



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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM DESGASTE DO
AÇO SAE 1045 SUBMETIDO A ENSAIOS DE
DESLIZAMENTO DO TIPO PINO SOBRE DISCO,
LUBRIFICADOS COM E SEM A ADIÇÃO DO
CONDICIONADOR DE METAIS GRAFFENO®**

**Autor: Arthur Ribeiro Tripode
Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga**

**Brasília, DF
2024**



Arthur Ribeiro Tripode

Estudo do comportamento em desgaste do aço SAE 1045 submetido a ensaios de deslizamento do tipo pino sobre disco, lubrificados com e sem a adição do condicionador de metais GRAFFENO®

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

Orientador: Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga

**Brasília, DF
2024**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Tripode, Arthur Ribeiro.

Estudo do comportamento em desgaste do aço SAE 1045 submetido a ensaios de deslizamento do tipo pino sobre disco, lubrificados com e sem a adição do condicionador de metais GRAFFENO®/ Arthur Ribeiro Tripode. Brasília: UnB, 2024. 126 p. : il. ; 29,5 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2024. Orientador: Prof. Dr. Edison Gustavo Cueva Galárraga.

1. Aço SAE 1045. 2. Atrito. 3. Lubrificação. 4. Desgaste. 5. Graffeno®. I. Cueva, Edison Gustavo. Prof. Dr. II. Estudo do comportamento em desgaste do aço SAE 1045 submetido a ensaios de deslizamento do tipo pino sobre disco, lubrificados com e sem a adição do condicionador de metais GRAFFENO®.

CDU Classificação

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



Estudo do comportamento em desgaste do aço SAE 1045 submetido a ensaios de deslizamento do tipo pino sobre disco, lubrificadas com e sem a adição do condicionador de metais GRAFFENO®

Arthur Ribeiro Tripode

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação 29/02/2024) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

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

Prof. Dr. Maria Del Pilar Hidalgo Falla, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Dr. Emmanuel Pacheco Rocha Lima, UnB/ FGA
Membro Convidado

Eng. João Carlos Wohlgemuth, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2024

Esse trabalho é dedicado a todos aqueles que um dia pensaram em desistir. Tudo é possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado forças para levantar todos os dias e fazer o que tem que ser feito.

Aos meus familiares, especialmente mãe Renata, padrasto Alexandre, irmã Manuela e avó Célia, que sempre me incentivaram e proveram todo o necessário para que eu tivesse uma boa educação e pudesse me dedicar integralmente aos estudos.

A minha namorada Camilla e amigos que estiveram comigo nos momentos mais difíceis, em especial o colega Lucas Pereira, que esteve presente em vários momentos na elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Cueva pela paciência, orientação, conselhos e ajudas durante o desenvolvimento deste TCC.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo estudar o desgaste do aço SAE 1045 quando atritado contra si mesmo em um sistema pino-disco em diferentes condições de duração, lubrificação e carga, para tanto, utilizando de velocidade tangencial constante de 5,67 m/s. Foram realizados ensaios em uma bancada de desgaste (Tribômetro) equipada com sensores eletrônicos que permitem a coleta de dados, em tempo real, da força tangencial na região de contato pino-disco. Os ensaios foram realizados em duas condições de lubrificação pré-estabelecidas: lubrificado somente com óleo 5W40 e lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno®, na concentração de 1%. Para cada condição de lubrificação foram realizados ensaios nas durações de 1; 2,5; 5; 10; 20; 60 e 120 minutos, em condições de carga de 25 N e 50 N. Os resultados de interesse foram a força e coeficiente de atrito, a perda de massa, a taxa de desgaste sofrido e o dano superficial decorrente do desgaste. Os testes mostraram que a utilização do Graffeno® misturado no óleo 5W40 apresentou em alguns casos melhora e em outros piora, em relação a utilização do óleo puro. Os resultados indicam que o condicionador de metais Graffeno® foi responsável por reduzir o desgaste por fadiga e adesão, ao mesmo tempo que aumentou o efeito de abrasão. Apesar de proporcionar estabilidade e reduções pontuais, o Graffeno® não demonstrou significativa redução no coeficiente de atrito. Além disso, os resultados apontam para uma complexidade nas interações do condicionador de metais com o óleo lubrificante e a superfície, variando conforme a carga aplicada. Em relação ao tempo de ensaio, foi possível perceber que o desgaste não ocorre de maneira linear, sendo maior a taxa de desgaste nos instantes iniciais do teste.

Palavras-chave: Aço SAE 1045, Atrito, Lubrificação, Desgaste, Grafeno.

ABSTRACT

The present study aims to investigate the wear of SAE 1045 steel when rubbed against itself in a pin-disc system under different conditions of duration, lubrication and load, using a constant tangential velocity of 5,67 m/s. Experiments were conducted on a wear test bench (tribometer) equipped with electronic sensors that allow real-time data collection of the tangential force in the pin-disc contact region. The experiments were conducted under two pre-established lubrication conditions: lubricated with 5W40 oil only and lubricated with a mixture of 5W40 oil and Graffeno®, at a concentration of 1%. For each lubrication condition, tests were carried out at durations of 1; 2.5; 5; 10; 20; 60; and 120 minutes under load conditions of 25 N and 50 N. The key results of interest included the force and coefficient of friction, mass loss, wear rate, and surface damage resulting from the wear. The tests showed that the use of Graffeno® mixed with 5W40 oil resulted in improvements in some cases and worsening in others compared to the use of pure oil. The results indicate that Graffeno® metal conditioner reduced wear due to fatigue and adhesion while increasing the abrasion effect. Despite providing stability and occasional reductions, Graffeno® did not demonstrate a significant reduction in the coefficient of friction. Additionally, the results point to a complexity in the interactions of the metal conditioner with the lubricating oil and the surface, which vary depending on the applied load. Regarding the test duration, it was observed that wear does not occur linearly, with higher wear rate occurring in the initial moments of the test.

Keywords: SAE1045 Steel, Friction, Lubrication, Wear, Graphene.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura do trabalho.....	18
Figura 2 - Tipos de contato (a, b) conforme. (c, d) não conforme.	21
Figura 3 - Transição entre contato estático e dinâmico.....	22
Figura 4 - Força F necessária para superar o atrito e provocar movimento de (a) rolamento ou (b) escorregamento.	23
Figura 5 - Variação da área de contato e coeficiente de atrito.	24
Figura 6 - Mecanismos de ação dos lubrificantes.	26
Figura 7 - Cunha de fluido e fluido espremido.....	27
Figura 8 - Mecanismos de atuação do Graffeno® (a) Película protetora. (b) Preenchimento. (c) Rolamento.....	29
Figura 9 - Lubrificação Hidrodinâmica.	29
Figura 10 - Lubrificação Elastohidrodinâmica ou Mista.	30
Figura 11 - Cadeias de hidrocarbonetos responsáveis pela repulsão entre as superfícies.	31
Figura 12 - Lubrificação Limítrofe.....	31
Figura 13 - Diagrama de Stribeck para os principais regimes de lubrificação fluida.	32
Figura 14 - Mecanismos de lubrificação de nanopartículas.	33
Figura 15 - Histograma de coeficiente de atrito e taxa de desgaste para diferentes concentrações de grafeno.	34
Figura 16 - Redução do atrito durante o processo de formação do filme protetivo de grafeno.	35
Figura 17 - Tipo de interação entre superfícies.	37
Figura 18 - Mecanismos de desgaste.	37
Figura 19 - Processos de desgaste abrasivo: (a) corte; (b) formação de cunha; (c) riscamento.....	38
Figura 20 - Taxa de desgaste e resistência no contato em função da carga normal para um pino de latão deslizando sobre um anel de Estelita.	39
Figura 21 - Conjunto pino e disco.....	41
Figura 22 - Lubrificante Lubrax 5W40 e condicionador de metais Graffeno®.	42
Figura 23 - Bancada de ensaios – Vista frontal.....	43
Figura 24 - Bancada de ensaios – Vista isométrica.	43
Figura 25 - Sistema de lubrificação.	44
Figura 26 - Medidas utilizadas para o cálculo do volume perdido.	47
Figura 27 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	49
Figura 28 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	50
Figura 29 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.	51
Figura 30 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	52
Figura 31 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	53
Figura 32 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.....	53
Figura 33 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos com carga normal de 25 N.	54

Figura 34 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos com carga normal de 25 N.....	55
Figura 35 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N.....	57
Figura 36 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	58
Figura 37 - Região de subida ampliada. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	59
Figura 38 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	60
Figura 39 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.	61
Figura 40 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	61
Figura 41 - Região de subida ampliada. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	62
Figura 42 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	63
Figura 43 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.....	63
Figura 44 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos com carga normal de 25 N.	64
Figura 45 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos com carga normal de 25 N.....	65
Figura 46 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N.....	67
Figura 47 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	68
Figura 48 - Região de <i>Running</i> ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.	69
Figura 49 - Região de subida ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	69
Figura 50 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	70
Figura 51 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.	71
Figura 52 - Variação da força de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	71
Figura 53 - Região de subida ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	72
Figura 54 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	73
Figura 55 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.....	73
Figura 56 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos com carga normal de 25 N.	74
Figura 57 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaio de 120 minutos com carga normal de 25 N.....	75
Figura 58 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N.....	77

Figura 59 – Comparativo de perda de massa. Ensaios com carga normal de 25 N..	78
Figura 60 – Comparativo de taxa de desgaste. Ensaios com carga normal de 25 N.	79
Figura 61 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.....	81
Figura 62 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.....	82
Figura 63 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.	82
Figura 64 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	83
Figura 65 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	84
Figura 66 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.....	84
Figura 67 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N.	85
Figura 68 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N.....	86
Figura 69 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N.....	88
Figura 70 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.....	89
Figura 71 – Região de <i>Running</i> ampliada. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.....	90
Figura 72 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.....	90
Figura 73 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.	91
Figura 74 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	92
Figura 75 - Região de <i>Running</i> ampliada. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	92
Figura 76 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	93
Figura 77 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.....	94
Figura 78 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N.	94
Figura 79 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N.....	95
Figura 80 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N.....	97
Figura 81 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.....	98
Figura 82 - Região de <i>Running</i> ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.	99
Figura 83 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.....	99

Figura 84 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.	100
Figura 85 - Variação da força de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	101
Figura 86 - Região de <i>Running</i> ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	101
Figura 87 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	102
Figura 88 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	103
Figura 89 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.	103
Figura 90 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.	104
Figura 91 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.	106
Figura 92 – Comparativo de perda de massa. Ensaios com carga normal de 50 N.	107
Figura 93 – Comparativo de taxa de desgaste. Ensaios com carga normal de 50 N.	107
Figura 94 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.	110
Figura 95 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	110
Figura 96 - Comparativo de perda de massa. Ensaios com carga normal de 25 N.	115
Figura 97 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.	116
Figura 98 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	117
Figura 99 - Comparativo de perda de massa. Ensaios com carga normal de 50 N.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 1045.....	19
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045.....	20
Tabela 3 - Características do desgaste suave e severo.....	39
Tabela 4 - Quadro-resumo com as configurações dos ensaios principais.	45
Tabela 5 - Quadro-resumo com as configurações dos ensaios secundários.	46
Tabela 6 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N.....	56
Tabela 7 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N.....	57
Tabela 8 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N.....	66
Tabela 9 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N.....	67
Tabela 10 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N.....	76
Tabela 11 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N.....	77
Tabela 12 – Pressão de contato. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.....	80
Tabela 13 - Pressão de contato. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.	80
Tabela 14 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N.....	87
Tabela 15 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N.....	87
Tabela 16 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N.....	96
Tabela 17 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N.....	97
Tabela 18 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.....	105
Tabela 19 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.....	106
Tabela 20 – Pressão de contato. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.....	108
Tabela 21 - Pressão de contato. Ensaios lubrificados com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.	108
Tabela 22 - Comparativo das superfícies desgastadas dos discos. Ensaios com carga normal de 25 N.....	112
Tabela 23 - Comparativo das superfícies desgastadas dos pinos. Ensaios com carga normal de 25 N.....	113
Tabela 24 - Comparativo da perda de massa entre os ensaios. Ensaios com carga normal de 25 N.....	115
Tabela 25 - Comparativo da taxa de desgaste entre os ensaios. Ensaios com carga normal de 25 N.....	115
Tabela 26 - Comparativo das superfícies desgastadas dos discos. Ensaios com carga normal de 50 N.....	118

Tabela 27 - Comparativo das superfícies desgastadas dos pinos. Ensaio com carga normal de 50 N.....	119
Tabela 28 - Comparativo da perda de massa entre os ensaios. Ensaio com carga normal de 50 N.....	120
Tabela 29 - Comparativo da taxa de desgaste entre os ensaios. Ensaio com carga normal de 50 N.....	120

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 AÇO SAE 1045	19
2.2 TRIBOLOGIA	20
2.2.1 CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES	20
2.2.2 ATRITO	22
2.2.3 LUBRIFICANTE	25
2.2.4 DESGASTE	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1 MATERIAIS	41
3.2 MÉTODOS	42
3.2.1 TRIBÔMETRO	42
3.2.2 PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES	44
3.2.3 LUBRIFICAÇÃO	44
3.2.4 ENSAIOS PRINCIPAIS	45
3.2.5 ENSAIOS SECUNDÁRIOS	46
3.2.6 CÁLCULO DA PERDA DE MASSA	46
3.2.7 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO – REGIME DE LUBRIFICAÇÃO	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 CARGA NORMAL: 25 N	49
4.1.1 TESTES – 20 MINUTOS	49
4.1.2 TESTES – 60 MINUTOS	58
4.1.3 TESTES – 120 MINUTOS	68
4.1.4 COMPORTAMENTO DA PERDA DE MASSA E DESGASTE AO LONGO DO TEMPO	78
4.1.5 PRESSÃO DE CONTATO E REGIME DE LUBRIFICAÇÃO	80
4.2 CARGA NORMAL: 50 N	81
4.2.1 TESTES – 20 MINUTOS	81
4.2.2 TESTES – 60 MINUTOS	89
4.2.3 TESTES – 120 MINUTOS	98
4.2.4 COMPORTAMENTO DA PERDA DE MASSA E DESGASTE AO LONGO DO TEMPO	107
4.2.5 PRESSÃO DE CONTATO E REGIME DE LUBRIFICAÇÃO	108
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
5.1 COMPARATIVO ENTRE OS ENSAIOS: 20, 60 E 120 MINUTOS	110
5.1.1 25 N	110
5.1.2 50 N	116
6 CONCLUSÕES	123
7 TRABALHOS FUTUROS	123
BIBLIOGRAFIA	124

1 INTRODUÇÃO

O aço desempenha um papel fundamental na indústria automotiva, sendo amplamente utilizado na fabricação de veículos devido à boa moldabilidade, alto módulo de elasticidade, alta resistência e tenacidade, e grande versatilidade. Presente na indústria automotiva desde a invenção do automóvel, o aço continua sendo utilizado para fabricar carros mais seguros, leves e eficientes (Sacchelli, 2023).

O aço SAE 1045 é amplamente utilizado na fabricação de peças industriais de forma geral, como eixos, bielas, pinos, catracas, barras de torção, parafusos, entre outros, sendo o setor automotivo um dos que mais se beneficiam dessa liga graças as suas desejáveis propriedades mecânicas (Coppermetal, 2023).

A capacidade do aço de resistir ao desgaste determina sua durabilidade e vida útil, fatores cruciais para componentes sujeitos a atrito e abrasão (Rijeza, 2023).

O desgaste é um processo gradual de deterioração ou desintegração de um material devido à ação do atrito, abrasão, erosão ou outro tipo de interações mecânicas. Ele ocorre quando duas superfícies, em movimento relativo, entram em contato e experimentam dano progressivo ao longo do tempo, diminuindo a eficácia das peças, componentes ou superfícies envolvidas. Desgaste significa causar dano, mas não se limita somente a perda de material (BAYER, 1994).

Para mitigar o desgaste nos sistemas mecânicos, normalmente, são utilizados lubrificantes, que podem ser sólidos, líquidos ou gasosos, bastando que sua resistência ao cisalhamento seja menor que a das superfícies em contato. O lubrificante é aplicado entre as superfícies com movimento relativo entre si, formando uma película que separa e protege essas superfícies contra o desgaste prematuro (STACHOWIAK, 2005).

Aditivos consistem em compostos orgânicos, minerais ou organometálicos que, quando adicionados em pequenas concentrações, tem a finalidade de modificar as propriedades do óleo lubrificante, objetivando reforçar suas características ou conferir-lhe novas propriedades. Dentre as modificações frequentemente alcançadas, destacam-se a melhoria na capacidade de lubrificação, redução do atrito, redução do desgaste, alteração da viscosidade dentre outras (BORDIGNON, 2018).

Desenvolvidos com as mesmas finalidades dos aditivos, reduzir atrito, desgaste e prolongar a vida útil dos componentes, os condicionadores de metais utilizam o óleo lubrificante como vetor para alcançar as superfícies metálicas e nela se impregnarem.

Nesse contexto, o Graffeno®, segundo seu fabricante, é um condicionador de metais constituído por nanopartículas de grafeno, que promete reduzir o atrito e o desgaste em sistemas mecânicos. Essas nanopartículas se fixam na superfície metálica formando películas protetoras extremamente finas e resistentes (Graffeno, 2023).

O grafeno (uma das formas cristalinas do carbono) tem sido alvo de estudos na área de lubrificação graças ao seu excelente potencial lubrificante, boa compatibilidade geral e notável condutividade térmica. A adição de grafeno a óleos lubrificantes foi constatada como um método eficaz na redução do atrito e desgaste, promovendo ótimas propriedades tribológicas para sistemas mecânicos. No entanto, os mecanismos de lubrificação gerados pelo grafeno ainda são incertos e necessitam de estudos mais aprofundados, limitando suas aplicações práticas (WU, 2021).

As atividades desenvolvidas nesse TCC dão continuidade aos trabalhos realizados no Laboratório de Tribologia da Faculdade Unb-Gama, onde, desde 2017, se concentram esforços de estudo e investigação, abrangendo de maneira ampla, o desgaste de materiais metálicos sob diversas condições de lubrificação. Para tanto, este trabalho propõe a utilização de um novo condicionador de metais, o Graffeno®, no intuito expandir os estudos já realizados e os conectar com as pesquisas que visam entender como o grafeno pode funcionar atuando como lubrificante.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo geral estudar o desgaste do aço SAE 1045 quando atritado contra si mesmo, em ensaios de deslizamento do tipo pino sobre disco, com diferentes condições de tempo de ensaio, condição de lubrificação e de carga normal aplicada, utilizando-se velocidade tangencial constante de 5,67 m/s.

1.1.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

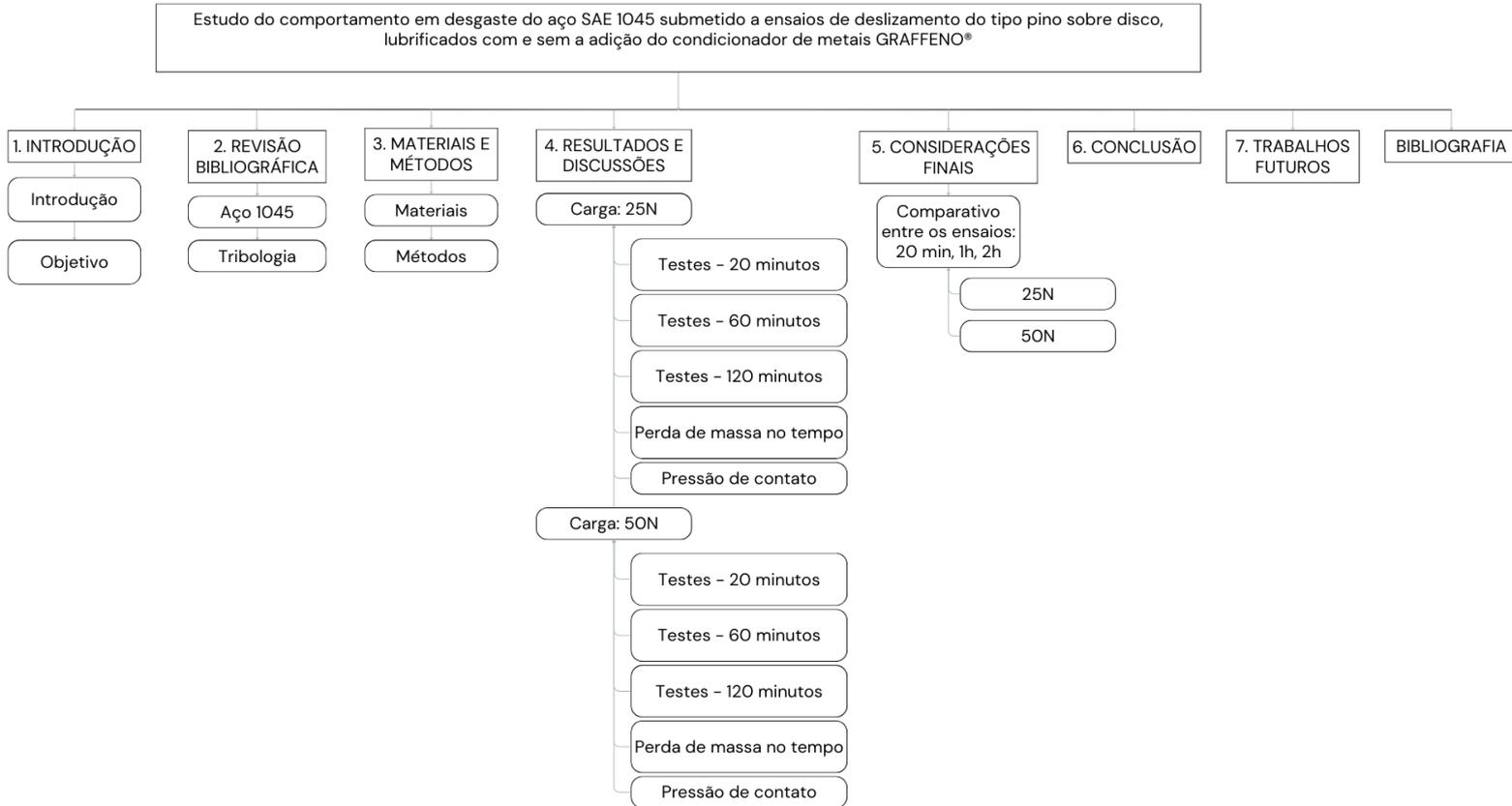
Estudar o desgaste do aço SAE 1045, bem como analisar a eficiência do condicionador de metais Graffeno®, observando as seguintes variáveis: força e coeficiente de atrito, perda de massa, taxa de desgaste dano superficial e temperatura. Os ensaios foram realizados nas durações de 1; 2,5; 5; 10; 20; 60 e 120 minutos, em condições de carga de 25 N e 50 N, com as seguintes condições de lubrificação:

- lubrificado com óleo SAE 5W40;
- lubrificado com óleo SAE 5W40 + Graffeno® na concentração de 1% m v.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Na figura 1 é apresentado o fluxograma do conteúdo abordado no presente trabalho.

Figura 1 - Estrutura do trabalho.



Fonte: Fonte: De autoria própria, 2023.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇO SAE 1045

Dentre os diferentes tipos de aço, há o aço SAE 1045, que possui cerca de 0,45% de carbono e é, portanto, dito como de médio teor de carbono (CALLISTER, 2020). É muito utilizado na fabricação de componentes gerais que necessitem de resistência mecânica superior à dos aços convencionais, como eixos, engrenagens, virabrequins e peças para a indústria mecânica no geral (GUERRA; LAGE; PROCÓPIO, 2022).

De acordo com a norma NBR 172/2000, que fixa os critérios para classificação dos aços, o aço ABNT 1045 é classificado como aço para construção mecânica, sendo utilizado geralmente após tratamento térmico.

De acordo com a norma NBR NM 87/2000, que estabelece as composições químicas dos aços para construção mecânica, o aço ABNT 1045 deve apresentar a seguinte composição química:

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 1045.

Elemento	Nomenclatura	Concentração (%)
Carbono	C	0,43 a 0,50
Silício	Si	0,15 a 0,35
Manganês	Mn	0,60 a 0,90
Enxofre	S	0,05 (máx.)
Fósforo	P	0,04 (máx.)

Fonte: ASTM, 2017.

O comportamento mecânico, ou propriedades mecânicas, de um material está diretamente ligado a resposta em deformação a uma determinada carga aplicada (CALLISTER, 2020). Nesse sentido, é importante que sejam conhecidas as propriedades mecânicas do material com o qual se deseja trabalhar.

Para o aço 1045, algumas dessas propriedades mecânicas são enumeradas a seguir:

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045.

Módulo de Elasticidade (Gpa)	190 até 210
Resistência Mecânica (Mpa)	570 até 700
Dureza Brinell (HB)	170 até 210
Dureza Rockwell B (HR)	84
Dureza Vickers (HV)	170
Resistência à tração (Mpa)	585
Ductilidade (%AL em 50 mm)	16
Coeficiente de Poisson	0,27 até 0,3

Fonte: Luz, 2017.

2.2 TRIBOLOGIA

Tribologia é ciência das interações entre superfícies em movimento relativo que estuda o atrito, desgaste e lubrificação das respectivas superfícies. Em sua grande maioria, os sistemas mecânicos que encontramos são formados por superfícies que deslizam umas sobre as outras. Por esse motivo, o estudo da tribologia é de grande importância para entender o comportamento das superfícies em determinadas condições (HUTCHINGS, 1992).

2.2.1 CONTATO ENTRE SUPERFÍCIES

Ao impor carregamentos em duas superfícies em contato, ambas interagem e sofrem deformações. Essa interação pode ser estudada macroscopicamente (formas) ou microscopicamente (rugosidades) (BALDO, 2019).

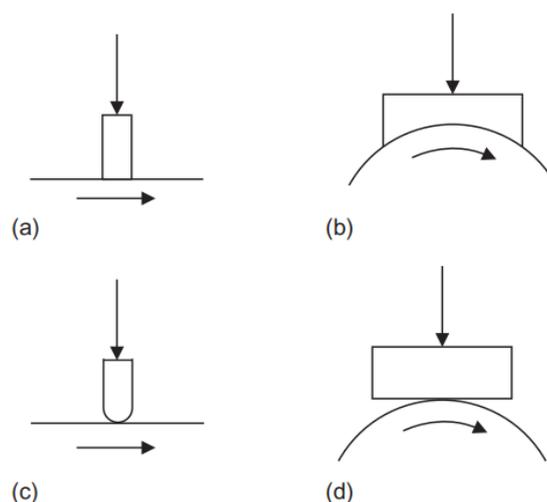
Do ponto de vista microscópico, o contato entre superfícies ocorre inicialmente nos pontos mais altos, os picos. Conforme o carregamento aumenta, mais pontos de contato são criados e os componentes passam a se deformar plasticamente. A real área de contato, é sempre menor do que aparenta e quase linearmente proporcional a carga normal aplicada. Esses pontos de contato são responsáveis por suportar quaisquer forças friccionais que ocorram entre as superfícies (HUTCHINGS, 1992).

