqüentemente, a presença dos mecanismos de desgaste de adesão e, até mesmo, de fadiga, intensificando os valores de perda de massa, principalmente nos primeiros momentos do experimento. Um ponto interessante é que mesmo com o aumento da velocidade, os dados de força e coeficiente de atrito se mantêm muito semelhantes, já que a velocidade de deslizamento não altera essas variáveis.

A mudança de carregamento de 25N para 50N resultou, essencialmente, em um aumento dos resultados de interesse. Essa alteração intensifica não apenas as variáveis de interesse, como a força de atrito e a temperatura, mas também todos os mecanismos de desgaste que foram observados nos experimentos com cargas mais baixas. Adicionalmente, observa-se, nos gráficos de força e coeficiente de atrito, que o aumento de carga promove a redução de oscilações durante o ensaio, visto que as curvas apresentam um aspecto mais uniforme.

A alteração na lubrificação pode ser responsável por modificar desde os valores de uma curva de força e coeficiente de atrito até os valores de temperatura e desgaste em um experimento. Nos casos analisados, observou-se que ao utilizar o aditivo Nano Automotivo® houve, em geral, uma redução significativa dos valores de temperatura e desgaste. A utilização do Nano® também reduziu a intensidade de atuação dos mecanismos de desgaste, principalmente aqueles relacionados à temperatura, como adesão e fadiga. Além disso, a partir dos resultados das curvas de taxa de desgaste e perda de massa, o Nano® proporcionou a diminuição do desgaste desde o início do ensaio, cumprindo sua função como condicionador de metais. Adicionalmente, observa-se nos gráficos de força e coeficiente de atrito uma maior linearidade na curva, com formatos mais uniformes quando adicionado o condicionador de metais.

Observou-se que a distância linear, assim como o tempo de ensaio, não é tão relevante quanto a velocidade, uma vez que, em uma velocidade 5V, o desgaste inicial é

muito mais substancial em relação aos ensaios na velocidade 1V. Isso é evidenciado pelo fato de que nos ensaios de 1 minuto realizados para a maior velocidade (5V), o desgaste já é superior ao observado no ensaio de 20 minutos na velocidade mais baixa (1V).

Sendo assim, em resumo, conclui-se que o desgaste ocorre de maneira mais intensa nos primeiros momentos do ensaio. Adicionalmente, os fatores de interesse que têm mais influência no desgaste são: a velocidade, o carregamento e a lubrificação, respectivamente. Além disso, a partir dos resultados obtidos, é possível confirmar a eficiência do aditivo condicionador de metais Nano Automotivo®, que alcançou resultados satisfatórios em relação ao desgaste, ao ser comparado aos ensaios com apenas óleo lubrificante 5W40. Esses achados possuem implicações valiosas para a indústria, destacando a importância da otimização das condições de velocidade, carregamento e lubrificação para prolongar a vida útil dos materiais utilizados.

6 Trabalhos Futuros

Nos tópicos abaixo são encontradas sugestões de temas de trabalhos futuros para que seja possível a continuação dessa linha de pesquisa:

- Alterar a concentração do Nano Automotivo nos ensaios e analisar suas consequências em relação ao desgaste.
- Desenvolver modelos computacionais para simular e prever o desgaste do aço SAE 1045 em diferentes condições.
- Analisar e caracterizar os detritos provenientes do desgaste presentes no recipiente de lubrificação ao final dos ensaios.
- Isolar a interferência dos detritos provenientes do desgaste para que não sejam reintroduzidos na região de contato.
- Alterar o material desgastado e realizar ensaios sob as mesmas condições experimentais.