Segundo Sampaio (2009), o contato entre superfícies é influenciado por diversos fatores que interagem entre si de maneira complexa. Rugosidade, dureza, elasticidade, coeficiente de atrito, pressão, interações com o meio ambiente e mudanças de geometria são alguns dos fatores que devem ser levados em conta ao analisar um problema de contato entre superfícies.

O contato entre superfícies pode ocorrer de diferentes maneiras. A saber:

- **Contato sem atrito:** Superfícies deslizam umas sobre as outras sem resistência na direção tangencial à superfície de contato, ou seja, força de atrito. Forças externas exercem somente efeito de compressão normal (SAMPAIO, 2009). Esse tipo de situação ocorre em se tratando de superfícies muito lisas e altamente lubrificadas (MAN, 1994).
- **Contato com atrito:** Superfícies deslizam umas sobre as outras gerando uma força tangencial contrária aos seus movimentos relativos. Tal força tangencial depende da componente normal, atuando no corpo, e das características físicas do material.
- **Contato conforme:** Interação entre superfícies de mesmo raio de curvatura. Nesse tipo de aplicação, a área de contato aparente é toda a superfície menor e a pressão de contato entre as superfícies permanece constante. A variação do carregamento não influencia no tamanho da área de contato (BALDO, 2019).
- **Contato não-conforme:** Interação entre superfícies com diferentes raios de curvatura. Nesse tipo de aplicação, a área de contato aparente é menor do que a área da menor superfície e as pressões de contato são maiores do que no contato conforme. Nesse caso a variação do carregamento leva à variação da área de contato (BALDO, 2019). Esse tipo de contato ocorre ao longo de um ponto ou uma linha (SAMPAIO, 2009).

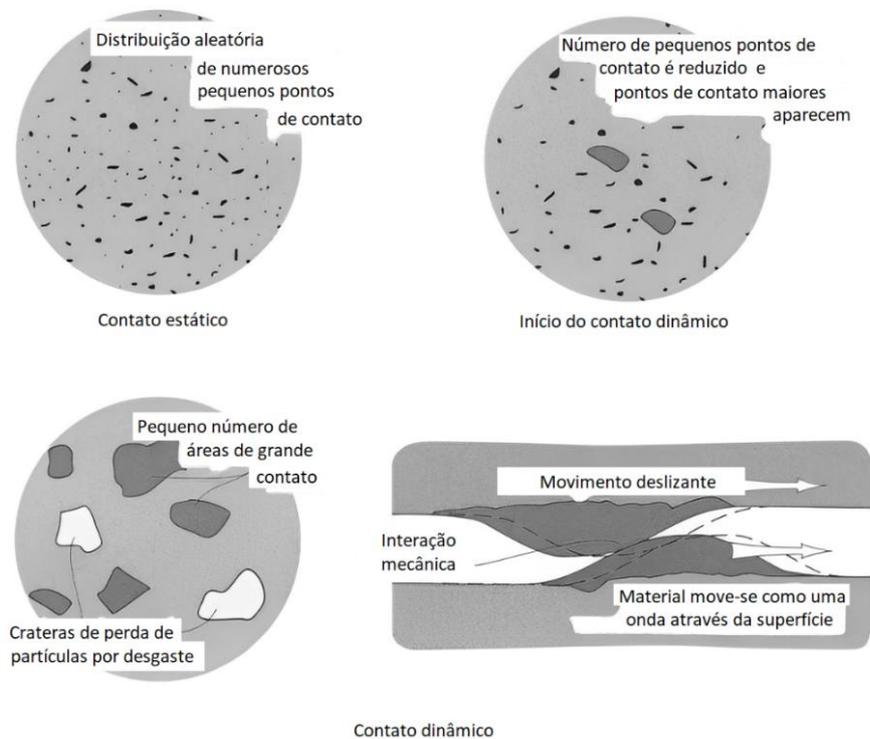
Figura 2 - Tipos de contato (a, b) conforme. (c, d) não conforme.



Fonte: Hutchings, 1992.

- **Contato estático:** Contato que ocorre entre superfícies na ausência de movimento relativo. Nesse tipo de situação, ocorre uma distribuição randômica de pequenos pontos de contato entre as superfícies (STACHOWIAK, 2005).
- **Contato dinâmico:** Contato que ocorre entre superfícies em movimento relativo. Os pequenos pontos de contato são substituídos por poucas, porém grandes, áreas de contato, assim surgem os primeiros sinais de perda de material (STACHOWIAK, 2005).

Figura 3 - Transição entre contato estático e dinâmico.

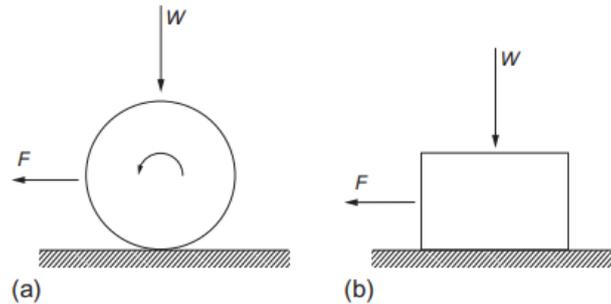


Fonte: Adaptado de Stachowiak, 2005.

2.2.2 ATRITO

Atrito pode ser entendido como a força de resistência que existe quando um corpo é movimentado sobre outro. Segundo Hutchings (1992) esse movimento pode ser classificado em movimentos de rolamento e escorregamento. Em ambos os casos, é gerada uma força tangencial que age de forma resistiva na direção contrária ao movimento do corpo.

Figura 4 - Força F necessária para superar o atrito e provocar movimento de (a) rolamento ou (b) escorregamento.



Fonte: Hutchings, 1992.

Segundo Hutchings (1992) o conceito de atrito pode ser explicado por meio de três leis. São elas:

- 1º - A força de atrito F é proporcional a força normal W .
- 2º - A força de atrito independe da área de contato aparente entre os corpos.
- 3º - A força de atrito independe da velocidade de escorregamento das superfícies

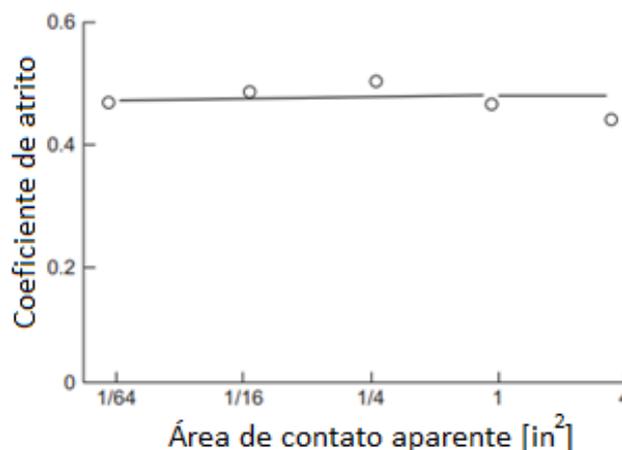
A primeira lei pode ser expressa pela seguinte formulação:

$$F = \mu * W, \text{ Equação (1)}$$

Na qual, μ é o coeficiente de atrito e W é a carga normal. Para a maioria dos materiais em condição de escorregamento lubrificado ou não lubrificado, essa equação é uma aproximação válida, ao menos quando se trata de observações macroscópicas. Essa lei deixa de ser válida para alguns materiais específicos como polímeros e materiais com módulo de elasticidade muito baixo (HUTCHINGS, 1992).

A segunda lei do atrito não foi tão explorada quanto a primeira, no entanto, com exceção mais uma vez dos polímeros, pode ser aplicada para a maioria dos materiais (HUTCHINGS, 1992). Na figura 5 é mostrada a variação do coeficiente de atrito quando deslizada uma superfície de madeira contra uma de aço na ausência de lubrificação. A força normal foi mantida constante enquanto a área de contato entre as superfícies variou. Foi possível observar que μ variou muito pouco.

Figura 5 - Variação da área de contato e coeficiente de atrito.



Fonte: Adaptado de Hutchings, 1992.

Segundo Hutchings (1992), a terceira lei do atrito é mais observada por senso comum do que por fundamentação teórica. É nítido que a força necessária para iniciar o deslizamento é geralmente maior do que a necessária para mantê-lo. Portanto, o coeficiente de atrito estático (μ_s) seria maior do que o coeficiente de atrito dinâmico (μ_d). Uma vez iniciado o movimento de deslizamento entre superfícies, μ_d , para a maioria dos sistemas, torna-se independente da velocidade de deslizamento para uma faixa grande de valores.

2.2.2.1 ATRITO EM MEIO LUBRIFICADO

O atrito é influenciado por uma série de mecanismos que, atuando conjuntamente, agem em diferentes proporções em diferentes situações (ASM Handbook, 1992).

Um dos fatores que influenciam no atrito é a lubrificação das superfícies. De acordo com o ASM Handbook (1992), “Friction, Lubrication and Wear Technology”, ao avaliar o contato completamente hidrodinâmico entre duas superfícies lubrificadas, as características das superfícies pouco importam, já que o lubrificante as separa totalmente.

À medida que as superfícies se aproximam e suas asperezas entram em contato, o atrito passa a depender do que acontece na fina camada de lubrificante, do contato entre as asperezas e do grau de separação entre as superfícies (ASM Handbook, 1992).

O grau de separação entre as superfícies (λ) pode ser medido pela razão entre a menor espessura do filme lubrificante (h) e a rugosidade composta das superfícies (σ), segundo as equações:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \text{ Equação (2)}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sigma}, \text{ Equação (3)}$$

Onde σ_1 e σ_2 representam as rugosidades médias quadráticas das superfícies. Se $\lambda > 3$, então a condição de lubrificação é completamente hidrodinâmica e os contatos entre asperezas são raros. Se $1 < \lambda < 3$, então o contato entre asperezas aumenta à medida que h/σ diminui, caracterizando o regime elastohidrodinâmico de lubrificação. Se $\lambda < 1$, fica caracterizado o regime limítrofe e o sistema apresenta características de não lubrificado, onde deformações superficiais podem ocorrer (ASM Handbook, 1992).

2.2.3 LUBRIFICANTE

Segundo Shigley (2012), lubrificante é qualquer material que, utilizado entre duas superfícies, diminua o atrito, o desgaste e o aquecimento dos materiais. Nesse sentido, Stachowiak (2005) pontua que embora não existam restrições quanto ao tipo de material que pode ser considerado lubrificante, uma vez que gases, líquidos e sólidos são eficazes, a escolha correta do material, alinhado à sua finalidade, influencia diretamente na eficácia do filme lubrificante. Películas gasosas são indicadas para situações de baixa pressão de contato, ao passo que películas sólidas são utilizadas em situações de contato com baixa velocidade de deslizamento.

Lubrificação pode ser entendida como a interposição, entre duas superfícies, de uma película de baixa resistência ao cisalhamento, a fim de melhorar a suavidade do movimento de deslizamento de uma superfície sobre a outra, melhorando as condições de atrito e desgaste (STACHOWIAK, 2005).

Em contatos conformes a lubrificação ocorre usualmente por uma espessa camada de lubrificante, em regime de lubrificação hidrodinâmica ou hidrostática, que separa as superfícies em movimento relativo. Para esse tipo de contato, viscosidade

e sua relação com a temperatura são as propriedades mais importantes (ASM Handbook, 1992).

Em contatos não conformes a lubrificação ocorre em pequeníssimas áreas de contato por meio de filmes extremamente finos e sob altas pressões. Para esse tipo de contato o desempenho do lubrificante é afetado pela deformação elástica das superfícies de contato. As principais propriedades a serem observadas são a viscosidade em função da pressão e da temperatura (ASM Handbook, 1992).

Embora atrito e desgaste sejam fenômenos diretamente ligados, a ação lubrificante não ocorre necessariamente com a mesma eficiência para ambos. Em sistemas metálicos deslizantes, o coeficiente de atrito a seco varia entre 0,5 e 1. Conforme a utilização de lubrificação, essa faixa pode ser reduzida por um fator de 1/4 a 1/2. Já a redução no desgaste acontece geralmente de forma mais acentuada, sendo normalmente de, no mínimo, uma ordem de magnitude. Em alguns casos, é possível que a ação do lubrificante reduza o atrito enquanto aumenta o desgaste e vice-versa. Não obstante, ambas as faixas de redução dependem diretamente, dentre outros, do material lubrificante e das condições de carregamento (BAYER, 1994).

Na figura 6 são mostrados os três mecanismos de ação dos lubrificantes nas superfícies que afetam o atrito e o desgaste, são eles: Adsorção nas superfícies, modificação química das superfícies e separação física das superfícies. Os dois primeiros são responsáveis por reduzir a resistência das ligações nos contatos. Já o último provoca diretamente a redução do número de contatos (BAYER, 1994).

Figura 6 - Mecanismos de ação dos lubrificantes.



Adsorção



Modificação química



Separação física

Fonte: Adaptado de Bayer, 1994.

Ao manter-se confinado entre duas superfícies em movimento relativo e sob ação de forças externas, o fluido lubrificante promove a separação das superfícies. Quando na existência de movimento relativo tangencial entre as superfícies, ocorre a formação de cunhas de fluido, ao passo que na existência de movimento relativo perpendicular ou normal entre as superfícies, o fluido fica espremido (BAYER, 1994). Ambas as situações são exemplificadas na figura 7.

Figura 7 - Cunha de fluido e fluido espremido.



Fonte: Adaptado de Bayer, 1994.

2.2.3.1 ADITIVOS PARA LUBRIFICANTES

Segundo Bordignon (2018), aditivos para óleos lubrificantes são compostos orgânicos, minerais ou organometálicos que, adicionados em pequenas concentrações, cerca de 1% em massa, são utilizados para modificar as propriedades da base (óleo sem aditivos) visando reforçar suas qualidades ou garantir-lhe novas. Algumas das modificações comumente obtidas são:

- Melhora na capacidade de lubrificação;
- Redução do atrito;
- Redução do desgaste;
- Alteração na viscosidade;
- Resistência à oxidação;
- Proteção contra corrosão.

Para que o sistema (base + aditivo) funcione corretamente, é necessário que o aditivo seja solúvel no óleo base e compatível com eventuais outros aditivos. Para tanto, deve permanecer dissolvido ao longo de toda a faixa de temperatura e pressão operacional e, caso exista mais de um aditivo, não devem reagir entre si (STACHOWIAK, 2005).

Aditivos antidesgaste atuam protegendo as superfícies de contato em condições moderadas e severas de temperatura e pressão que são determinadas pela

carga e temperatura nas quais o aditivo funciona. Nesses casos, o regime de lubrificação presente é o limítrofe, no qual o filme lubrificante é extremamente fino (ASM Handbook, 1992).

2.2.3.1.1 CONDICIONADORES DE METAIS

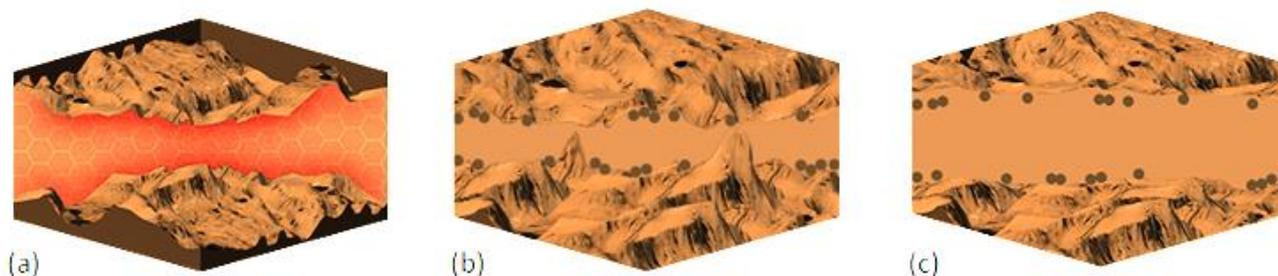
Condicionador de metais é um produto utilizado em situações em que são desejáveis redução de atrito e desgaste em sistemas mecânicos constituídos por peças metálicas. Ele atua criando uma barreira protetora antiatrito, por meio da adsorção do produto na superfície, que protege a peça, reduz atrito e desgaste, e em alguns casos, auxilia na redução da fadiga de alguns metais (DE OLIVEIRA et al., 2014).

Esse tipo de produto não é classificado como aditivo de lubrificantes, uma vez que não altera as características do óleo base, apenas migrando completamente para as superfícies metálicas, utilizando o lubrificante como mero “veículo de locomoção” (SEMBARSKI, 2018).

O Graffeno®, segundo seu fabricante, é um condicionador de metais constituído de nanopartículas de grafeno que, ao ser adicionado em qualquer sistema industrial que contenha lubrificação, reduz drasticamente o atrito e o desgaste garantindo melhor eficiência e longevidade ao equipamento. As nanopartículas de grafeno aderem perfeitamente à superfície metálica, formando uma película muito fina e extremamente resistente (GRAFFENO, 2023). Segundo o fabricante, o produto atua das seguintes maneiras:

- Formação de películas protetoras sobre o metal que evitam o contato entre as peças;
- Efeito de preenchimento que reduz a rugosidade da superfície devido ao seu tamanho nanoscópico;
- Efeito de rolamento, produzindo um alisamento nanoscópico na superfície metálica.

Figura 8 - Mecanismos de atuação do Graffeno® (a) Película protetora. (b) Preenchimento. (c) Rolamento.



Fonte: Graffeno, 2023.

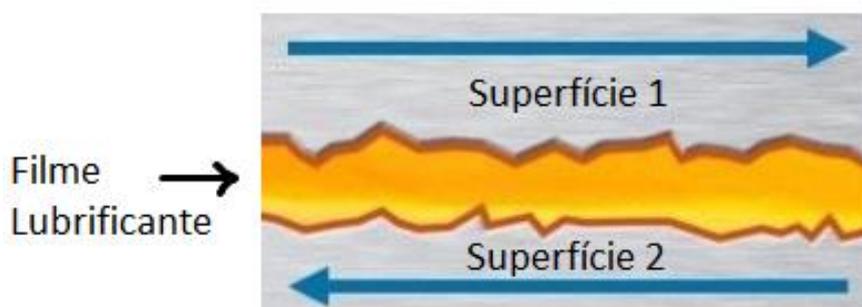
2.2.3.2 REGIMES DE LUBRIFICAÇÃO

Hutchings (1992), classifica os regimes de lubrificação nos seguintes tipos principais: lubrificação hidrodinâmica (LH), elastohidrodinâmica (LEH) ou mista (LM) e limítrofe (LL).

2.2.3.2.1 LUBRIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA

A lubrificação hidrodinâmica ocorre quando da formação de um filme lubrificante relativamente espesso entre duas superfícies em movimento que as separam completamente, como mostrado na figura 9. O tipo de contato entre as superfícies deve ser conforme, onde a pressão de contato é relativamente baixa. A força normal é suportada pela pressão gerada dentro do filme, sendo esta, consequência das forças viscosas que atuam dentro do lubrificante, que por sua vez, resultam do movimento relativo entre as superfícies. A geração da pressão hidrodinâmica só é possível graças a convergência dos ângulos das superfícies (HUTCHINGS, 1992).

Figura 9 - Lubrificação Hidrodinâmica.



Fonte: Adaptado de Noria, 2017.

2.2.3.2.2 LUBRIFICAÇÃO ELASTOHIDRODINÂMICA OU MISTA

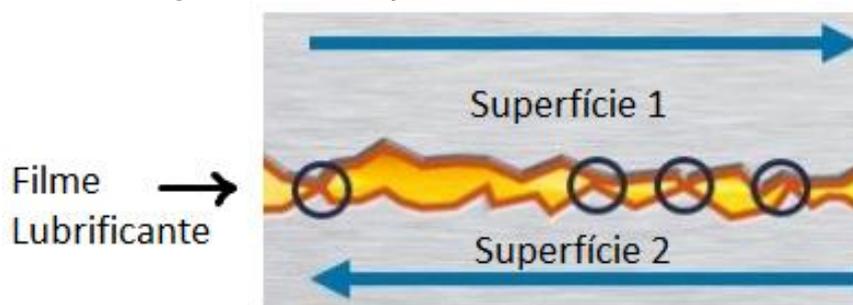
Esse tipo de lubrificação ocorre em situações de contato não conforme, sendo ele em ponto ou em linha, acarretando pressões de contato maiores em comparação ao contato conforme, e deformações elásticas nas superfícies de contato. Nessas condições, a viscosidade do fluido depende diretamente da pressão sofrida (HUTCHINGS, 1992).

A pressão advinda da carga normal aplicada acarreta a deformação da superfície, aumentando a área de contato e consequentemente distribuindo a pressão local (HUTCHINGS, 1992).

Nesse regime de lubrificação, a espessura do filme lubrificante está na escala micrométrica ou menor. No entanto, isso não impede que o filme contínuo separe as duas superfícies e evite o dano provocado pelo contato entre asperezas. O aumento da viscosidade do fluido provocado pela pressão elevada ajuda na manutenção da película (HUTCHINGS, 1992).

Segundo Salvaro (2015), como mostrado na figura 10, trata-se de uma transição entre os regimes hidrodinâmico e limítrofe, onde uma parte da carga é suportada pelas asperezas das superfícies, característica do regime limítrofe, e outra parte é suportada pelo filme lubrificante, característica do regime hidrodinâmico.

Figura 10 - Lubrificação Elastohidrodinâmica ou Mista.



Fonte: Adaptado de Noria, 2017.

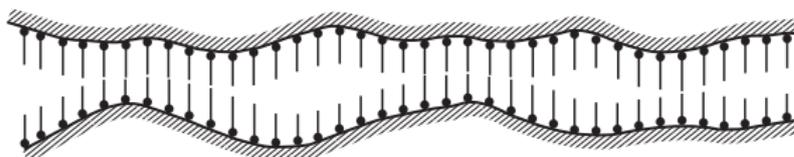
2.2.3.2.3 LUBRIFICAÇÃO LIMÍTROFE

Nesse regime de lubrificação, não existe um filme espesso de lubrificante. A interação entre os óxidos presentes na superfície e as moléculas do lubrificante causam a adsorção da fina camada de lubrificante na superfície. Na figura 11 são mostradas as forças repulsivas entre as películas que são responsáveis por suportar a maior parte da carga normal e evitar ou minimizar o contato entre asperezas

metálicas não protegidas, reduzindo assim o atrito. Portanto, mesmo que ocorra contato entre as superfícies, pode-se dizer que o desgaste é demasiado inferior em relação ao regime não lubrificado (HUTCHINGS, 1992).

Esse tipo de situação ocorre quando em baixas velocidades de deslizamento; altas pressões de contato; ou aumento da temperatura e diminuição da viscosidade do lubrificante (HUTCHINGS, 1992).

Figura 11 - Cadeias de hidrocarbonetos responsáveis pela repulsão entre as superfícies.

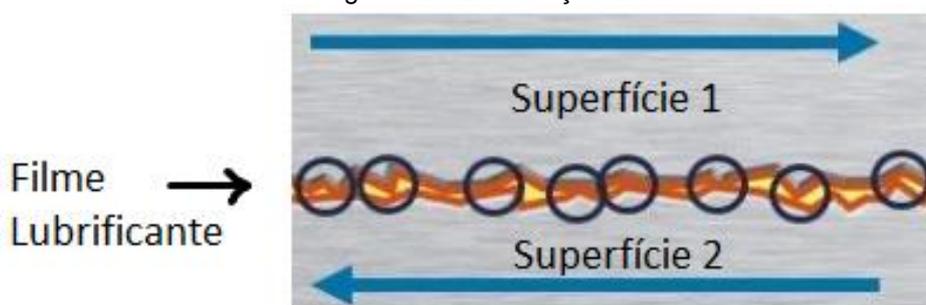


Fonte: Hutchings, 1992.

A redução do atrito, nesse tipo de lubrificação, é diretamente proporcional ao peso molecular do lubrificante e, portanto, ao comprimento da cadeia de hidrocarbonetos (HUTCHINGS, 1992).

Segundo Wojciechowski et al. (2016), a lubrificação limítrofe não é capaz de fornecer uma proteção duradoura para o tribosistema, sendo incapaz de evitar o desgaste por adesão devido aos inúmeros pontos de contato entre as superfícies e a pequena espessura do filme lubrificante, como mostrado na figura 12.

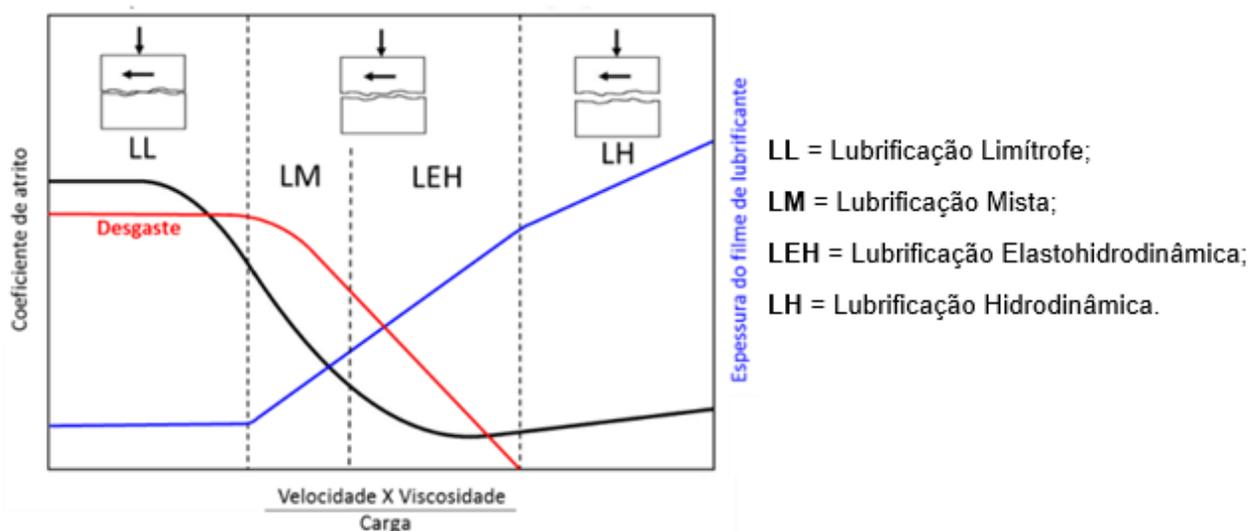
Figura 12 - Lubrificação Limítrofe.



Fonte: Adaptado de Noria, 2017.

Como forma de comparação entre os três regimes de lubrificação apresentados, na figura 13 é mostrado o diagrama de Stribeck que projeta o comportamento do coeficiente de atrito, a espessura do filme lubrificante e o desgaste para cada um dos regimes, em função da relação entre a velocidade relativa entre as superfícies, da viscosidade do óleo e carga aplicada.

Figura 13 - Diagrama de Stribeck para os principais regimes de lubrificação fluida.



Fonte: Adaptado de Yazawa et al., 2014.

2.2.3.3 NANOLUBRIFICANTES

Com as mudanças do mundo atual e crescimento da responsabilidade com o meio ambiente, pesquisadores têm estudado novos materiais com o intuito de substituir os aditivos conhecidos e utilizados frequentemente, já que esses apresentam elementos químicos nocivos à saúde ambiental. Por esse e outros fatores, como melhor eficiência e maior vida útil, a utilização de nanolubrificantes tem se destacado (BORDIGNON, 2018).

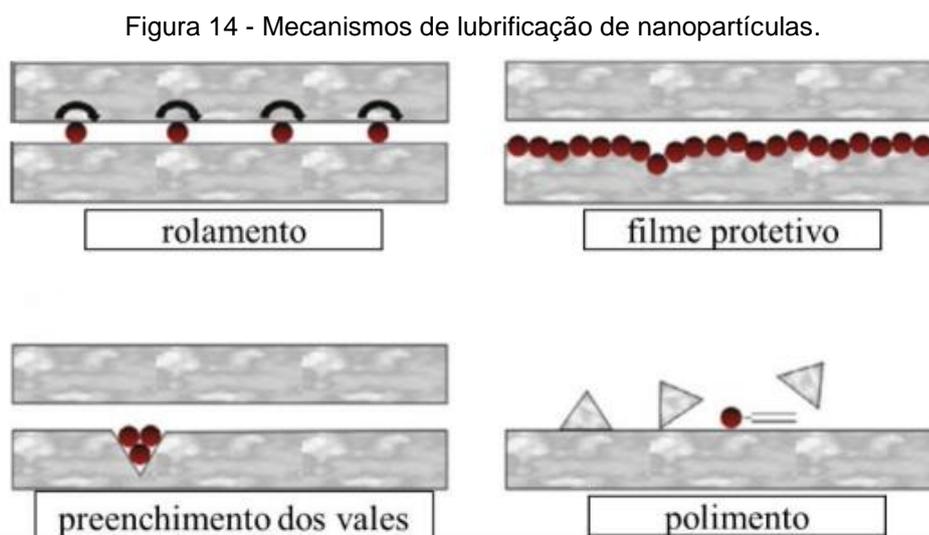
Segundo Fehine (2020), nanomaterial pode ser definido como um tipo de material que possui tamanho igual ou menor a 100 nanômetros (nm) em pelo menos uma dimensão. Essa característica, segundo Bordignon (2018), permite a eles atuarem diretamente nas regiões onde o contato acontece de verdade.

Recentemente, os estudos com nanopartículas como aditivos em óleos lubrificantes têm apresentado resultados relevantes do ponto de vista tribológico. Entre eles, estão as nanopartículas a base de carbono, como nanotubos de carbono, fulerenos e nanofolhas de grafite (BORDIGNON, 2018).

Segundo Mosleh et al. (2009), como mostrado na figura 14, a redução de atrito e desgaste causada pelas nanopartículas é possível graças aos seguintes mecanismos:

- Formação de um filme de lubrificante sólido (tribofilme);
- Rolamento das nanopartículas entre as superfícies em movimento relativo;

- Redução das asperezas através do preenchimento dos vales;
- Cisalhamento das nanopartículas presas entre as superfícies em contato sem causar adesão na superfície;
- Mudança na viscosidade do fluido lubrificante;
- Polimento das superfícies.



Fonte: Bordignon, 2018.

2.2.3.4 GRAFENO COMO ADITIVO EM ÓLEOS LUBRIFICANTES

O grafeno é uma forma alotrópica do carbono considerada como a única estrutura bidimensional, de fato, genuína, disponível na natureza. Aparece na forma de anéis de carbono de formato hexagonal, formando uma estrutura do tipo “*honeycomb*” (“favo de mel”). Graças as suas propriedades estruturais, eletrônicas e de transporte únicas, ele apresenta enorme potencial para o desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas (BORDIGNON, 2018).

Segundo Marlinda et al. (2023) o grafeno é altamente desejável para aplicações tribológicas graças as suas qualidades fantásticas como: alta resistência mecânica, excelente condutividade térmica e elétrica, baixa resistência ao cisalhamento e grande área superficial. Utilizar grafeno como lubrificante sólido ou como aditivo para lubrificantes líquidos pode ser, muitas vezes, uma alternativa interessante para sistemas que necessitam de alta lubrificação.

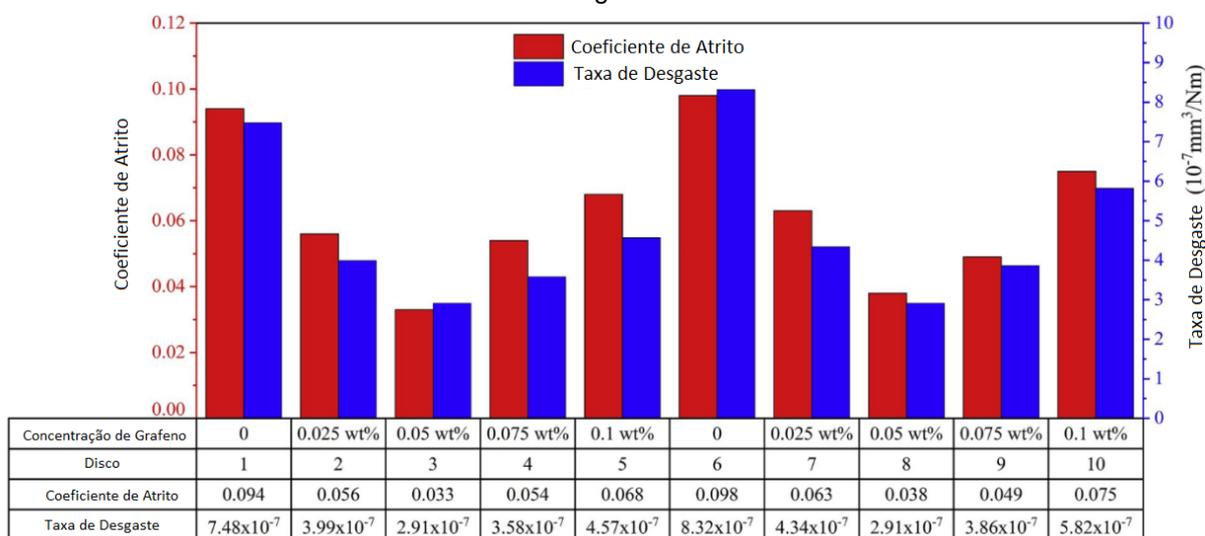
Nesse sentido, o grafeno possui características que o fazem ser um excelente aditivo para óleos lubrificantes. Segundo Bordignon (2018), pode-se citar:

- **Fina e nanométrica estrutura lamelar:** propicia o escorregamento entre seus planos. Como a tensão de cisalhamento interlamelar do grafeno é menor do que a força de cisalhamento entre as superfícies metálicas, o coeficiente de atrito do par metálico tende a diminuir.
- **Baixa energia de superfície:** Faz com que as superfícies metálicas tenham baixa adesão entre si. Quanto menor a energia de superfície menos átomos livres atraindo átomos de outros materiais e consequentemente menos adesão.

Ainda nesse aspecto, Wang et al. (2019) analisaram a influência do grafeno utilizado como aditivo em óleo lubrificante SAE 10W-30 e observaram que essa combinação reduziu significativamente o coeficiente de atrito e aumentou a resistência ao desgaste. Segundo os autores, o grafeno adsorvido e depositado nas superfícies de metal reduziu a rugosidade superficial do disco de aço e parcialmente preveniu o contato entre as asperezas do tipo metal-metal. Além disso, constatou-se que, durante o deslizamento, a tensão de cisalhamento interlamelar permaneceu muito baixa, fator que contribuiu para a redução dos coeficientes de atrito e taxas de desgaste.

O estudo mostrou que, para esse tipo de aplicação, não é correto assumir que quanto maior a concentração de grafeno melhor será a lubrificação. Uma concentração ótima de grafeno deve ser encontrada e utilizada, uma vez ao exceder esse limite, o lubrificante perde performance e atrito e desgaste voltam a subir. Esse comportamento pode ser observado na figura 15.

Figura 15 - Histograma de coeficiente de atrito e taxa de desgaste para diferentes concentrações de grafeno.

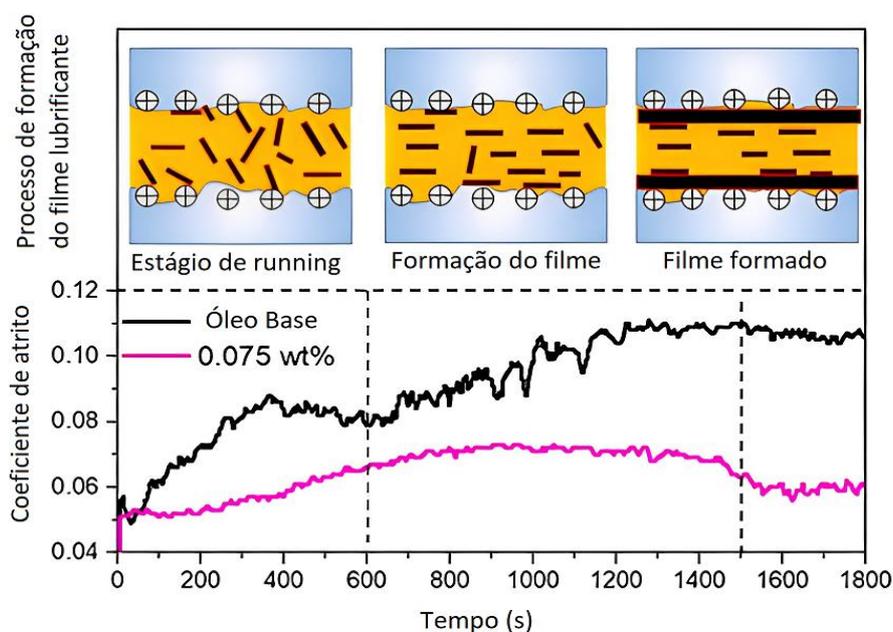


Fonte: Adaptado de Wang et al., 2019.

Outra característica importante que contribui para a redução do coeficiente de atrito e taxa de desgaste é a formação de películas protetoras de grafeno. O filme protetivo impede o contato direto entre as superfícies, na medida que o contato passa a ocorrer, majoritariamente, entre os filmes protetores (MARLINDA et al., 2023).

À vista disso, Wu (2021), estudou a formação do filme protetivo de grafeno associando-o com o coeficiente de atrito e constatou que, além do coeficiente de atrito ter sido reduzido drasticamente apenas pela presença do grafeno no óleo lubrificante, ao observar o processo de formação do filme protetivo, que se dá devido a ação da carga normal e da força de cisalhamento, constatou que, no momento em que o filme se formou por completo, o coeficiente de atrito reduziu mais ainda, levando a entender que o filme tem atuação direta na lubrificação, como pode ser observado na figura 16.

Figura 16 - Redução do atrito durante o processo de formação do filme protetivo de grafeno.



Fonte: Adaptado de Wu, 2021.

Sendo o grafite, de forma simplista, camadas de grafeno empilhadas, Marlinda et al. (2023), diz que, é razoável pensar que se possa utilizar grafite no lugar do grafeno para esse tipo de aplicação, já que o grafite é um material mais barato e acessível. No entanto, o grafite apresenta características que o tornam impróprio para utilização como aditivo em soluções líquidas, como: dificuldade de dispersão uniforme no líquido, causando diminuição da fluidez e desempenho lubrificante; e dificuldade de entrar na área de contato e formar uma película protetiva contínua, resultando em falta de lubrificação.

2.2.4 DESGASTE

Segundo Bayer (1994), para aplicações de engenharia, o termo desgaste pode ser definido como: Dano progressivo a uma superfície causado pelo movimento relativo com outra superfície. Ainda conforme Bayer (1994), desgaste significa causar dano, mas não se limita a perda de material da superfície. A perda de material é apenas uma das formas de se experienciar o desgaste.

Em condições moderadas de temperatura e pressão, o contato entre superfícies se limita ao contato entre suas asperezas, portanto, a maioria das formas de se experienciar o desgaste é resultado das interações microscópicas entre essas asperezas (STACHOWIAK, 2005).

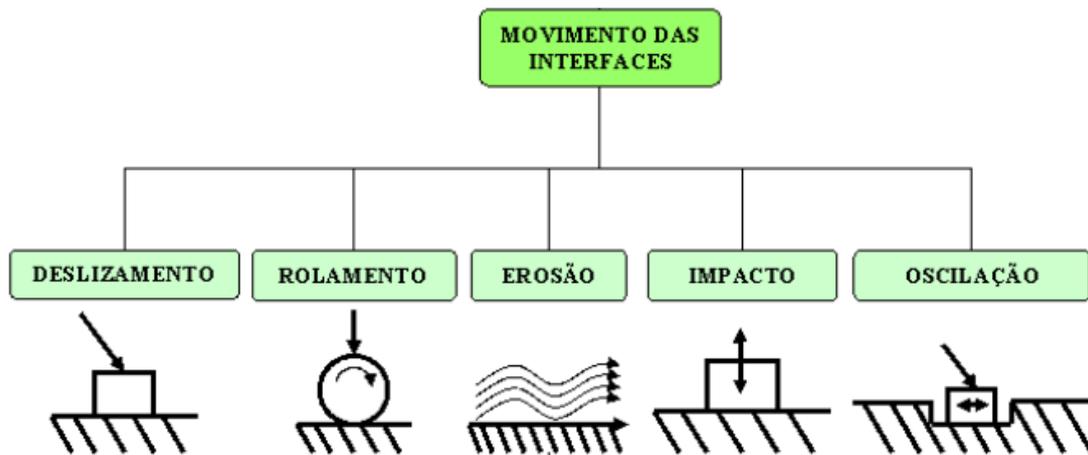
Nesse sentido, é simples inferir que superfícies demasiadamente rugosas possuem áreas de contato muito pequenas. Nesse tipo de situação, o atrito e o desgaste são determinados pela alta tensão que ocorre nos pequenos pontos de contato que acumulam altas concentrações de energia friccional (STACHOWIAK, 2005). É importante mencionar que na maioria das situações, para que o desgaste ocorra, é necessária a interação de diversas asperezas (BAYER, 1994).

Segundo Bayer (1994), existem três maneiras de analisar uma superfície desgastada, são elas:

- **Aparência da trilha de desgaste:** Comparação entre situações de desgaste. Exemplos: Riscado, polido e arranhado.
- **Mecanismo físico de remoção de material:** Classifica conforme os agentes causadores de danos. Exemplos: Adesão, abrasão, oxidação e delaminação.
- **Condições que envolvem a situação de desgaste:** Identificar o desgaste através de suas condições macroscópicas. Exemplos: desgaste lubrificado e não lubrificado; desgaste a seco; desgaste por rolamento; desgaste metal-metal; desgaste com alta tensão; desgaste em alta temperatura.

Segundo Radi et al. (2007), Do ponto de vista do tipo de interação realizado pelas superfícies e da cinemática do sistema, o desgaste pode ser classificado, conforme mostrado na figura 17, em: desgaste por deslizamento, desgaste por rolamento, desgaste por erosão, desgaste por impacto e desgaste por oscilação.

Figura 17 - Tipo de interação entre superfícies.

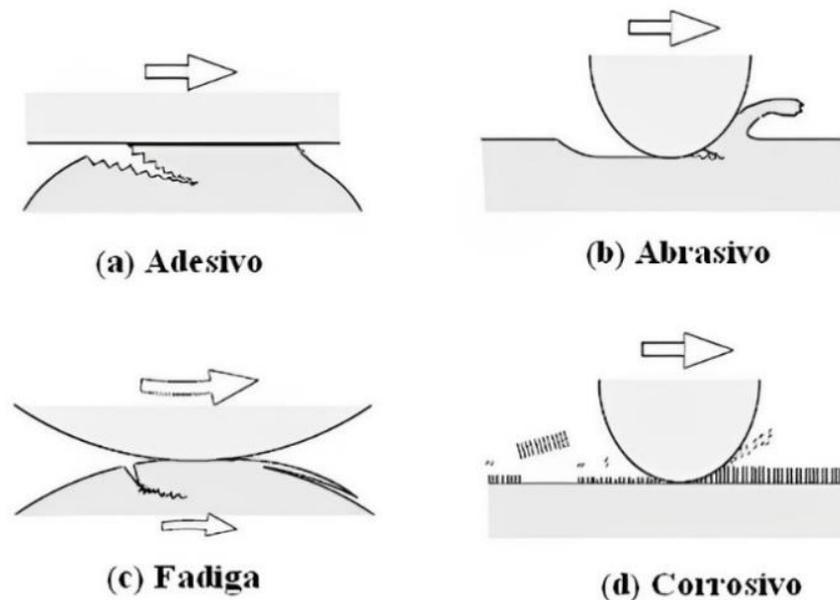


Fonte: Radi et al., 2007.

2.2.4.1 FORMAS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO

Convergindo com Kato (2001), Radi et al. (2007) cita que a classificação científica mais aceita fala em quatro formas de desgaste, são elas: Desgaste adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo, conforme representado na figura 18.

Figura 18 - Mecanismos de desgaste.

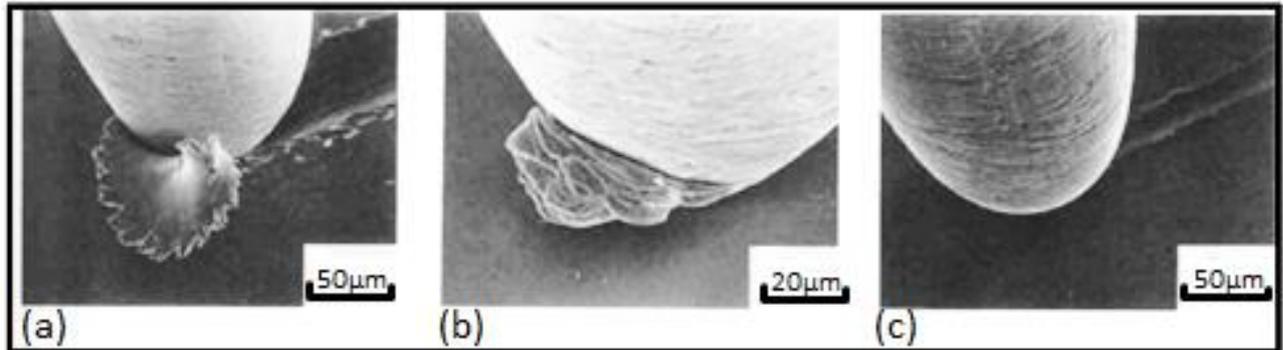


Fonte: Radi et al., 2007.

- **Desgaste adesivo:** Contato no qual ocorre uma ligação adesiva, entre as superfícies, suficientemente forte para impedir o deslizamento, transferindo material entre as superfícies e causando grandes deformações plásticas e trincas (KATO, 2001).

- **Desgaste abrasivo:** Como mostrado na figura 19, é o desgaste causado por partículas duras (abrasivas) que atuam, contra a superfície sólida, removendo material. A abrasão nada mais é do que um processo de riscamento (SERBINO, 2005).

Figura 19 - Processos de desgaste abrasivo: (a) corte; (b) formação de cunha; (c) riscamento.



Fonte: Kato, 2001.

- **Desgaste por fadiga:** Desgaste gerado por repetidos ciclos de contato (KATO, 2001). O carregamento cíclico é responsável pela geração de tensões que levam à deformação plástica e posterior formação de trincas (SERBINO, 2005).
- **Desgaste corrosivo:** Ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos, onde as interações químicas com o meio (reações triboquímicas) formam uma camada extra na superfície, que é posteriormente removida (RADI et al., 2007).

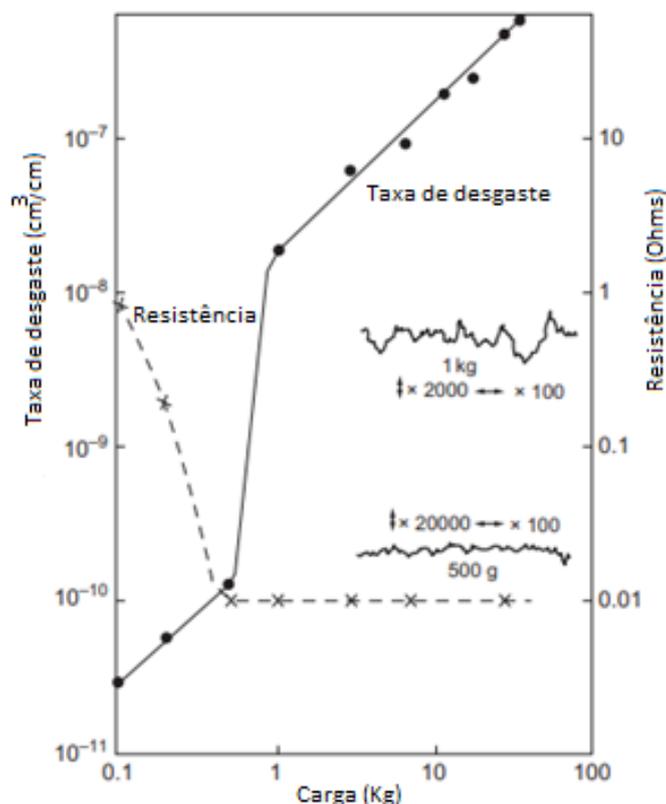
É importante citar que o desgaste de uma superfície não ocorre apenas pela ação de um único mecanismo por vez. Trata-se de uma conjunção de vários mecanismos simultâneos que, combinados, provocam os resultados conhecidos (SERBINO, 2005).

Estudos mostram que, para a maioria dos sistemas, a perda de material no processo de desgaste é proporcional à distância do deslizamento. No entanto, o período inicial de deslizamento pode apresentar comportamento transitório, no qual as taxas de desgaste podem ser superiores ou inferiores às correspondentes durante o estado estacionário do deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

Ainda segundo Hutchings (1992), a relação entre taxa de desgaste e carga normal, ocorre de maneira diferente. Embora haja situações nas quais o desgaste varia de forma estritamente proporcional à carga normal, são frequentes, variações

bruscas de baixa para alta de desgaste em função da elevação da carga. Como é possível observar na figura 20, a taxa de desgaste aumenta de forma abrupta quando uma carga normal crítica é atingida. Esse comportamento está associado à mudança da resistência no contato entre as superfícies.

Figura 20 - Taxa de desgaste e resistência no contato em função da carga normal para um pino de latão deslizando sobre um anel de Estelita.



Fonte: Adaptado de Hutchings, 1992.

O regime de desgaste para cargas baixas, antes da transição brusca, é caracterizado como “desgaste suave”, ao passo que, acima da transição, para cargas elevadas, chama-se de “desgaste severo” (HUTCHINGS, 1992). As diferenças entre os dois regimes de desgaste são apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Características do desgaste suave e severo.

	Desgaste suave	Desgaste severo
Taxa de desgaste	Baixa	Alta
Morfologia da superfície	Suave	Grosseira
Detritos	Partículas de óxido	Metal deformado
Resistência elétrica no contato	Alta	Baixa

Fonte: Adaptado de Hutchings, 1992.

Em caso de desgaste suave, as superfícies ficam separadas por camadas de óxido, logo, o contato metálico direto ocorre com menor frequência. Essa camada de óxido atua agindo como um lubrificante, responsável por reduzir o coeficiente de atrito.

É importante mencionar que, devido a carga cíclica, pedaços duros de óxido podem se soltar e funcionar como um terceiro corpo entre as superfícies, responsável por causar abrasão (HUTCHINGS, 1992).

Como já mencionado, diversos são os mecanismos que influenciam no processo de desgaste. Nesse sentido, Hutchings (1992) explica que a variação da carga normal, da velocidade de deslizamento e do tempo ou distância de deslizamento, influenciam na transição do mecanismo de desgaste dominante. Esses fatores estão intimamente ligados com as tensões mecânicas, temperatura e fenômenos oxidativos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para a realização dos ensaios foram utilizados conjuntos de pino e disco confeccionados em aço SAE 1045, como visto na figura 21. Os pinos possuem aproximadamente 18 mm de diâmetro por 9 mm de espessura. Os discos possuem aproximadamente 63 mm de diâmetro por 25 mm de espessura.

Figura 21 - Conjunto pino e disco.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Os ensaios foram realizados em duas condições de lubrificação: com e sem a adição do condicionador de metais. Para tanto, foram utilizados o óleo sintético Lubrax Valora 5W40 – API SN da marca Petrobras e o condicionador de metais da marca Graffeno®, conforme a figura 22. A concentração utilizada do condicionador de metais foi de 1% em volume do óleo lubrificante, de acordo com a recomendação do seu fabricante.

Figura 22 - Lubrificante Lubrax 5W40 e condicionador de metais Graffeno®.



Fonte: De autoria própria, 2023.

3.2 MÉTODOS

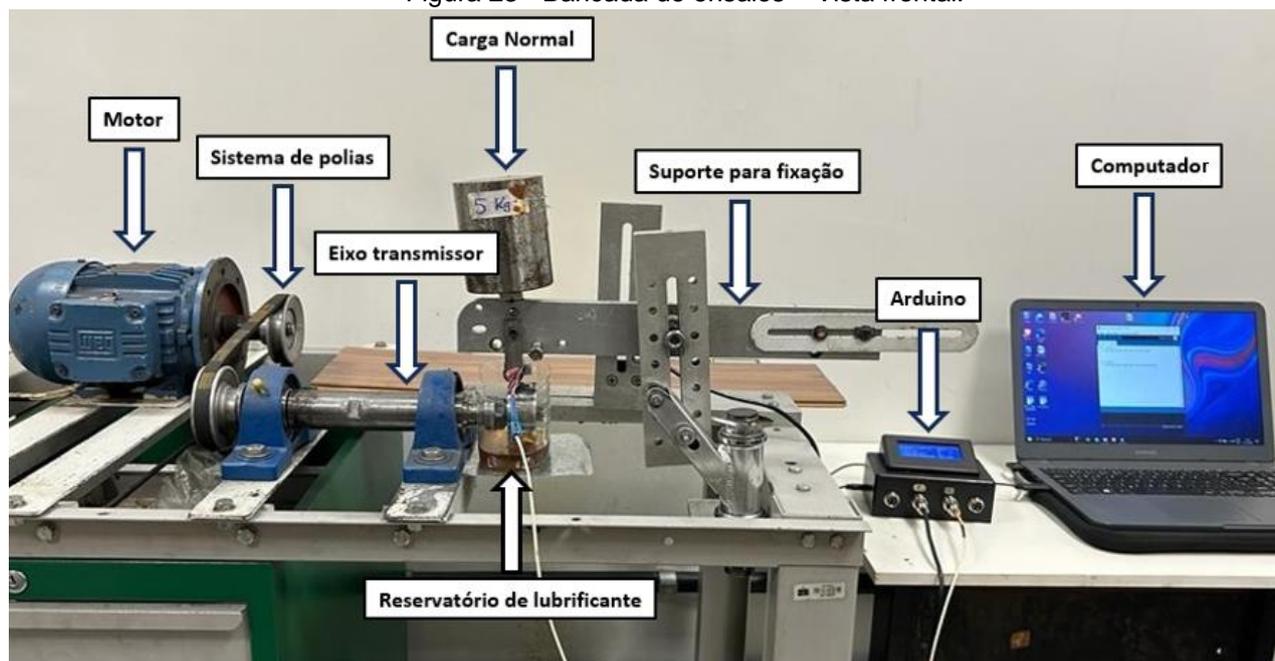
3.2.1 TRIBÔMETRO

Os ensaios para a elaboração do presente trabalho foram realizados em uma bancada de ensaios de desgaste (Tribômetro – Clemente 2017), localizada no laboratório de Tribologia da Universidade de Brasília e representada na figura 26.