Referências

- ASM, I. *Introduction to Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance*. Detroit: ASM International, 2001. Citado na página 36.
- ASTM INTERNACIONAL. *ASTM A576*: Standard specification for steel bars, carbon, hot-wrought, special quality. West Conshohocken, 2017. 15 p. Citado na página 25.
- Aços Nobre. *Aço 1045: tudo o que você precisa saber!* 2023. <<https://acosnobre.com.br/blog/aco-1045-propriedades-dureza-aplicacao-preco/>>. Online, acesso em 01 de setembro de 2023. Citado na página 21.
- BALDO, L. F. *Estudo sobre Mecânica do Contato no Desgaste por Deslizamento Alternado em um Contato Cilindro Plano*. 34 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Univeridade Federal de Uberlândia, Uberlandia, 2019. Citado na página 29.
- BAYER, R. G. *Mechanical Wear Fundamentals and Testing*. Vestal: Marcel Dekker, Inc, 2004. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 36.
- BERNARDI, C. *Produção e caracterização de nanopartículas de MoS₂ e sua estabilização em óleos, visando a lubrificação limite*. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. Citado na página 31.
- BHUSHAN, B. *Principles and Applications of Tribology*. Ohio: John Wiley Sons, 2013. v. 2. Citado na página 26.
- BLAU, P. J. *Friction lubrication and wear technology*. Detroit: American Society for Metals - ASM, 1992. v. 18. Citado na página 30.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, K. J. *Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica*. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2011. v. 8. Citado na página 32.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e engenharia de materiais*. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 9. Citado na página 25.
- CLEMENTE, C.; CUEVA, E. G. Influence of lubricant of sliding wear aisi 304. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 2017. Citado na página 22.
- Gelson Luz. *Aço SAE 1045, propriedades mecânicas e composição química*. 2017. <<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>>. Online, acesso em 31 de maio de 2023. Citado na página 25.
- GUIMARÃES, N. V. *Análise do atrito e desgaste sob diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino/disco de aço SAE 1045*. 92 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Univeridade de Brasília, Brasília, 2022. Citado na página 41.
- HEBERLE, M. *Avaliação da Influência do Sentido da Laminação e do Tratamento Térmico de Normalização no Desgaste de Aços 1020 Laminados a Quente*. Monografia (Monografia) — Univeridade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Citado na página 21.

- HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. Cambridge: Elsevier Limited, 1992. v. 1. Citado 9 vezes nas páginas 26, 27, 28, 32, 33, 34, 35, 37 e 49.
- KAJDAS, C. *Encyclopedia of tribology*. Nova Iorque: Elsevier Science Publishers B.V, 1990. Citado na página 37.
- Laboratório de Atrito e Desgaste - LTAD. *Ensaios de desgaste por deslizamento*. 2023. <http://www.ltad.mecanica.ufu.br/sites/ltad.mecanica.ufu.br/files/anexos/ensaios_de_desgaste_por_deslizamento.pdf>. Online, acesso em 22 de junho de 2023. Citado na página 36.
- LEMO, H. A. *Ensaios em sistemas lubrificados utilizando aço inox 304-I*. 57 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Faculdade do Gama, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2018. Citado na página 27.
- LUDEMA, K. C. *CRC Handbook of Lubrication*. Flórida: CRC Press, 1988. v. 2 Theory and Design. Citado na página 27.
- LUDEMA, K. C. *Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology*. Flórida: CRC Press, 1996. Citado na página 27.
- MARU, M. M. *Estudo do desgaste e atrito de um par metálico sob deslizamento lubrificado*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Citado na página 27.
- MOOS, U.; BAHRE, D. Analysis of process forces for the precision honing of small bores. *Science Direct*, 2012. Citado na página 39.
- NETO, W. B. *Parâmetros de qualidade de lubrificantes e óleo de oliva através de espectroscopia vibracional, calibração multivariada e seleção de variáveis*. Tese (Doutorado) — Departamento de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Citado na página 21.
- Noria. *Lubrication Regimes Explained*. 2017. <<https://www.machinerylubrication.com/Read/30741/lubrication-regimes>>. Online, acesso em 20 de junho de 2023. Citado na página 33.
- OLIVEIRA, F. S. de. *Avaliação do desempenho de machos tratados com um condicionador metálico no processo de rosqueamento interno*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2015. Citado na página 31.
- PACHECO, A. P. *Estudo do atrito e desgaste em diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino-disco de aço 1045*. 83 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Univeridade de Brasília, Brasília, 2021. Citado na página 41.
- Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin. *Materiais resistentes ao desgaste*. 2006. <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4354034/mod_resource/content/1/Aula%20de%20desgaste%20-%202002.pdf>. Online, acesso em 19 de junho de 2023. Citado na página 28.
- RADI et al. Tribologia, conceitos e aplicações. *13º Encontro de Iniciação Científica e Pós – Graduação do ITA – XIII ENCITA*, 2007. Citado na página 36.

- 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, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- 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. Citado na página 28.
- SINGH, M. Application of steel automotive industry. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2016. Citado na página 21.
- STACHOWIAK, G. W. *Engineering Tribology*. Oxford: Elsevier Butterwoth-Heinemann, 2005. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 37.
- Tribolub. *NANO Automotivo*. 2020. <<https://tribolub.com.br/nano-auto/>>. Online, acesso em 20 de junho de 2023. Citado 4 vezes nas páginas 22, 31, 32 e 44.
- TRINDADE, E. D. *Efeito do tipo de óleo básico no desempenho tribológico de dialquilditiocarbamato de molibdênio como aditivo para lubrificantes automotivos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Citado na página 21.