A bancada é equipada com sensores eletrônicos que permitem a coleta de dados, em tempo real, da temperatura no pino e da força tangencial na região de contato pino-disco (força de atrito) (CLEMENTE, 2017). A instrumentação da bancada conta ainda com uma célula de carga de 5kg e um termopar, responsáveis por medir e registrar respectivamente a força de atrito no contato e a temperatura do pino, além de um reservatório para o óleo utilizado nos ensaios. Os dados de interesse foram coletados com o auxílio de um Arduino conectado a um computador.

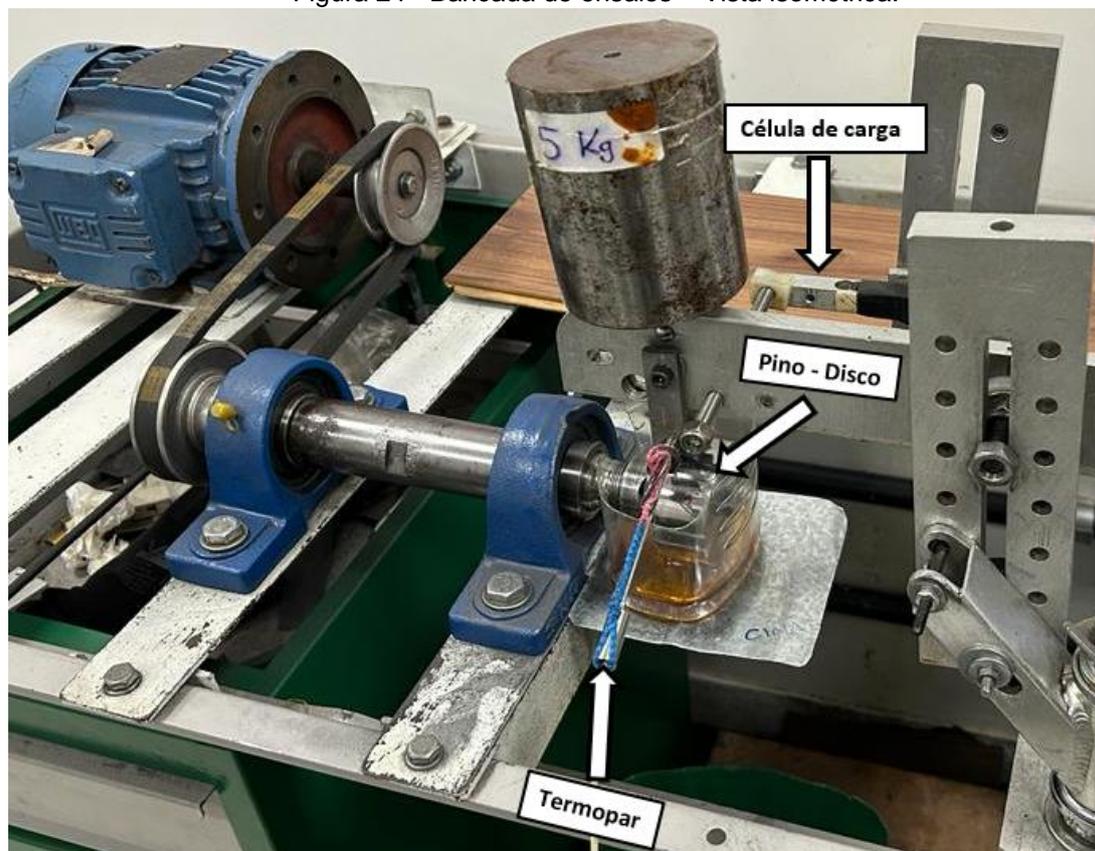
Além disso, o tribômetro é composto por um motor de indução elétrico de $\frac{1}{2}$ cv da marca WEG que, por meio de um sistema de polias, foi responsável por gerar o movimento de rotação necessário no disco de ensaio. O esquema da bancada é apresentado nas figuras 23 e 24.

Figura 23 - Bancada de ensaios – Vista frontal.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 24 - Bancada de ensaios – Vista isométrica.



Fonte: De autoria própria, 2023.

3.2.2 PREPARAÇÃO DAS SUPERFÍCIES

Antes do início dos ensaios, as superfícies das amostras foram preparadas de modo a garantir a padronização das condições iniciais. Os discos foram lixados com lixas de gramatura 80 até 2500 e polidos com massa de polir automotiva nº1. Já os pinos foram lixados com lixas de gramatura 80 até 400. As condições de lixamento foram definidas com base em ensaios semelhantes realizados por outros autores, bem como para simular condições de uso do aço em motores automotivos (SILVA, 2023). Em seguida, com o auxílio de um microscópio foram realizadas análises superficiais para garantir que as superfícies estavam nas condições desejadas.

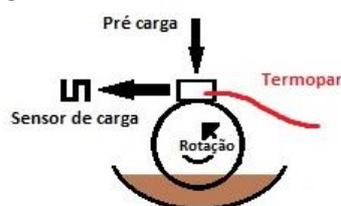
3.2.3 LUBRIFICAÇÃO

Os ensaios foram realizados nas seguintes condições de lubrificação:

- Lubrificado com óleo 5w40;
- Lubrificado com óleo 5w40 + Graffeno® na concentração de 1% m v.

A lubrificação foi realizada com auxílio de um reservatório de óleo localizado abaixo do disco. A rotação do disco direciona, por arraste, o lubrificante para a região de contato disco-pino, lubrificando o sistema, como representado na figura 25.

Figura 25 - Sistema de lubrificação.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Nos ensaios lubrificados com a adição do condicionador de metais Graffeno®, a proporção da solução seguiu a recomendação do fabricante de 1% em volume de Graffeno® sobre a capacidade total do óleo lubrificante. Para tanto, foi padronizado o uso de 50ml de óleo para 0,5ml de Graffeno®.

Todos os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM G99 que estabelece o procedimento padrão para ensaios do tipo pino sobre disco, para a determinação do desgaste e do coeficiente de atrito durante o deslizamento.

3.2.4 ENSAIOS PRINCIPAIS

Os ensaios principais foram realizados com o intuito de observar força e coeficiente de atrito, temperatura, realizar análises superficiais e quantificar a perda de massa (desgaste) em diferentes condições de lubrificação, tempo de ensaio e carga normal.

Para cada condição de lubrificação, foram realizados ensaios de diferentes durações, sendo 20, 60 e 120 minutos. Cada ensaio foi realizado com cargas normais de 25 e 50 N. Ao todo foram realizados 12 ensaios de desgaste mais os seus respectivos contra testes. A velocidade tangencial do disco foi mantida constante em 5,67 m/s. Na tabela 4 é mostrado um compilado com as configurações de todos os ensaios principais realizados.

Tabela 4 - Quadro-resumo com as configurações dos ensaios principais.

Tipo de lubrificação	Tempo	Carga
Óleo 5W40	20 minutos	25 N
Óleo 5W40	60 minutos	25 N
Óleo 5W40	120 minutos	25 N
Óleo 5W40	20 minutos	50 N
Óleo 5W40	60 minutos	50 N
Óleo 5W40	120 minutos	50 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	20 minutos	25 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	60 minutos	25 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	120 minutos	25 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	20 minutos	50 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	60 minutos	50 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	120 minutos	50 N

Fonte: De autoria própria, 2023.

3.2.5 ENSAIOS SECUNDÁRIOS

Os ensaios secundários foram realizados para compreender o comportamento da perda de massa ao longo do tempo, a partir dos instantes iniciais dos testes.

Para cada condição de lubrificação, foram realizados ensaios de diferentes durações, sendo 1; 2,5; 5 e 10 minutos. Cada ensaio foi realizado com cargas normais de 25 e 50 N. Ao todo foram realizados 16 ensaios de desgaste mais os seus respectivos contra testes. A velocidade tangencial foi mantida constante em 5,67 m/s. Na tabela 5 é mostrado um compilado com as configurações de todos os ensaios secundários realizados.

Tabela 5 - Quadro-resumo com as configurações dos ensaios secundários.

Tipo de lubrificação	Tempo	Carga
Óleo 5W40	1 minuto	25 N
Óleo 5W40	2,5 minutos	25 N
Óleo 5W40	5 minutos	25 N
Óleo 5W40	10 minutos	25 N
Óleo 5W40	1 minuto	50 N
Óleo 5W40	2,5 minutos	50 N
Óleo 5W40	5 minutos	50 N
Óleo 5W40	10 minutos	50 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	1 minuto	25 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	2,5 minutos	25 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	5 minutos	25 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	10 minutos	25 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	1 minuto	50 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	2,5 minutos	50 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	5 minutos	50 N
Óleo 5W40 + Graffeno®	10 minutos	50 N

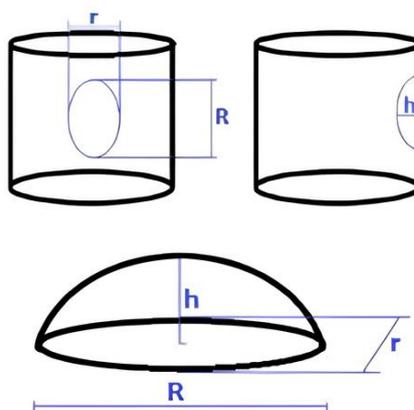
Fonte: De autoria própria, 2023.

3.2.6 CÁLCULO DA PERDA DE MASSA

O desgaste nos pinos foi determinado de forma geométrica, com base no volume de material perdido após o ensaio. As marcas de desgaste deixadas no pino apresentam formato semelhante à metade de um elipsoide. Nesse sentido, utilizando a equação 4 cujas variáveis são explicitadas na figura 26, foi possível calcular o volume de material retirado do pino.

$$V = \frac{r * R * h}{3}, \quad \text{Equação (4)}$$

Figura 26 - Medidas utilizadas para o cálculo do volume perdido.



Fonte: Pacheco, 2021.

As variáveis em questão foram obtidas medindo as dimensões do pino com um paquímetro e posteriormente, com o auxílio de uma imagem do pino capturada no microscópio por meio do programa *ToupView*, foi feita a proporção das medidas originais com as medidas da imagem, chegando as dimensões corretas do elipsoide.

De posse do volume e da densidade do aço SAE 1045, considerada como 7,87 g/cm³, foi possível calcular a perda de massa nos pinos.

Para complementar os dados apresentados, foi calculada a taxa de desgaste, necessária para o resultado de resistência ao desgaste, dividindo o volume perdido (mm³) pela distância total de deslizamento (m). A distância total de deslizamento foi calculada com base na velocidade tangencial de 5,67 m/s e o tempo de duração de cada ensaio.

3.2.7 DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO – REGIME DE LUBRIFICAÇÃO

O regime de lubrificação foi estabelecido com base na avaliação da pressão de contato entre o disco e o pino. Após identificar a área de contato entre esses componentes por meio da marca deixada no pino ao término do ensaio, é possível determinar a pressão final de contato utilizando a equação 5.

$$P = \frac{F}{A}, \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

P = pressão de contato [Pa];

F = Força normal [N];

A = Área de contato [m²].

Para determinar o momento aproximado da transição entre os regimes de lubrificação elastohidrodinâmico e hidrodinâmico, utilizou-se como referência o teste de menor duração para cada condição de lubrificação e carga, o qual foi de 60 segundos. Considerando o intervalo de 0 a 60 segundos como uma fase de crescimento linear, foi possível estimar o momento em que a pressão de contato ficou abaixo de 50 Mpa, condição a partir da qual, segundo Hutchings (1992), o regime de lubrificação é classificado como hidrodinâmico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados e discussões sobre os ensaios de desgaste realizados, sendo exibidos os valores médios dos testes e contra testes realizados.

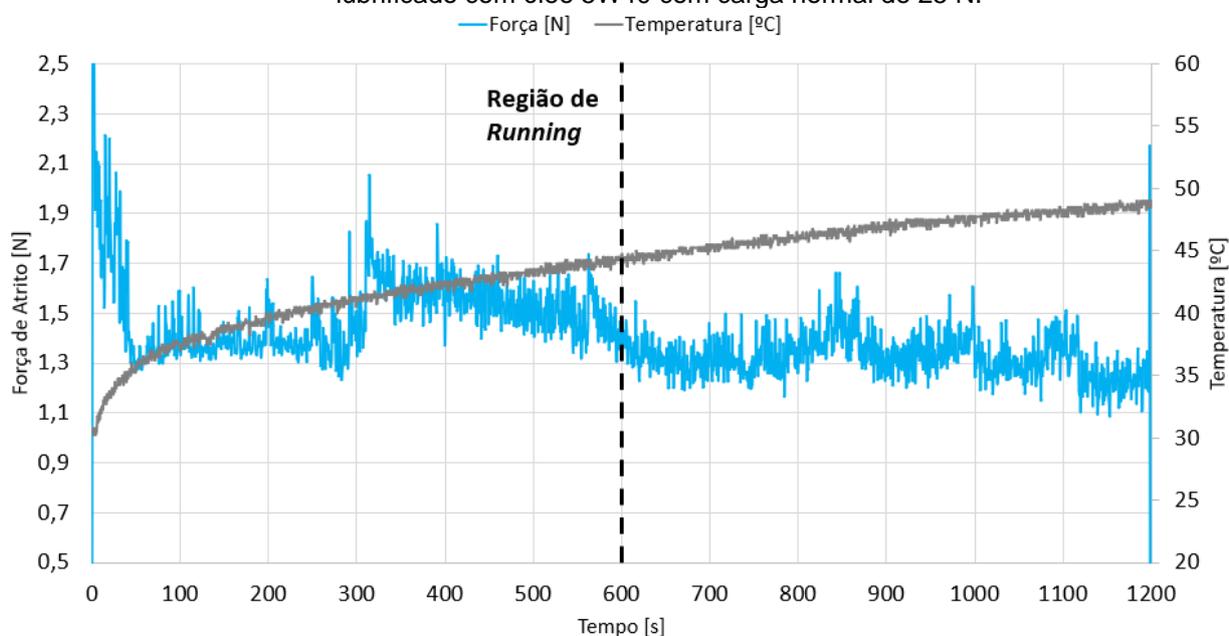
4.1 CARGA NORMAL: 25 N

4.1.1 TESTES – 20 MINUTOS

4.1.1.1 TESTE 20 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40

Força de atrito: Na figura 27 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Observa-se um rápido aumento da força de atrito no início do teste, seguido de grandes oscilações. Essa é a chamada região de *running*, durando aproximadamente 600 segundos de ensaio. Durante esse período acontece o assentamento entre as duas superfícies em contato (GUIMARÃES, 2023).

Figura 27 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

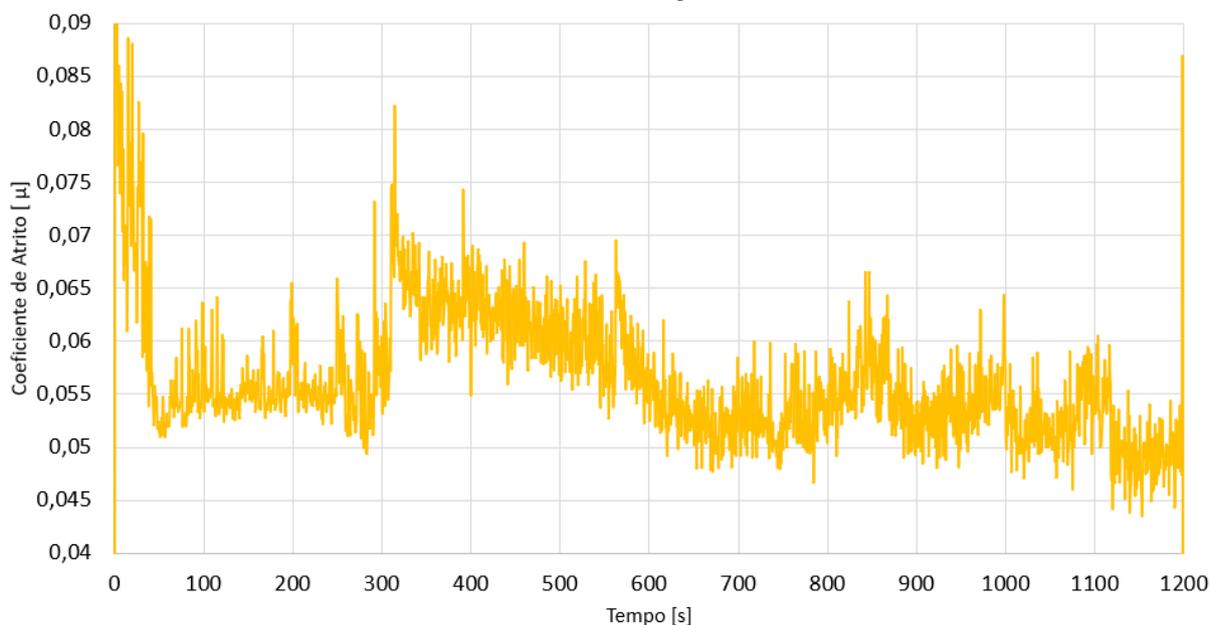
Após o *running*, a força de atrito se mantém próxima de 1,3 N com leve tendência diminutiva, chegando até 1,2 N ao final do ensaio. O pico de força de atrito que acontece próximo dos 300 segundos de ensaio pode ser explicado pela presença

de algum detrito que foi removido e que, pela dinâmica do ensaio, voltou a região de contato, causando efeitos abrasivos entre as superfícies elevando momentaneamente a força de atrito. Uma vez que esses detritos saem da região de contato, a força de atrito tende a se estabilizar novamente, assim como foi observado por Pacheco (2021). Essa explicação pode ser utilizada para todos os pequenos picos de força encontrados ao longo da curva.

Temperatura: O ensaio inicia em 30 °C. A temperatura aumenta de forma rápida nos primeiros segundos, acompanhando o aumento da força de atrito. Em seguida, passa a aumentar lentamente e de forma quase linear, até 49 °C, valor que atinge ao final do ensaio em 1200 segundos. Esse comportamento ocorre pois a geração de calor é maior que a dissipação, sendo assim o sistema acumula mais energia (GUIMARÃES, 2023).

Coefficiente de atrito: Na figura 28 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. As curvas de coeficiente de atrito e força de atrito, como esperado, apresentam o mesmo comportamento. Para este ensaio, o coeficiente de atrito manteve-se próximo de 0,055 reduzindo até 0,050 ao final do ensaio.

Figura 28 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.



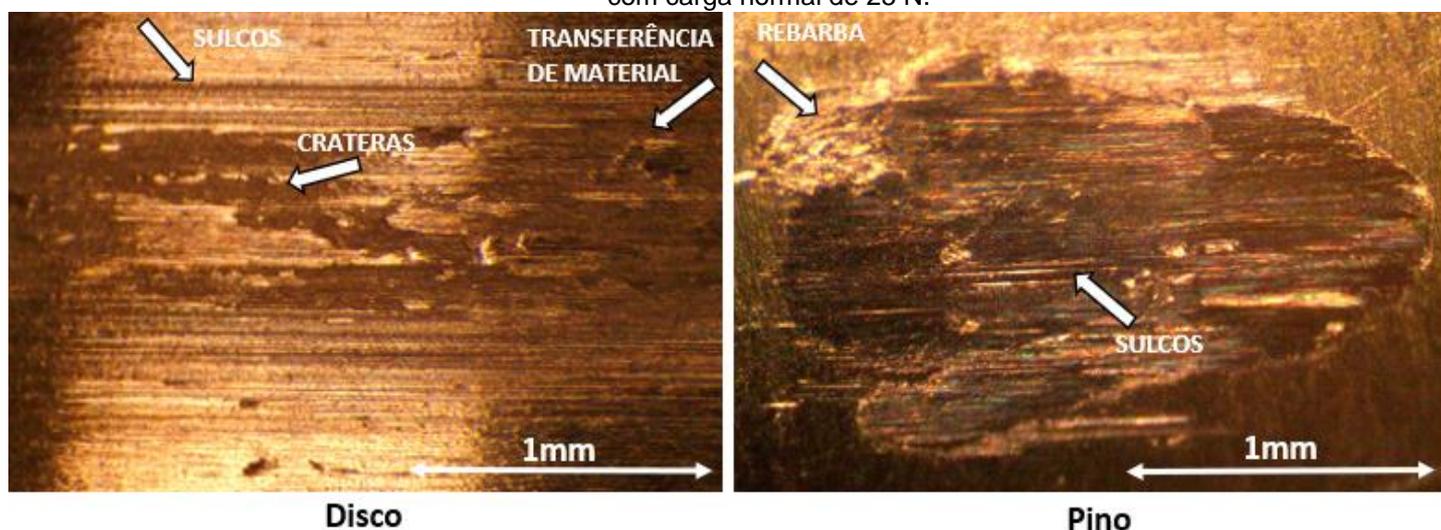
Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 29 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco estão presentes ranhuras no sentido do deslizamento geradas por mecanismos abrasivos e crateras que evidenciam o desgaste por fadiga, causado por tensões cíclicas (SERBINO, 2005). É possível observar ainda um ponto onde ocorreu transferência de material que possivelmente se desprendeu dos corpos de prova e se acumulou neste ponto, sendo característico do mecanismo de desgaste por adesão (KATO, 2001).

Já na superfície do pino nota-se uma região de deformação plástica bem como a ausência de crateras, que contrasta com o que foi encontrado no disco. Em ambas as superfícies são encontrados sulcos característicos de desgaste por mecanismos abrasivos (SERBINO, 2005).

Os mecanismos de desgaste predominantes no pino e no disco são diferentes devido à dinâmica do ensaio, na qual o pino fica preso em contato com o disco que por sua vez está em rotação, provocando o contato dinâmico. Esse comportamento se repete em todos os ensaios posteriores.

Figura 29 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.

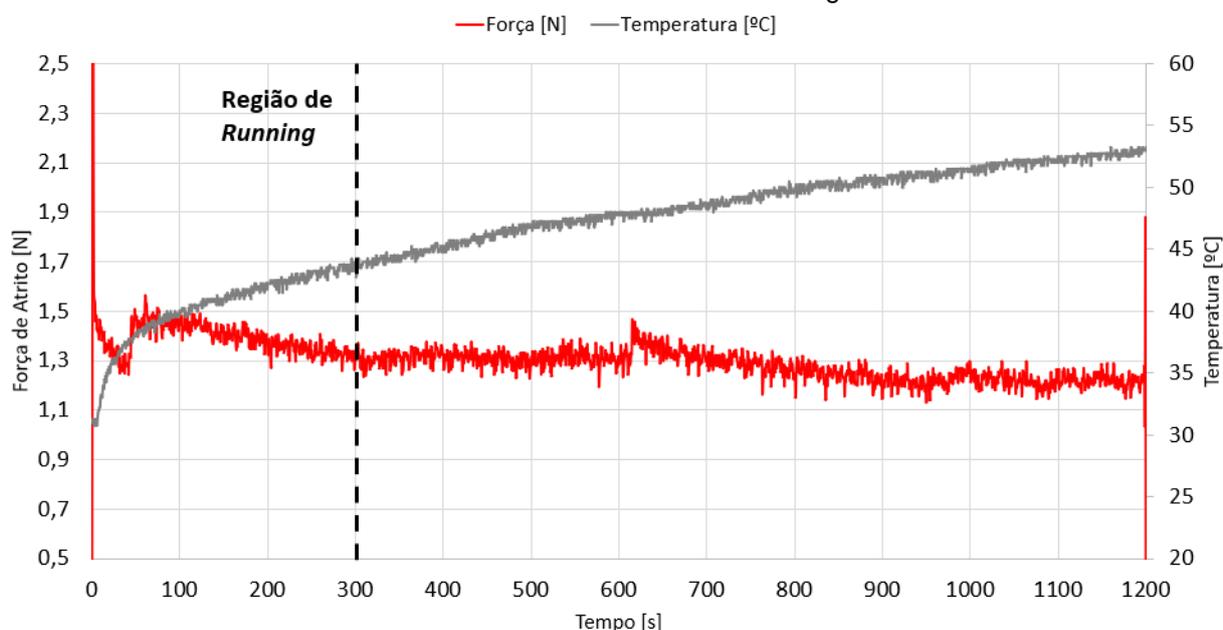


Fonte: De autoria própria, 2023.

4.1.1.2 TESTE 20 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40 + GRAFFENO®

Força de atrito: Na figura 30 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Neste ensaio, a região de *running* durou aproximadamente 300 segundos. A partir daí a força de atrito se mantém próxima de 1,3 N com leve tendência diminutiva, chegando até 1,2 N ao final do ensaio.

Figura 30 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



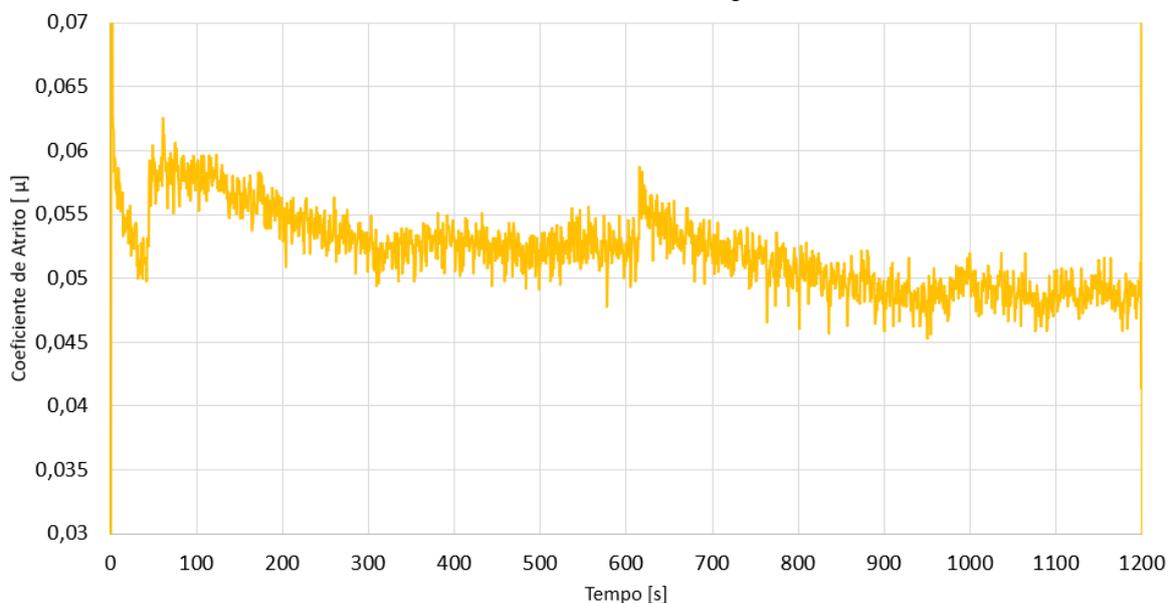
Fonte: De autoria própria, 2023.

Nota-se que a presença do Graffeno® faz com que os valores de força de atrito sofram poucas instabilidades. Os pequenos picos que ocorrem ao longo do ensaio, em especial aos 600 segundos podem ser explicados pela presença de detritos removidos que voltaram à região de contato, causando abrasão, conforme também observado para o teste sem o Graffeno®.

Temperatura: O ensaio inicia em 31 °C. Mais uma vez a temperatura aumenta de forma rápida nos primeiros segundos, acompanhando o aumento da força de atrito. Em seguida, passa a aumentar lentamente e de forma quase linear, até 53 °C, valor que atinge ao final do ensaio.

Coeficiente de atrito: Na figura 31 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito manteve-se inicialmente próximo de 0,06 reduzindo até 0,05 ao final do ensaio.

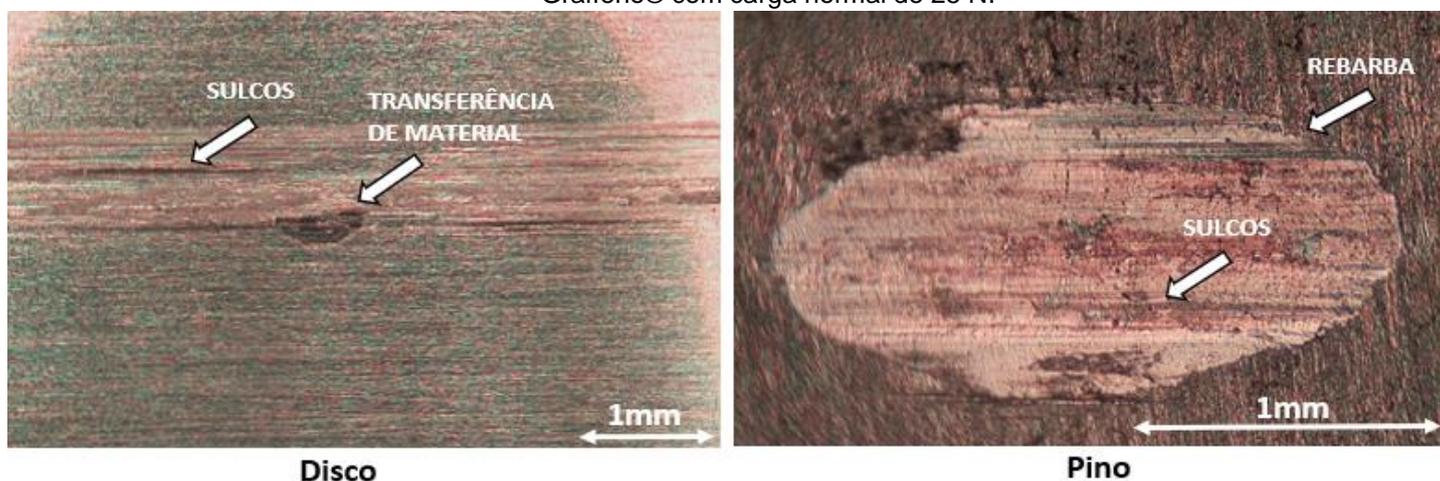
Figura 31 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 32 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio.

Figura 32 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

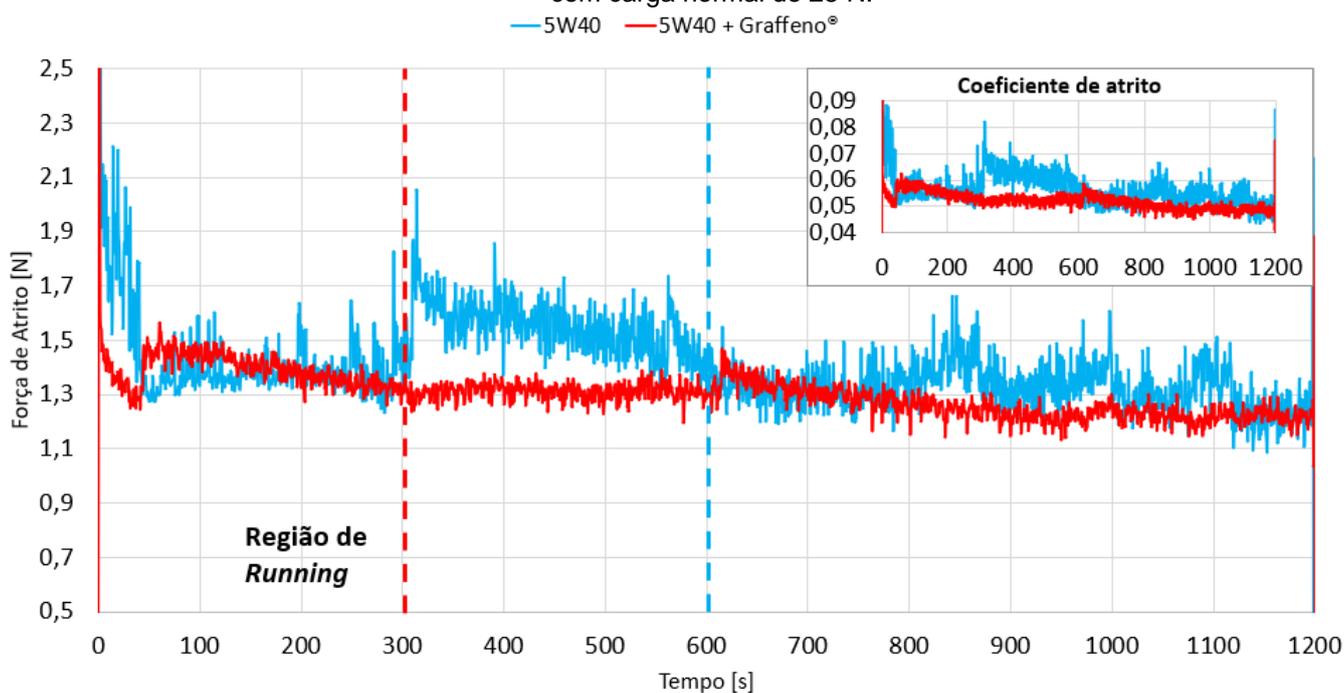
Na superfície do disco observam-se alguns sulcos profundos, evidenciados pela tonalidade mais escura, característicos de desgaste abrasivo por partículas duras. Estas partículas possivelmente foram criadas após o arrancamento e encruamento do material do próprio corpo de prova. É possível observar este mesmo material arrancado e acumulado em uma região na superfície do disco. A superfície do pino apresenta alguns sulcos profundos, evidenciados pela tonalidade mais escura,

que coincidem com os do disco, bem como rebarbas nas bordas do elipsoide, evidenciando deformações plásticas.

4.1.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TESTES DE 20 MINUTOS

Força e coeficiente de atrito: Na figura 33 é apresentado um comparativo da variação da força de atrito e do coeficiente de atrito, para os ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N. Nota-se que os valores da força de atrito ao longo das curvas são muito parecidos, mantendo-se, em média, de 1,5 a 1,2 N no decorrer do ensaio, sugerindo que o uso do Graffeno®, para essa carga e duração de ensaio, não é eficaz para a redução dos valores de força e coeficiente de atrito.

Figura 33 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

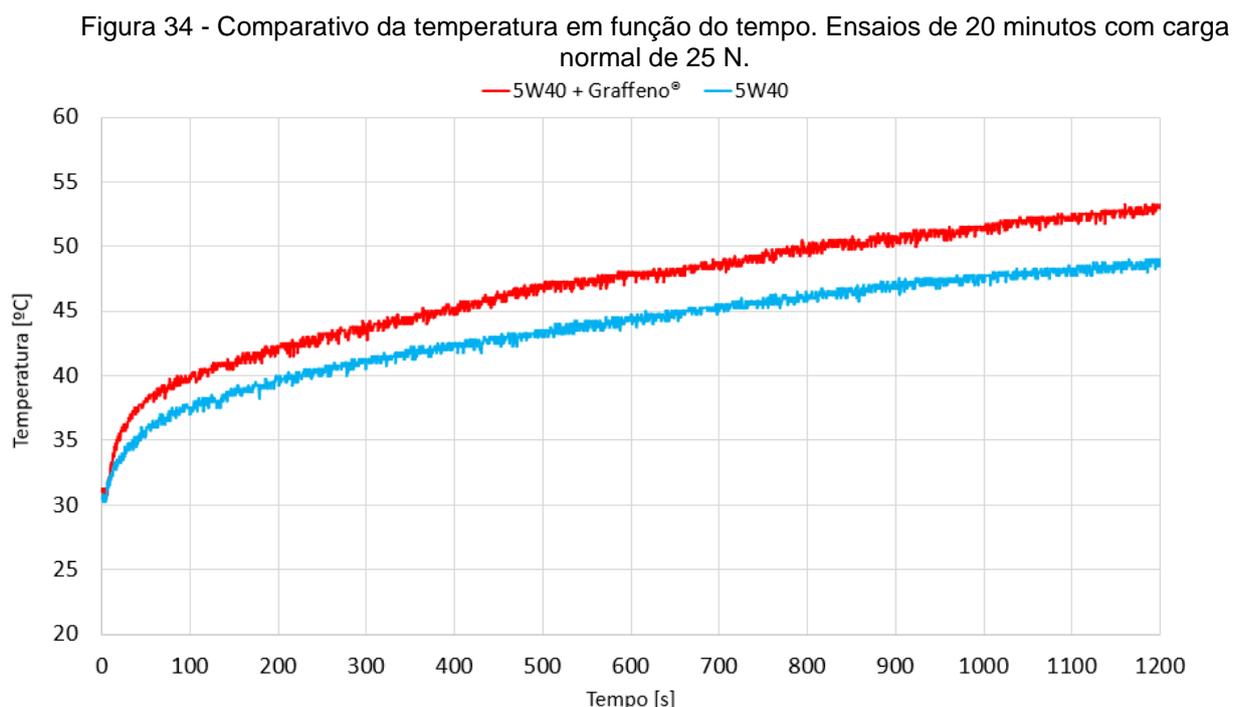
Todavia, é possível observar que a curva do ensaio lubrificado somente com óleo 5W40 apresenta maior instabilidade em comparação com a curva do ensaio acrescido de Graffeno®, levando a crer que, apesar dos valores médios serem muito parecidos, a presença do Graffeno® mantém a força de atrito mais estável no decorrer do tempo. Esse comportamento pode ser explicado pelas características do condicionador de metais, que, Segundo Mosleh et al. (2009), reduz as asperezas através do preenchimento dos vales ao mesmo tempo que realiza um polimento nas

superfícies, diminuindo sua rugosidade, bem como através da formação de um tribofilme protetivo, reduz o efeito abrasivo causado por detritos.

As curvas de coeficiente de atrito podem ser comparadas de maneira semelhante às curvas de força de atrito pois exibem comportamentos similares.

Por fim, os períodos de *running* variaram bastante. Enquanto com 5W40 o *running* foi de, 600 segundos, com Graffeno® ele durou aproximadamente 300 segundos. Possivelmente, as superfícies do conjunto pino-disco lubrificado com óleo 5W40 estavam mais rugosas do que as superfícies lubrificadas com Graffeno®, isso resultaria em um prolongamento do tempo necessário para o encaixe entre as superfícies, ou, um período maior de *running*, assim conforme Mezghani et al. (2013).

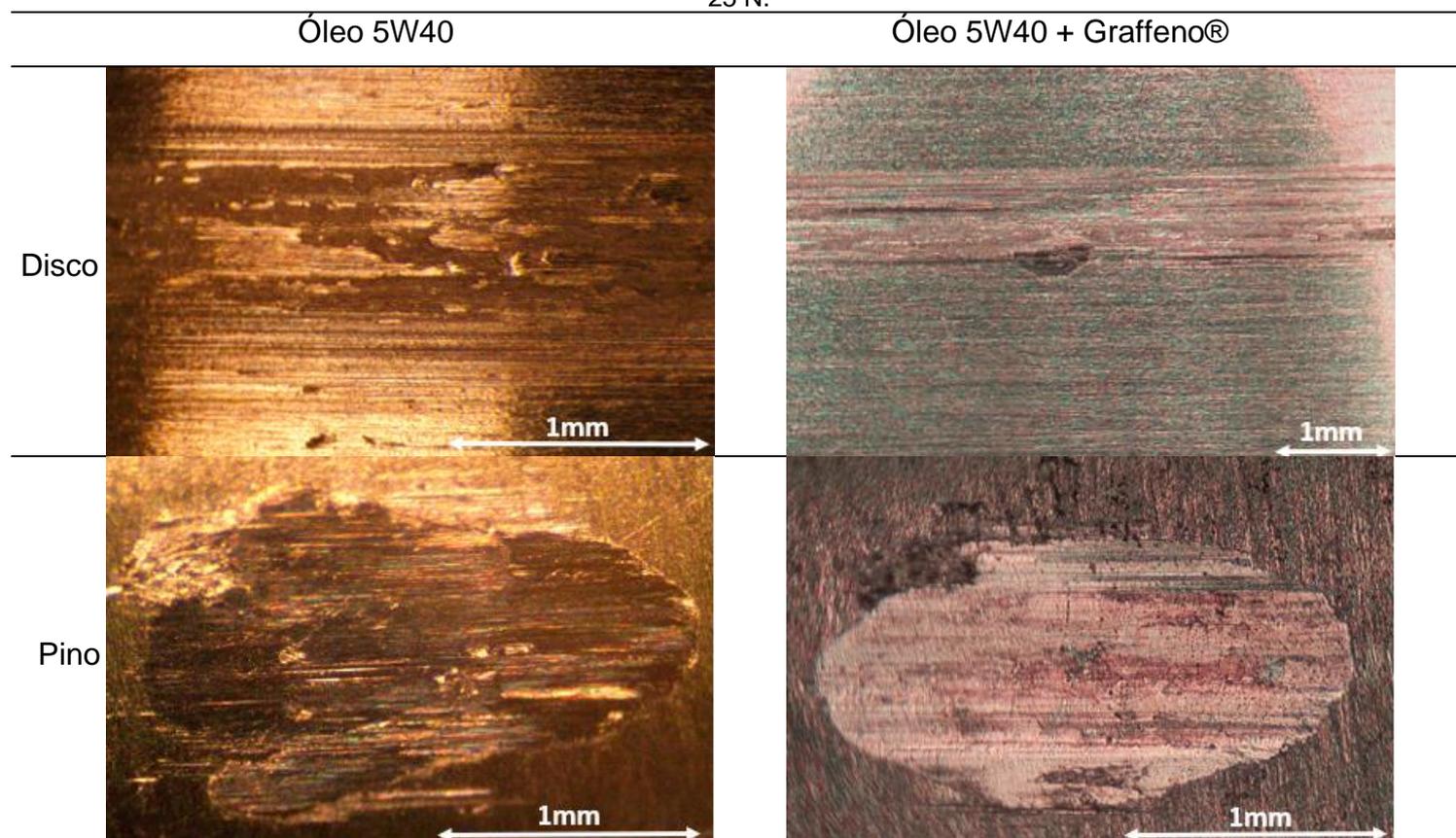
Temperatura: Na figura 34 é apresentado um comparativo da variação da temperatura em função do tempo para os ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N. É possível observar que a utilização do Graffeno® reduziu a capacidade dissipativa de calor, especialmente nos momentos iniciais do ensaio. Mesmo partindo do mesmo ponto, o ensaio com Graffeno® terminou em 53 °C, em comparação ao óleo 5W40 puro, que terminou em 49 °C. Comportamento semelhante foi observado por Pacheco (2021), com a utilização de condicionador de metais diverso. Assim como cita Guimarães (2023), isso pode indicar que as propriedades do Graffeno® funcionem melhor em condições mais críticas do que as ensaiadas.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na tabela 6 é mostrado o comparativo das superfícies desgastadas dos discos e pinos após os ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N. Para ambos os ensaios foi possível observar a presença de sulcos, deformações plásticas e transferência de material.

Tabela 6 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

A utilização do Graffeno® reduziu a largura da trilha de desgaste e a quantidade de sulcos, porém estes, foram mais profundos. A diminuição da trilha de desgaste e redução dos sulcos pode ser atribuída a adsorção do condicionador de metais nas superfícies, que, segundo o fabricante, forma películas protetoras sobre o metal que evitam e reduzem o contato direto entre as peças. Já o aprofundamento dos sulcos pode ser explicado pelas supostas partículas de grafeno presentes no condicionador de metais que podem estar agindo como agentes abrasivos e, ao serem depositadas nas superfícies, podem ter potencializado a abrasão no sistema e conseqüentemente aprofundando os sulcos. A profundidade dos sulcos pode ser verificada visualmente comparando a tonalidade, mais clara ou mais escura, das trilhas.

Em ambos os discos foi possível observar transferência de material, no entanto, na presença do Graffeno® ela foi maior. Por outro lado, o pino com óleo puro apresenta maiores deformações plásticas. Essas observações ao mesmo tempo que conflitam, corroboram com o que diz Bordignon (2018). Segundo o autor, o grafeno por sua baixa energia de superfície deve evitar a adesão entre os metais.

A lubrificação somente com óleo 5W40 levou a formação de diversas crateras nas superfícies dos corpos de prova. Esse conjunto de informações leva a crer que a presença do Graffeno® atenuou alguns mecanismos de desgaste (fadiga) e acentuou outros (abrasão). Já o desgaste por adesão, apresentou comportamento dúbio, hora acentuado, hora atenuado. Esse comportamento se repete, de forma geral, para todos os ensaios realizados com carga normal de 25 N. Por fim, o elipsoide na superfície do pino com Graffeno® ficou mais uniforme se comparado ao óleo 5W40, indicando maior uniformidade no processo de desgaste.

Perda de massa e desgaste: Na tabela 7 são apresentados, em função do tipo de ensaio realizado, os valores de perda de massa e taxas de desgaste calculados para os ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N. Na figura 35 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as perdas de massa.

Tabela 7 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N.

Tipo de ensaio	Perda de massa [10^{-4} g]	Taxa de desgaste [10^{-6} mm ³ /m]
Óleo 5W40	1,17 ± 0,06	2,18 ± 0,11
Óleo 5W40 + Graffeno®	1,20 ± 0,07	2,25 ± 0,13

Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 35 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Contrariando as informações do fabricante, para ensaios de 20 minutos com carga normal de 25 N, o Graffeno® mostrou-se, em média, ineficiente na redução do desgaste. Entretanto, para ambas as condições de lubrificação o valor de desgaste foi muito próximo, o que ratifica os dados encontrados para força de atrito.

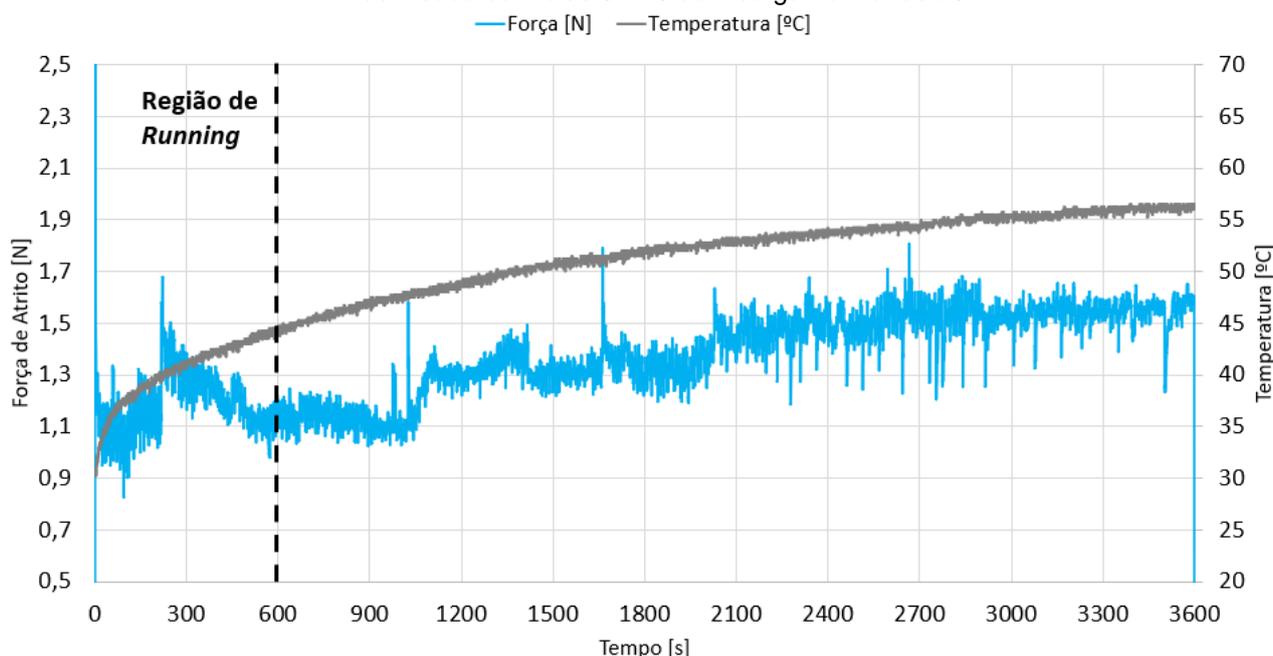
Analisando detalhadamente, a diferença na perda de massa foi de 3×10^{-6} g a favor do óleo 5W40 puro. Esse valor representa uma diferença de 7×10^{-8} mm³/m na taxa de desgaste, que por sua vez equivale a uma resistência ao desgaste apenas 3,2% maior do pino lubrificado com óleo 5W40 puro em relação ao lubrificado com óleo + Graffeno®. A diferença apontada encontra-se dentro dos limites da dispersão observada nos testes. Nesse sentido, é possível afirmar que a intensidade do desgaste ocorrido nos pinos foi, em ambos os casos, coincidente.

4.1.2 TESTES – 60 MINUTOS

4.1.2.1 TESTE 60 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40

Força de atrito: Na figura 36 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Novamente observa-se o rápido aumento da força de atrito seguido de poucas oscilações até que o pino se acomode sobre o disco (região de *running*) que dura cerca de 600 segundos de ensaio.

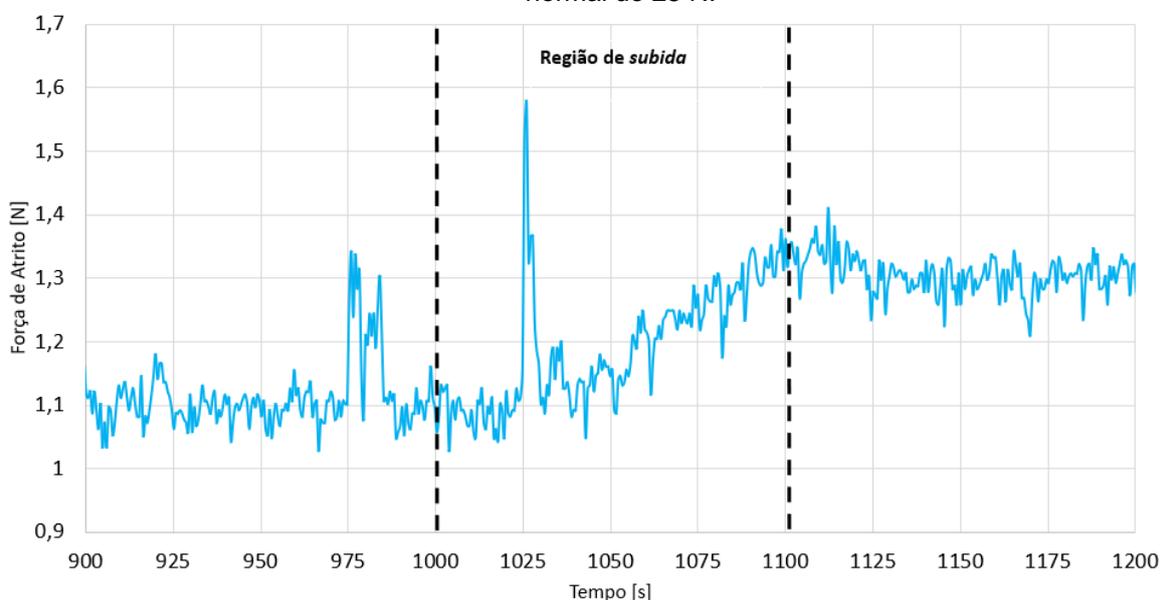
Figura 36 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Após o *running* a força de atrito se estabiliza próxima de 1,1 N até 1000 segundos de ensaio. Entre 1000 e 1100 segundos nota-se uma região onde a força de atrito volta a subir rapidamente (chegando a 1,3 N) seguida por paulatina subida, até se manter em 1,5 N, valor que perdura até o final do ensaio. Possivelmente, essa região de subida advém de um período de transição dos mecanismos de desgaste predominantes entre as superfícies, a partir do qual o contato e as interações entre as superfícies mudam, fazendo com que a força de atrito suba. A região de subida é evidenciada na figura 37.

Figura 37 - Região de subida ampliada. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.



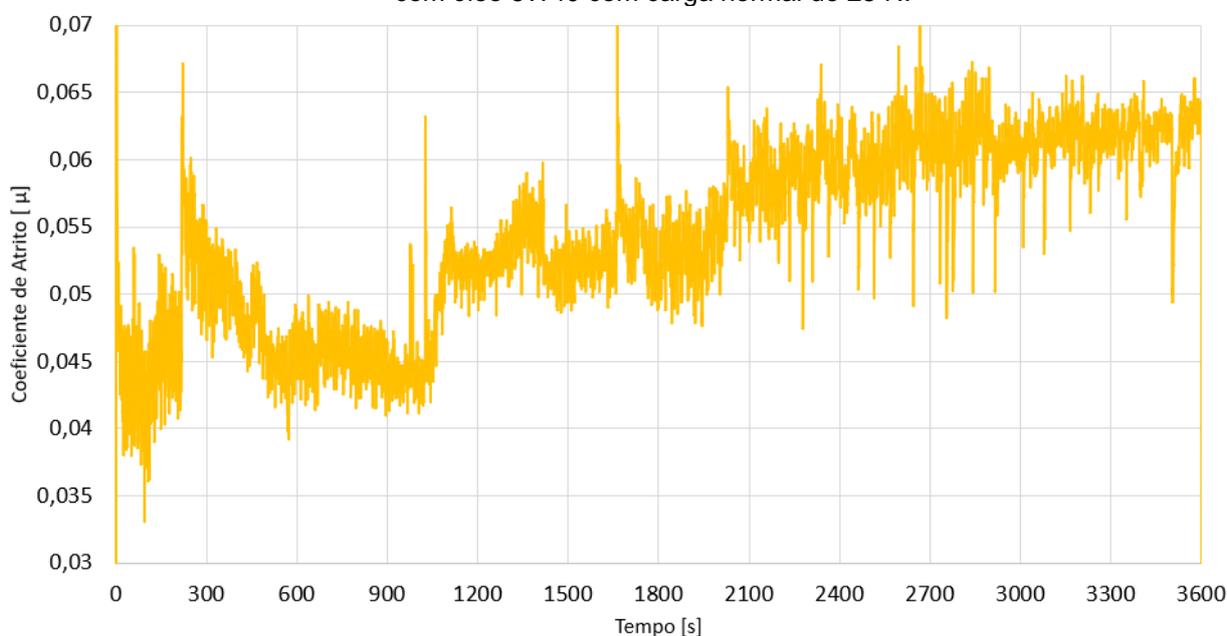
Fonte: De autoria própria, 2023.

Essa observação encontra respaldo na teoria de Hutchings (1992), segundo o autor a variação da carga normal, da velocidade de deslizamento e do tempo ou distância de deslizamento, influenciam na transição dos mecanismos de desgaste predominantes. Nesse sentido, sendo a carga normal e a velocidade do deslizamento constantes, é possível concluir que a distância ou tempo de deslizamento, nesse caso, foi responsável por causar a transição entre os mecanismos de desgaste predominantes.

Temperatura: O ensaio inicia em 30 °C. A temperatura aumenta de forma rápida nos primeiros segundos, acompanhando o aumento da força de atrito. Em seguida, passa a aumentar lentamente até 56 °C, valor que atinge ao final do ensaio.

Coefficiente de atrito: Na figura 38 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito se manteve próximo de 0,045 até o período de 1100 segundos de ensaio, quando subiu rapidamente para 0,050 e se manteve crescente paulatinamente até aproximar-se de 0,060, valor que perdurou até o final do ensaio. Dado que as curvas de força e coeficiente de atrito apresentam o mesmo comportamento, é simples inferir que a região de subida ocorrida entre 1000 e 1100 segundos, no coeficiente de atrito, pode ser resultado da mudança nos mecanismos de desgaste predominantes entre as superfícies.

Figura 38 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.

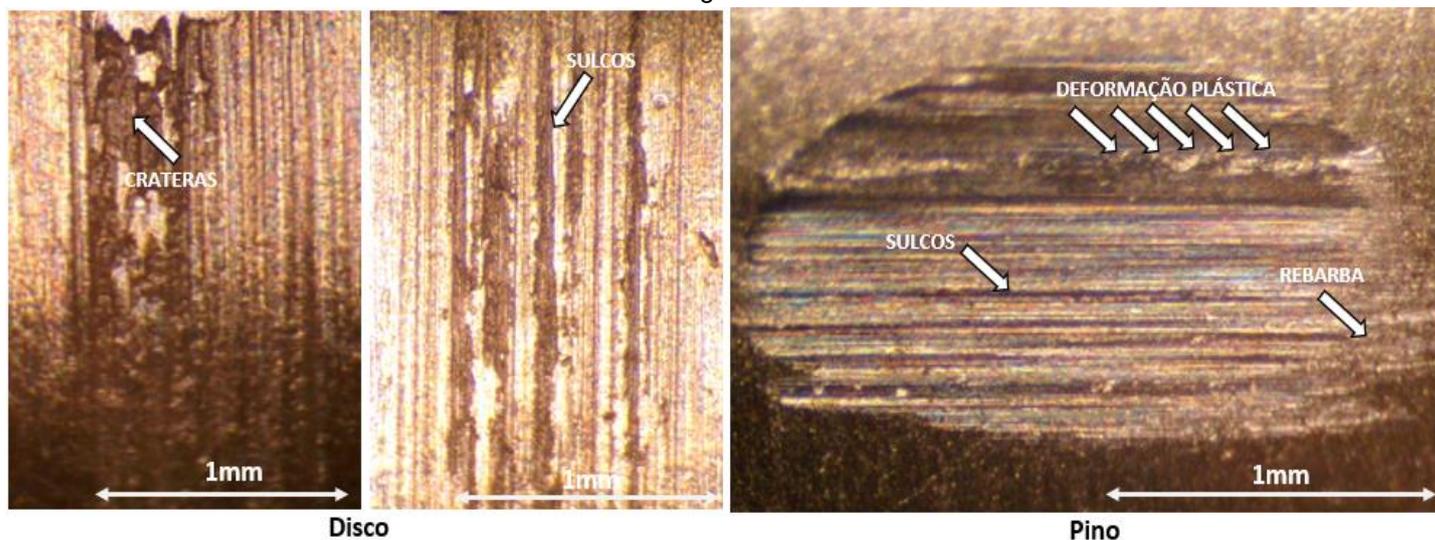


Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 39 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco são notadas crateras bem escuras e profundas, características do desgaste por fadiga, e ranhuras no sentido do deslizamento causadas por abrasão.

Na superfície do pino é possível observar uma trilha de deformação plástica no sentido do deslizamento, bem como rebarbas frágeis também criadas por deformações plásticas. Em ambas as superfícies se nota a presença de sulcos escuros, profundos e bem definidos, característicos do desgaste abrasivo.

Figura 39 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.

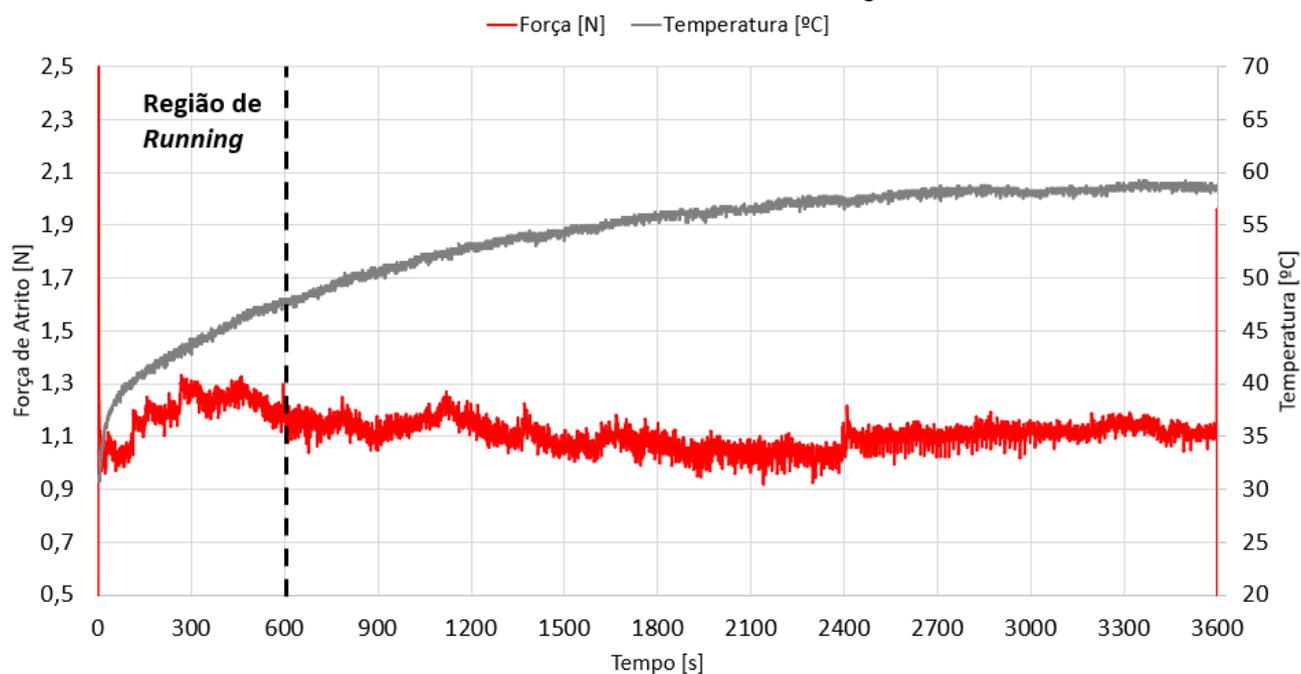


Fonte: De autoria própria, 2023.

4.1.2.2 TESTE 60 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40 + GRAFFENO®

Força de atrito: Na figura 40 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o período de *running*, que durou cerca de 600 segundos de ensaio, a força de atrito se estabilizou próxima de 1,1 N e, com pequenas oscilações, assim se manteve até o final do ensaio.

Figura 40 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.

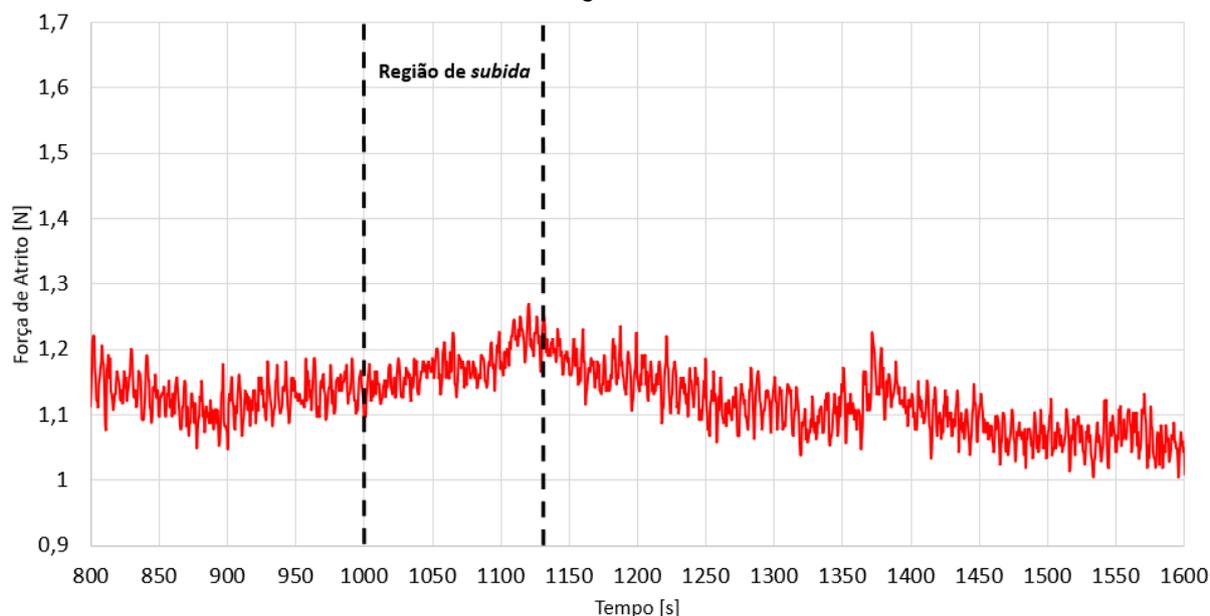


Fonte: De autoria própria, 2023.

Novamente a presença do Graffeno® diminui as instabilidades na força de atrito, embora pequenos picos persistam devido a partículas abrasivas.

É possível observar que, no mesmo período do teste anterior, entre 1000 e 1100 segundos, a força de atrito apresenta leve tendência de subida, seguida de suave descida e posterior estabilização. Esse comportamento indica novamente a ocorrência de um período transição dos mecanismos de desgaste predominantes. Contudo, na presença do Graffeno®, esse processo de transição aparenta ter sido suavizado, de forma que a elevação da força de atrito não foi tão drástica quanto no caso anterior. Esse comportamento é evidenciado na figura 41.

Figura 41 - Região de subida ampliada. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



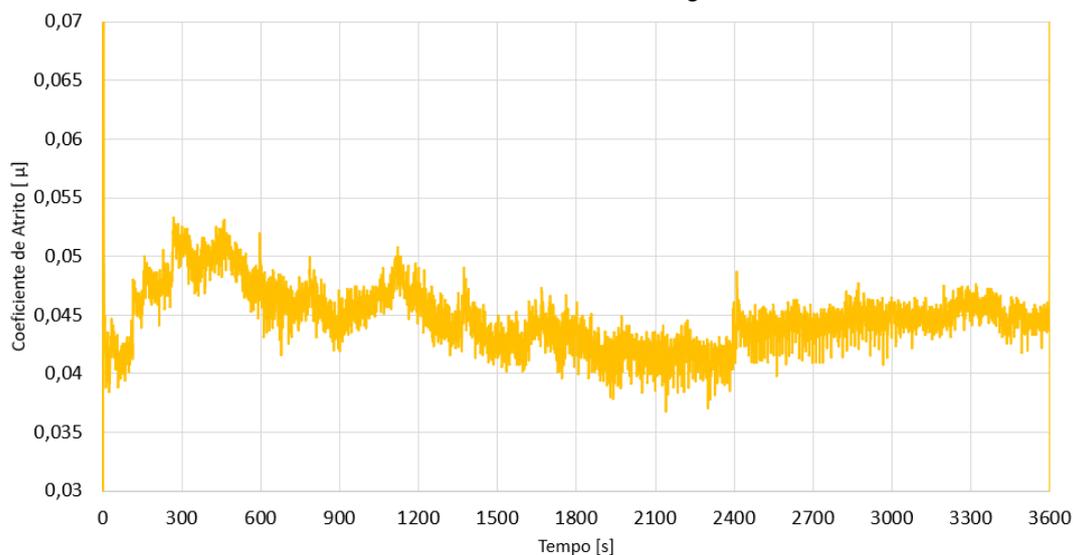
Fonte: De autoria própria, 2023.

Vários são os fatores que podem ter contribuído para este comportamento. Dentre eles, é possível citar as próprias características do condicionador de metais, que, segundo De Oliveira et al. (2014), criam barreiras protetoras na superfície que protegem a peça e reduzem o atrito. Essas barreiras podem ter interferido no processo de assentamento das superfícies e contribuído para a suavização e posterior redução da força de atrito.

Temperatura: O ensaio inicia em 31 °C. Novamente a temperatura aumenta de forma rápida nos primeiros segundos, acompanhando o aumento da força de atrito. Em seguida, passa a aumentar lentamente até 59 °C, valor que atinge ao final do ensaio.

Coefficiente de atrito: Na figura 42 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Neste ensaio o coeficiente de atrito variou entre 0,045 e 0,040 até 2400 segundos, quando se manteve próximo de 0,045 até o final do ensaio.

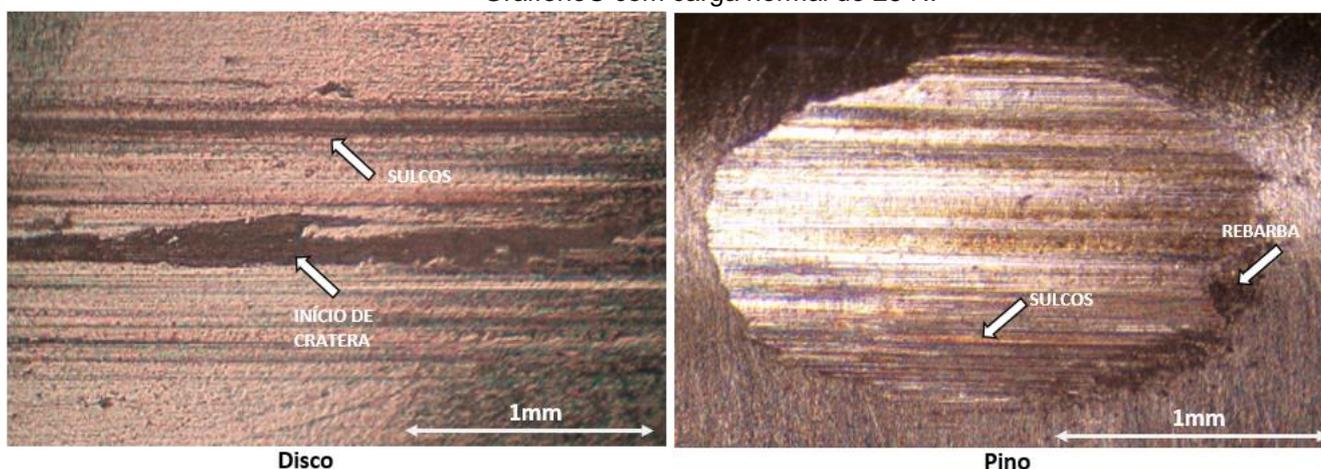
Figura 42 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 43 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco estão presentes sulcos largos, profundos e bem definidos, dando início ao processo de criação de crateras. É simples inferir que quanto maior a duração do ensaio, mais vezes partículas abrasivas passam no mesmo local e conseqüentemente agravam o desgaste naquele ponto, gerando desgaste por fadiga e transformando sulcos em crateras.

Figura 43 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



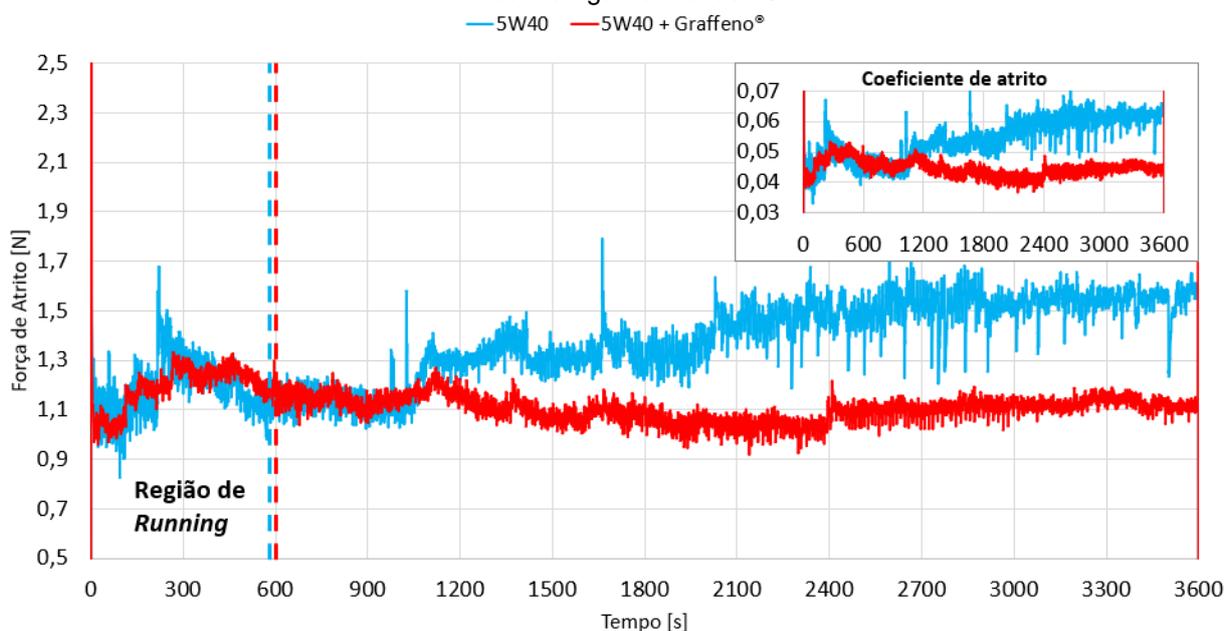
Fonte: De autoria própria, 2023.

A superfície do pino apresenta sulcos largos, porém não muito profundos se comparados com os do disco. A diferença de profundidade pode ser notada pela tonalidade mais escura dos sulcos presentes no disco. O pino apresenta ainda rebarbas frágeis que são criadas por deformações plásticas. O formato bem definido do elipsoide dá a entender que o desgaste ocorreu de maneira uniforme.

4.1.2.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TESTES DE 60 MINUTOS

Força e coeficiente de atrito: Na figura 44 é apresentado um comparativo da variação da força de atrito e do coeficiente de atrito, em função do tempo, para os ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N. Até 1100 segundos observa-se o mesmo comportamento dos ensaios anteriores. Os valores da força de atrito com e sem o Graffeno® mantêm-se muito próximos, entre 1,1 e 1,3 N. A partir de aproximadamente 1100 segundos, até o final do teste, o Graffeno® se mostrou eficaz na redução da força de atrito. Enquanto no teste somente com óleo 5W40 a força de atrito se mantém próxima de 1,5 N, com o Graffeno® se consolida, em média, em 1,1 N, isto é, aproximadamente, 27% menor. Esses dados indicam que o uso do Graffeno®, para a carga de 25 N, torna-se eficaz para a redução da força de atrito a partir de 1100 segundos de ensaio. O mesmo comportamento ocorreu com o coeficiente de atrito, que também diminuiu na mesma proporção.

Figura 44 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos com carga normal de 25 N.



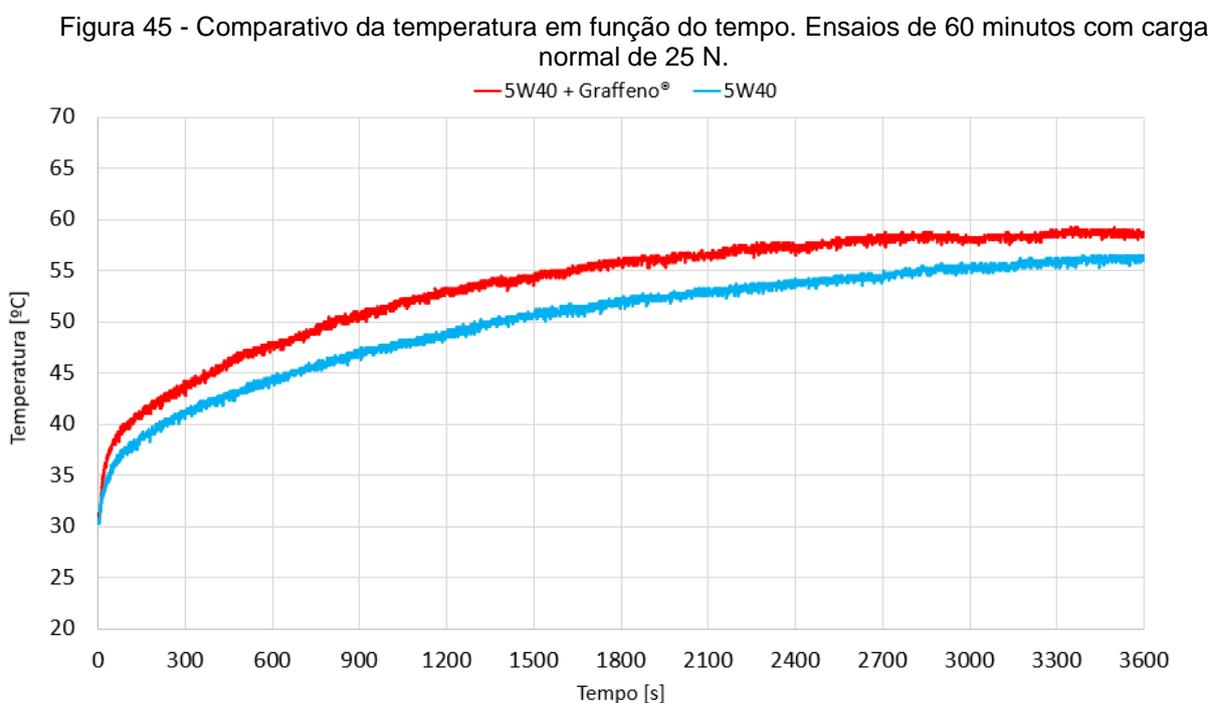
Fonte: De autoria própria, 2023.

A redução do atrito causado pelas nanopartículas presentes no Graffeno® é possível graças a formação de um filme lubrificante sólido que isola as superfícies metálicas. Aliado a isso, reduz as asperezas através do preenchimento dos sulcos e polimento das superfícies (GRAFFENO, 2023).

Novamente, a lubrificação com Graffeno® reduz as instabilidades da força de atrito, mantendo-a mais estável no decorrer do tempo, assim como ocorreu nos ensaios de 20 minutos. Destarte, é possível concluir que, para a carga de 25 N, o Graffeno® atua estabilizando a força de atrito.

Por fim, os períodos de *running* foram semelhantes, ambos próximos de 600 segundos, indicando que as superfícies no início do teste apresentavam rugosidade equivalente.

Temperatura: Na figura 45 é apresentado um comparativo da variação da temperatura em função do tempo para os ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N. É possível observar que, novamente, o Graffeno® reduziu a capacidade dissipativa de calor, especialmente no início do ensaio. Mesmo partindo do mesmo ponto, o ensaio Graffeno® terminou em 59 °C, em comparação ao óleo 5W40 puro, que terminou em 56 °C.



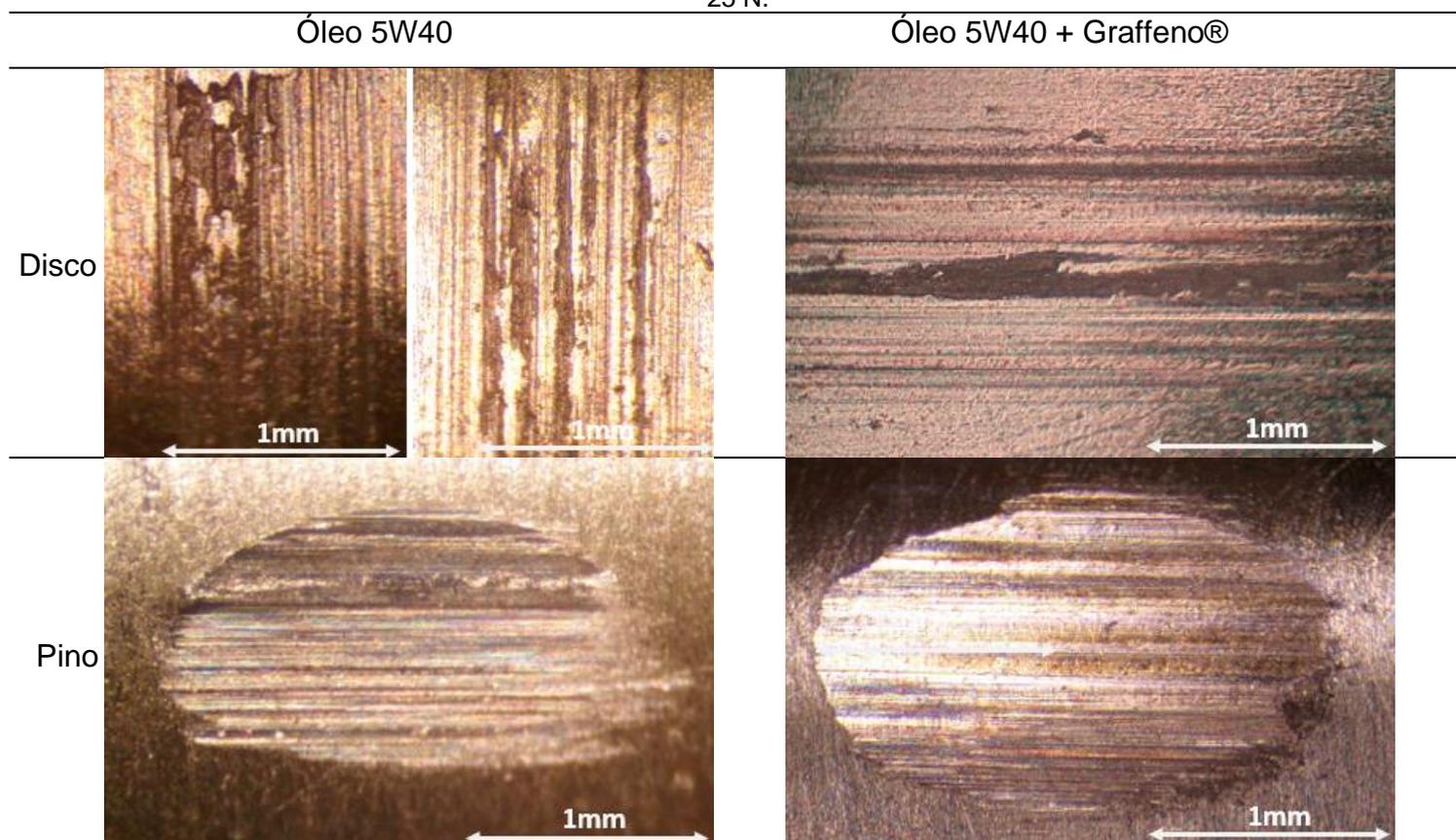
Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na tabela 8 é mostrado o comparativo das superfícies desgastadas dos discos e pinos após os ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N. No disco, a presença do Graffeno® reduziu a quantidade de sulcos, e os tornou mais uniformes. Observa-se ainda que o Graffeno® retardou o processo de criação de crateras (fadiga), que ficaram bem evidentes na lubrificação somente com óleo 5W40. Segundo De Oliveira et al. (2014), condicionadores de metais, de forma geral, auxiliam na redução do desgaste por fadiga nas superfícies.

No pino, a quantidade de sulcos reduziu na presença do Graffeno®. O pino lubrificado somente com óleo 5W40 apresentou deformações plásticas, concentradas em uma trilha, e mais rebarbas. A redução de rebarbas e deformações plásticas pode ser explicada, segundo Bordignon (2018), pela baixa energia de superfície do grafeno adsorvido nos corpos de prova que promove a redução da adesão entre as superfícies metálicas reduzindo os mecanismos de desgaste adesivos.

Por fim, o elipsoide na superfície do pino com Graffeno® apresentou-se mais uniforme se comparado ao óleo 5W40 puro. Além disso, os sulcos foram distribuídos de forma mais homogênea. Isso indica maior uniformidade no processo de desgaste.

Tabela 8 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaio de 60 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

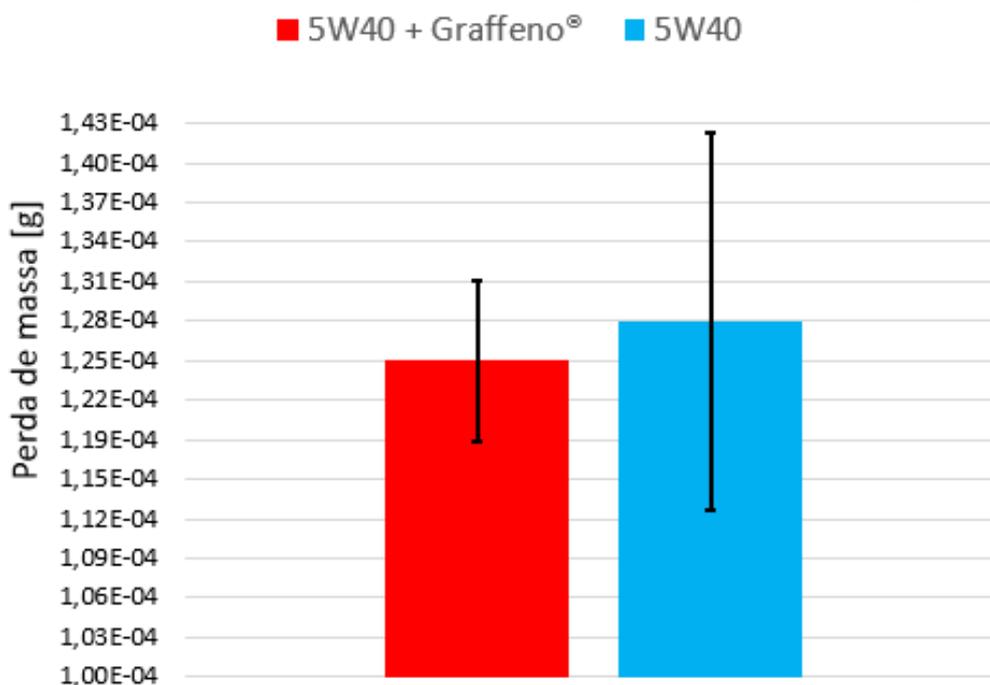
Perda de massa e desgaste: Na tabela 9 são apresentados, em função do tipo de ensaio realizado, os valores de perda de massa e taxas de desgaste calculados para os ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N. Na figura 46 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as perdas de massa.

Tabela 9 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N.

Tipo de ensaio	Perda de massa [10^{-4} g]	Taxa de desgaste [10^{-6} mm ³ /m]
Óleo 5W40	$1,28 \pm 0,15$	$0,79 \pm 0,09$
Óleo 5W40 + Graffeno®	$1,25 \pm 0,06$	$0,78 \pm 0,04$

Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 46 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 60 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Para o ensaio de 60 minutos com carga normal de 25 N, o Graffeno® apresentou melhores resultados médios se comparado ao ensaio de 20 minutos, no entanto, ainda ineficiente para redução da perda de massa. Para ambas as condições de lubrificação o valor de desgaste foi muito próximo, indo de encontro ao comportamento observado na curva de força de atrito. Essa discrepância acontece, uma vez que, a maior parte do desgaste ocorre nos instantes iniciais do teste, momento no qual as superfícies estão se assentando, a área de contato é pequena e a pressão é elevada. Nesse sentido, a redução da força de atrito, ocorrida somente após 1100 segundos de teste,

não foi significativa o suficiente para reduzir na mesma proporção a perda de massa e consequentemente o desgaste sofrido.

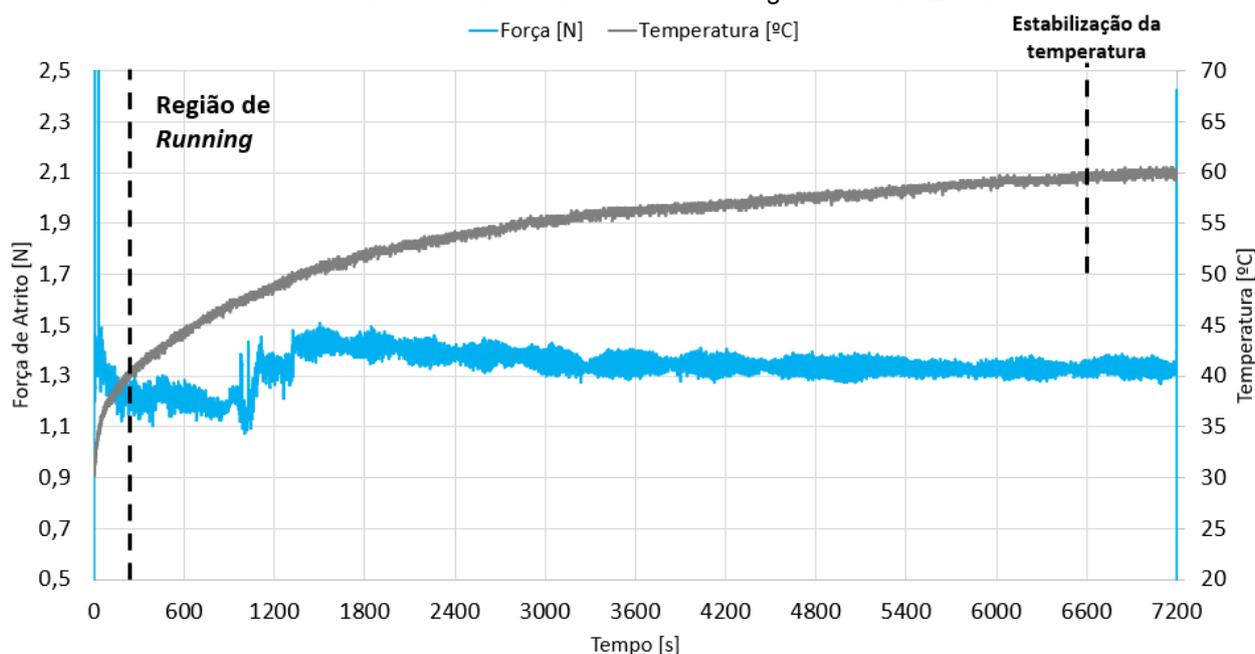
Analisando detalhadamente, a diferença na perda de massa foi de 3×10^{-6} g a favor do óleo 5W40 + Graffeno®. Esse valor representa uma diferença de 1×10^{-8} mm³/m na taxa de desgaste, que por sua vez equivale a uma resistência ao desgaste apenas 1,3% maior do pino lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® em relação ao lubrificado com óleo puro. Novamente, a diferença apontada encontra-se dentro dos limites da dispersão observada nos testes. Nesse sentido, é possível afirmar que a intensidade do desgaste ocorrido nos pinos foi, em ambos os casos, coincidente.

4.1.3 TESTES – 120 MINUTOS

4.1.3.1 TESTE 120 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40

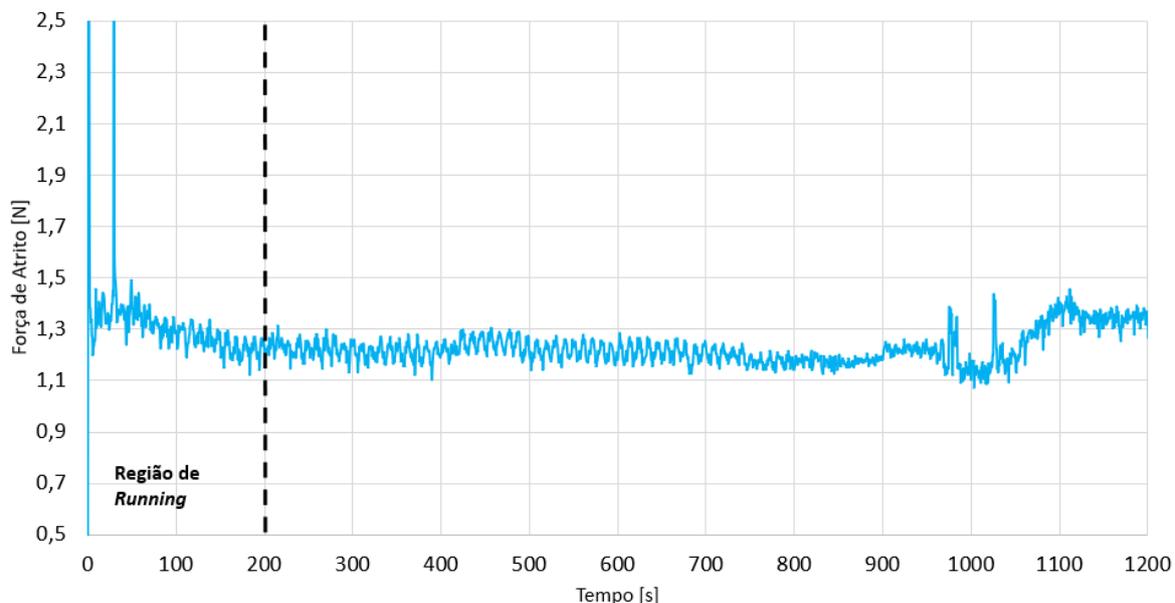
Força de atrito: Na figura 47 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o *running*, cerca de 200 segundos, a força de atrito se estabiliza entre 1,1N e 1,3N até 1000 segundos. Neste ensaio, a curva não apresentou picos sugestivos de falha na lubrificação ou detritos abrasivos. A região de *running* é mostrada de forma ampliada na figura 48.

Figura 47 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

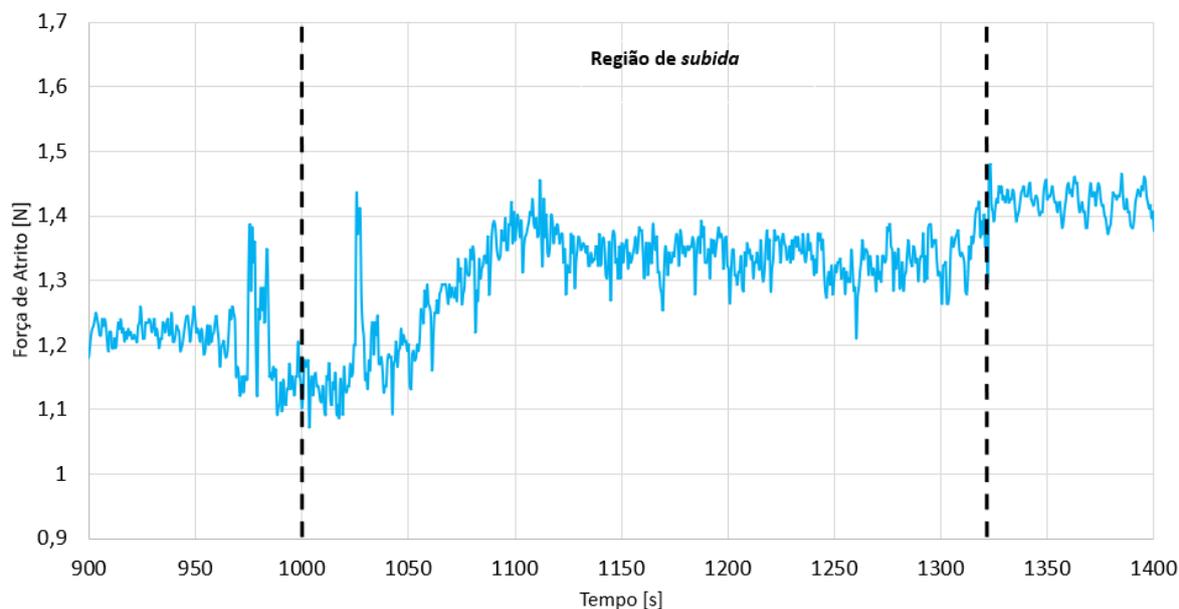
Figura 48 - Região de *Running* ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Entre 1000 e 1300 segundos, nota-se novamente uma região de aumento repentino na força de atrito, chegando a 1,4 N, seguida por leve e paulatina descida, até se estabilizar em 1,3 N, valor que perdura até o final do ensaio. Esse comportamento, novamente, sugere uma transição nos mecanismos de desgaste predominantes entre as superfícies, resultando no aumento da força de atrito. A região de subida é evidenciada na figura 49.

Figura 49 - Região de subida ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.

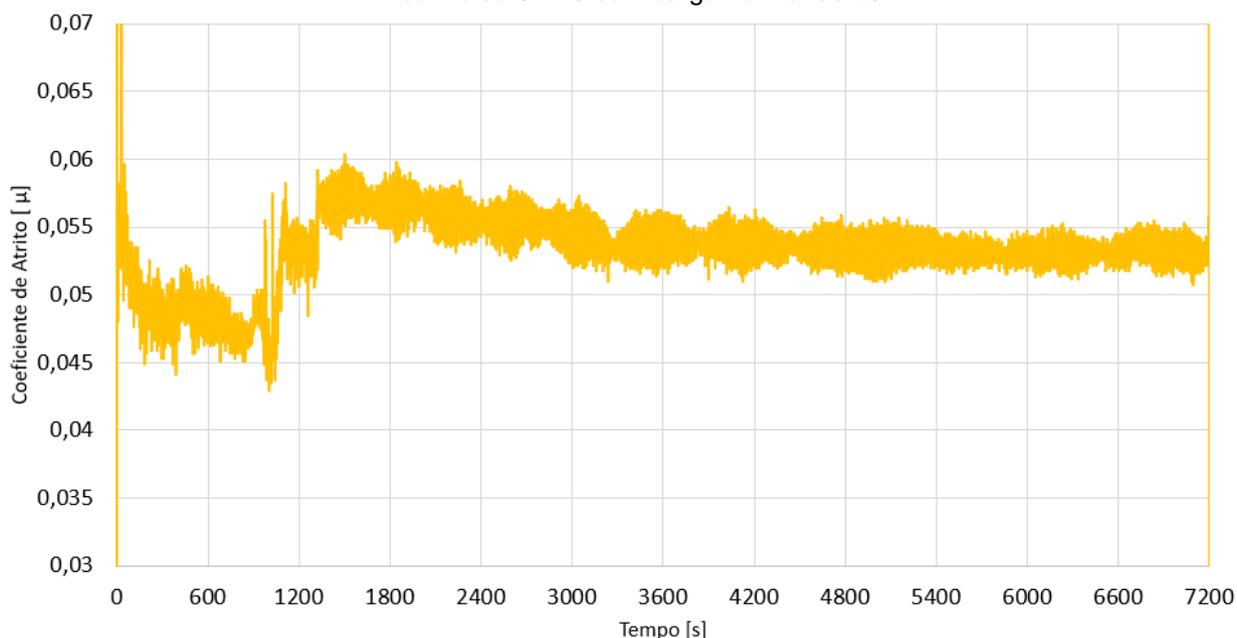


Fonte: De autoria própria, 2023.

Temperatura: O ensaio inicia em 30 °C. Após rápido aumento nos primeiros segundos, a temperatura passa a aumentar lentamente até 60 °C, valor que atinge ao final do ensaio. Após cerca de 6600 segundos, a temperatura atingiu 60 °C e parou de variar. Nesse momento a taxa de desgaste é consideravelmente pequena, resultando em arrancamento de material mínimo. Portanto, a geração de calor, também reduz, permitindo que o sistema entre em equilíbrio térmico.

Coefficiente de atrito: Na figura 50 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito manteve-se entre 0,050 e 0,045 até o período de 1000 segundos de ensaio, quando subiu rapidamente para próximo de 0,06 seguido de leve e contínuo declive, até se consolidar entre 0,055 e 0,050, valor que perdurou até o final do ensaio.

Figura 50 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.

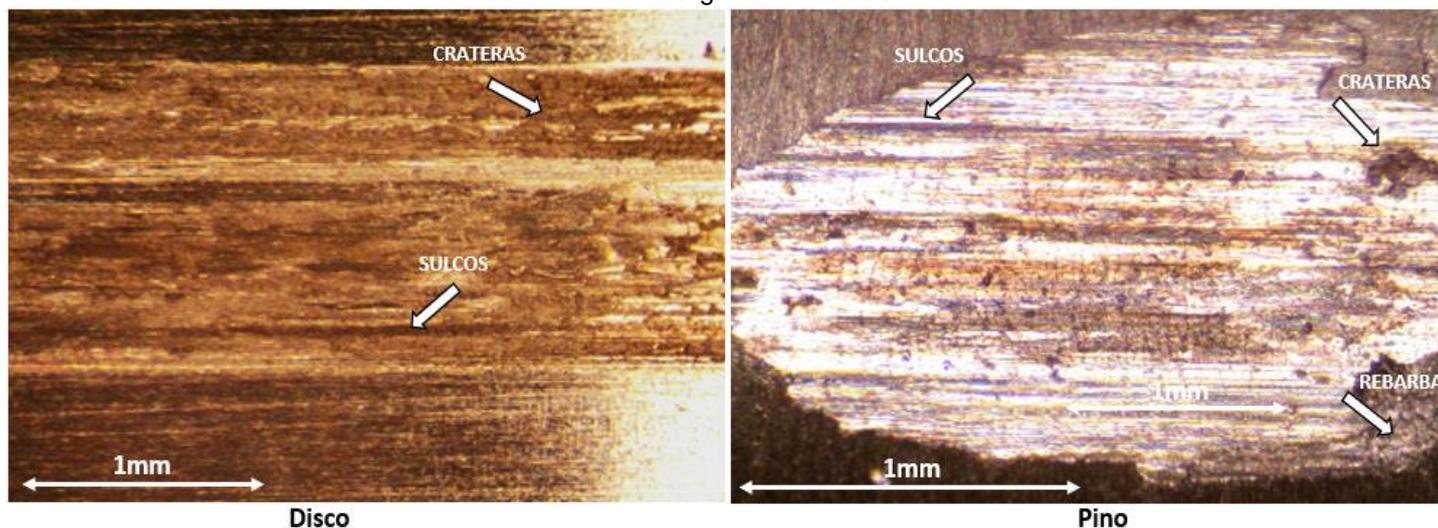


Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 51 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco destacam-se sulcos (abrasão) aparentemente profundos e bem definidos, que em várias regiões se transformaram em crateras (fadiga). A profundidade dos sulcos e das crateras pode ser verificada pela tonalidade mais escura em relação ao resto da trilha.

Na superfície do pino estão presentes duas grandes crateras, uma região com acúmulo de rebarbas frágeis, grande quantidade de sulcos e novamente o elipsoide apresenta formato disforme.

Figura 51 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.

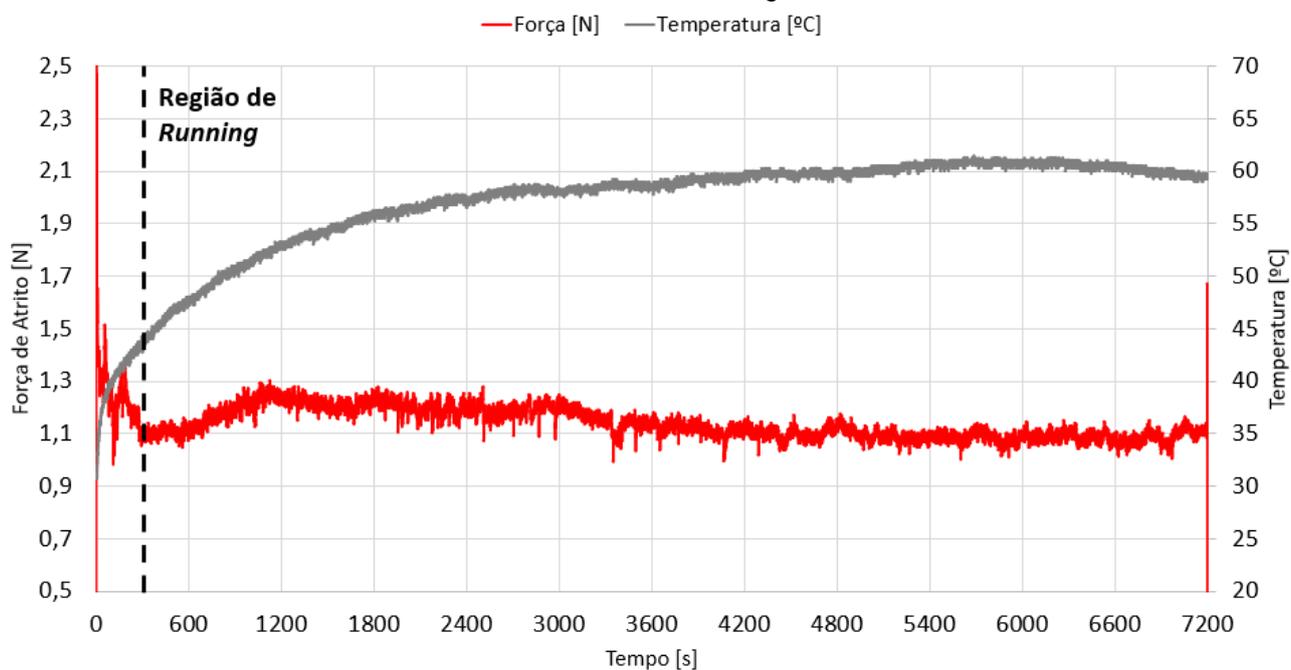


Fonte: De autoria própria, 2023.

4.1.3.2 TESTE 120 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40 + GRAFFENO®

Força de atrito: Na figura 52 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o running, cerca de 300 segundos, a força de atrito se manteve próxima de 1,1N, valor que atingiu ao final do ensaio.

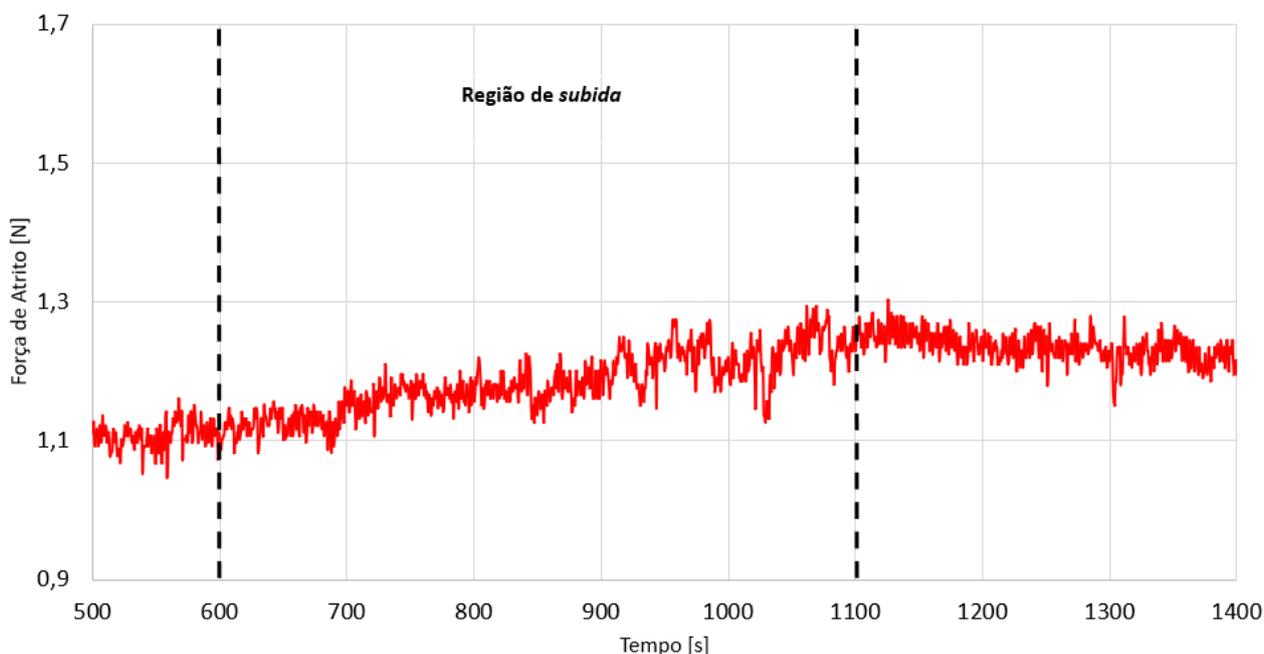
Figura 52 - Variação da força de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Entre 600 e 1100 segundos a força de atrito entrou em tendência de subida, alcançando valores próximos de 1,3 N. Logo em seguida, entrou em suave declive, retornando a 1,1 N e assim permanecendo até o final. Esse comportamento, já conhecido dos testes anteriores, aqui se repete. O Graffeno® auxilia no controle da força de atrito durante o período de mudança dos mecanismos de desgaste predominantes. Esse comportamento é evidenciado de forma ampliada na figura 53.

Figura 53 - Região de subida ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.

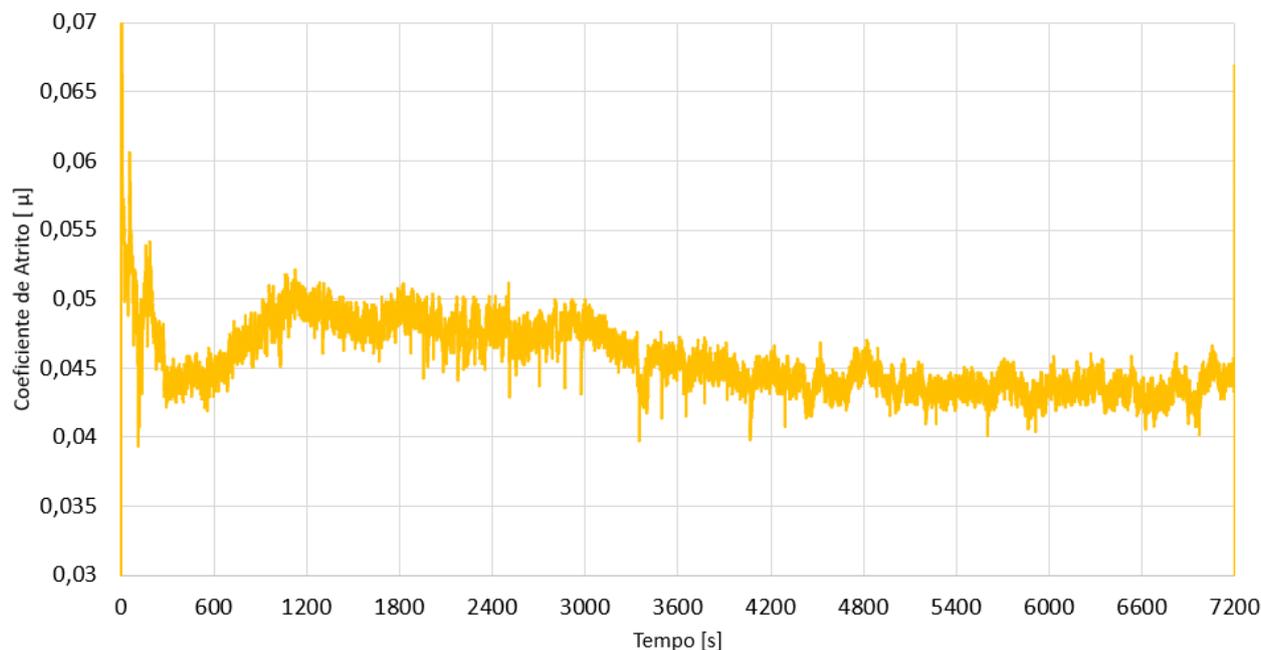


Fonte: De autoria própria, 2023.

Temperatura: O ensaio inicia em 31 °C. Novamente a temperatura aumenta de forma rápida nos primeiros segundos, acompanhando o aumento da força de atrito. Em seguida, passa a aumentar lentamente até 62 °C, o que ocorre entre 5400 e 6600 segundos. A partir desse momento, a temperatura cai para 60 °C, onde mantém seu equilíbrio térmico até ao final do ensaio.

Coeficiente de atrito: Na figura 54 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Após o running, cerca de 300 segundos, o coeficiente de atrito manteve-se entre 0,045 e 0,050. Após um breve período de tendência de descida, o coeficiente de atrito retornou para 0,045, onde permaneceu estável até o final do ensaio.

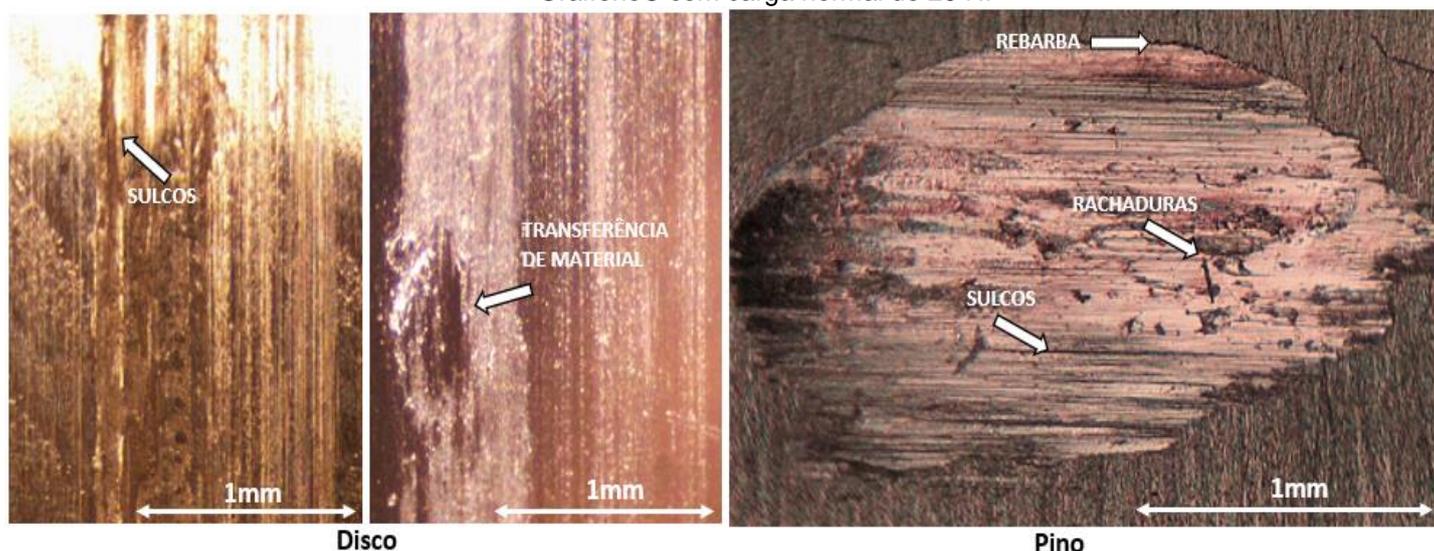
Figura 54 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 55 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco, novamente, estão presentes sulcos largos, profundos e bem definidos, no entanto não foram observadas crateras, mais uma vez constatando que o Graffeno® retarda o processo de formação delas. Observa-se ainda um grande ponto de transferência e adesão de material.

Figura 55 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



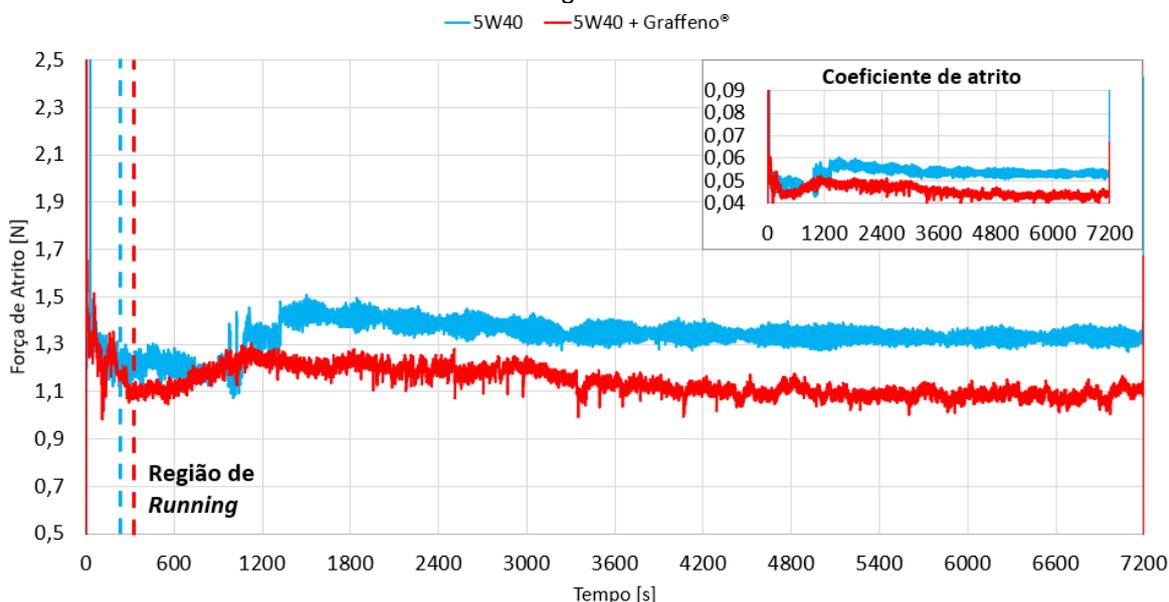
Fonte: De autoria própria, 2023.

A superfície do pino apresenta sulcos rasos e profundos, verificados pela tonalidade mais escura, bem como regiões com rebarbas criadas por deformações plásticas. Destacam-se, no entanto, rachaduras na região central, características de desgaste por fadiga causado por ciclos de tensões elevadas. Dado que os mecanismos de desgaste no disco e no pino variam devido a dinâmica do teste, é razoável supor que o desgaste por fadiga pode ter sido mais intenso no pino do que no disco. Isso explicaria a ausência de crateras no disco e a presença de rachaduras no pino, ambas características de desgaste por fadiga intenso.

4.1.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TESTES DE 120 MINUTOS

Força e coeficiente de atrito: Na figura 56 é apresentado um comparativo da variação da força de atrito e do coeficiente de atrito, em função do tempo, para os ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N. Assim como no ensaio anterior, até 1200 segundos os valores da força de atrito com e sem Graffeno® mantêm-se muito próximos, entre 1,1 e 1,3 N. A partir de aproximadamente 1200 segundos até o final do teste, o Graffeno® se mostrou eficaz na redução da força de atrito, assim como ocorrido nos testes anteriores. Enquanto no teste somente com óleo 5W40 a força de atrito se mantém próxima de 1,3 N, com o Graffeno® se consolida, em média, em 1,1 N, isto é, aproximadamente, 16% menor. Esses dados ratificam que o uso do Graffeno®, para essa carga, é eficaz na redução da força de atrito para testes longos.

Figura 56 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

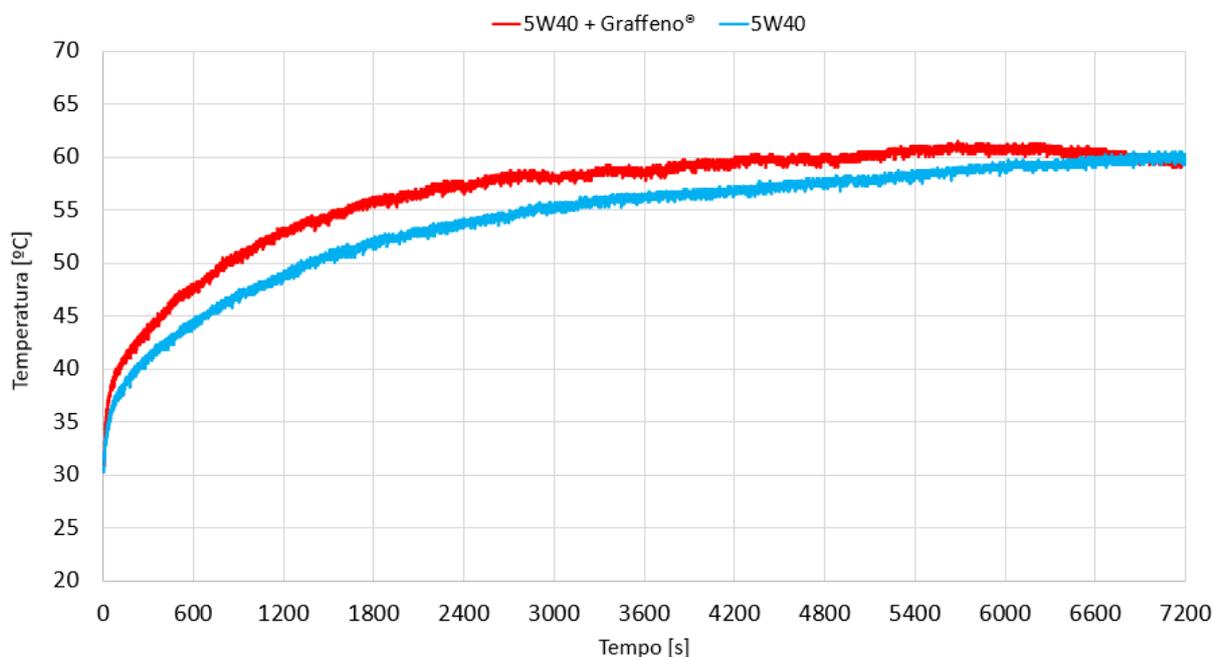
A redução da força de atrito, como já mencionado, possivelmente resulta da formação do tribofilme protetor, da redução das asperezas e do polimento das superfícies (GRAFFENO, 2023).

É interessante notar que após passar de 3600 segundos, tempo do teste anterior, o comportamento das curvas se mantém o mesmo, indicando que nenhuma grande mudança ocorre a partir daí. O mesmo comportamento é observado com o coeficiente de atrito.

Por fim, os períodos de *running* foram relativamente próximos. Enquanto com 5W40 durou 200 segundos, com Graffeno® durou aproximadamente 300 segundos. Assim como no teste anterior, isso pode ser atribuído a equivalência entre as rugosidades das superfícies no início do teste.

Temperatura: Na figura 57 é apresentado um comparativo da variação da temperatura em função do tempo para os ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N. É possível observar que, novamente, o Graffeno® reduziu a capacidade dissipativa de calor, especialmente no início do ensaio. Observa-se ainda que o sistema atinge seu equilíbrio térmico, em média, aos 6600 segundos, quando as duas temperaturas se igualam em 60 °C. A partir desse momento, a taxa de desgaste já é consideravelmente baixa, sendo assim o calor gerado não é capaz de aumentar mais a temperatura.

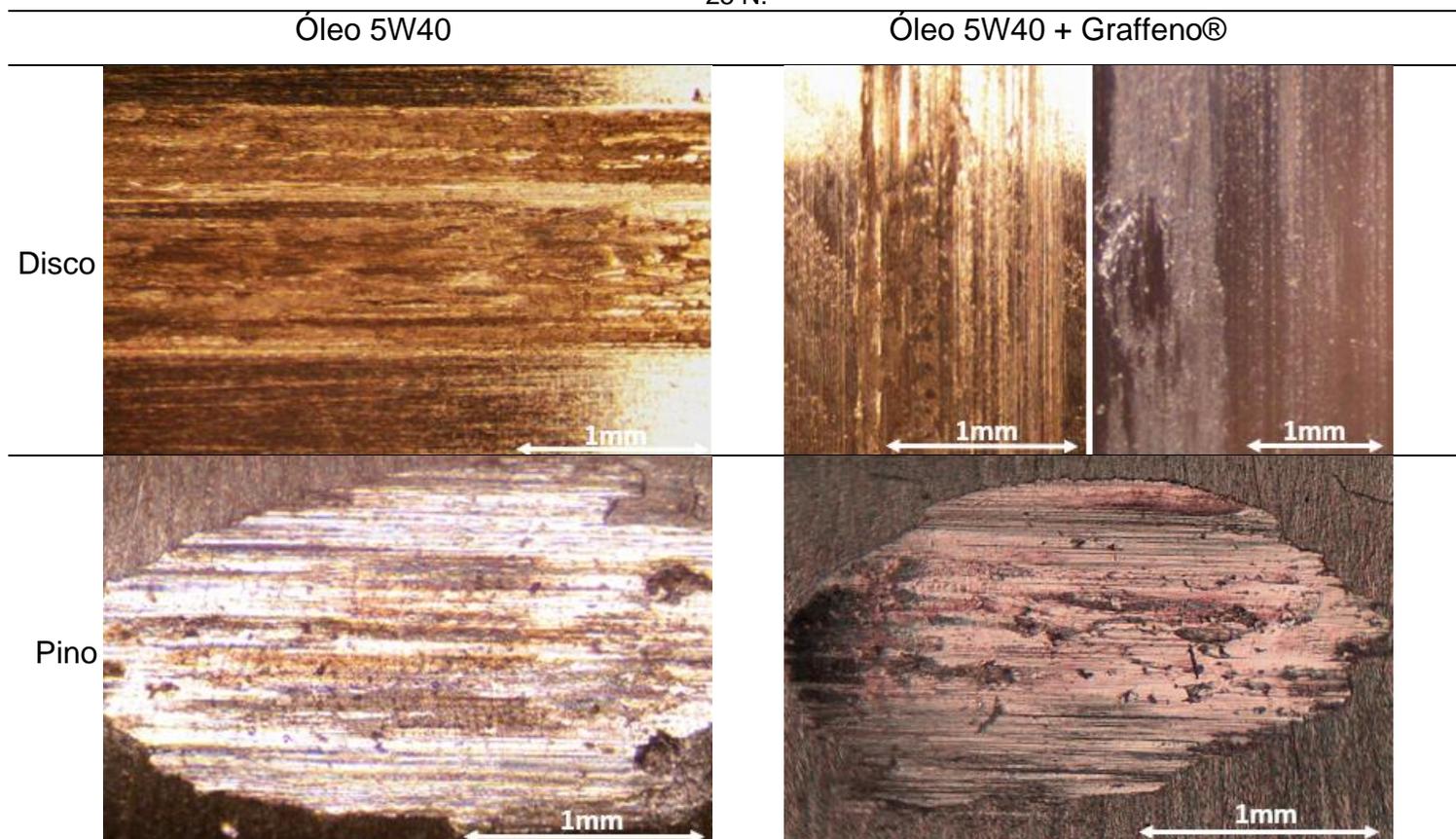
Figura 57 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na tabela 10 é mostrado o comparativo das superfícies desgastadas dos discos e pinos após os ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N. No disco e no pino, observa-se que o Graffeno® evita a criação de crateras, isto é, reduz o desgaste por fadiga. Nos discos, os sulcos aparentam ter a mesma profundidade, analisando pela tonalidade das marcas. Já no pino com Graffeno®, é possível observar alguns sulcos bem mais profundos.

Tabela 10 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

No disco com Graffeno®, nota-se um ponto de grande transferência e adesão de material. Por outro lado, o pino apresenta menos rebarbas e deformações plásticas, características do desgaste adesivo. Segundo Bordignon (2018), o grafeno deve evitar a adesão entre as superfícies metálicas, no entanto, essa característica é observada somente no pino. No disco, o condicionador de metais auxiliou no processo de transferência de material e conseqüentemente na adesão, fato já observado em outros ensaios. Possivelmente, o material removido por abrasão, por estar suspenso no óleo lubrificante, pela dinâmica do ensaio, retornou a região de contato e ali ficou aderido.

Por fim, no pino com Graffeno®, o elipsoide apresenta formato mais uniforme em comparação ao óleo puro, indicativo de maior uniformidade no processo de desgaste. No entanto, exibe rachaduras que indicam desgaste severo e altas tensões cíclicas localizadas nesses pontos.

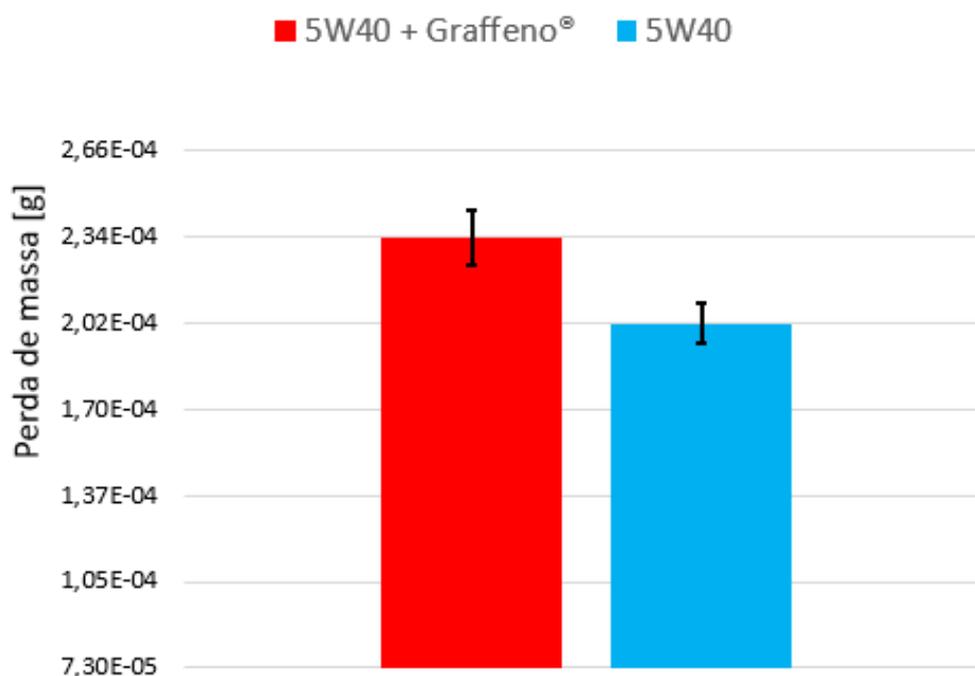
Perda de massa e desgaste: Na tabela 11 são apresentados, em função do tipo de ensaio realizado, os valores de perda de massa e taxas de desgaste calculados para os ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N. Na figura 58 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as perdas de massa.

Tabela 11 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaio de 120 minutos com carga normal de 25 N.

Tipo de ensaio	Perda de massa [10^{-4} g]	Taxa de desgaste [10^{-6} mm ³ /m]
Óleo 5W40	2,02 ± 0,08	0,63 ± 0,02
Óleo 5W40 + Graffeno®	2,34 ± 0,10	0,73 ± 0,03

Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 58 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Para o ensaio de 120 minutos com carga normal de 25 N, indo de encontro as informações obtidas nas curvas de atrito, o Graffeno® apresentou, em média, piores resultados de perda de massa e taxa de desgaste se comparado ao óleo puro.

Analisando detalhadamente, a diferença na perda de massa foi de $3,2 \times 10^{-5}$ g a favor do óleo 5W40 puro. Esse valor representa uma diferença de 1×10^{-7} mm³/m na taxa de desgaste, que por sua vez equivale a uma resistência ao desgaste 15,9%

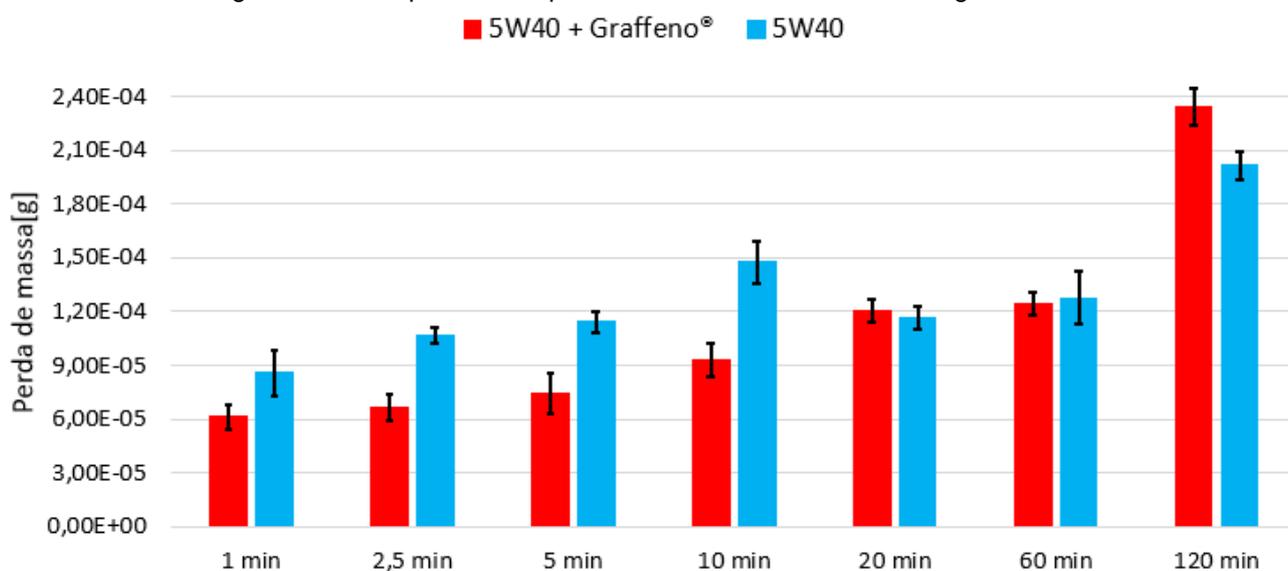
maior do pino lubrificado com óleo 5W40 puro em relação ao lubrificado com óleo + Graffeno®. De posse desses dados, é possível afirmar que o Graffeno®, para essa duração de ensaio, foi prejudicial para a superfície no que tange a perda de massa.

Durante o ensaio, diversos mecanismos de desgaste contribuem em conjunto para a perda de material (SERBINO, 2005). Ao longo do tempo, esses mecanismos atuam com intensidades variadas. Nesse sentido, a adição do condicionador de metais pode interferir e alterar as propriedades do desgaste nas superfícies, levando a um aumento da perda de material devido a mudança nos mecanismos de desgaste. Por exemplo, o Graffeno® pode estar promovendo um desgaste abrasivo mais agressivo, aumentando a remoção de material nas superfícies e isso não se reflete necessariamente em um aumento na força de atrito. O desgaste e a perda de massa não são determinados exclusivamente pela magnitude da força de atrito, mas por uma combinação complexa de vários fatores (LUDEMA, 2019).

4.1.4 COMPORTAMENTO DA PERDA DE MASSA E DESGASTE AO LONGO DO TEMPO

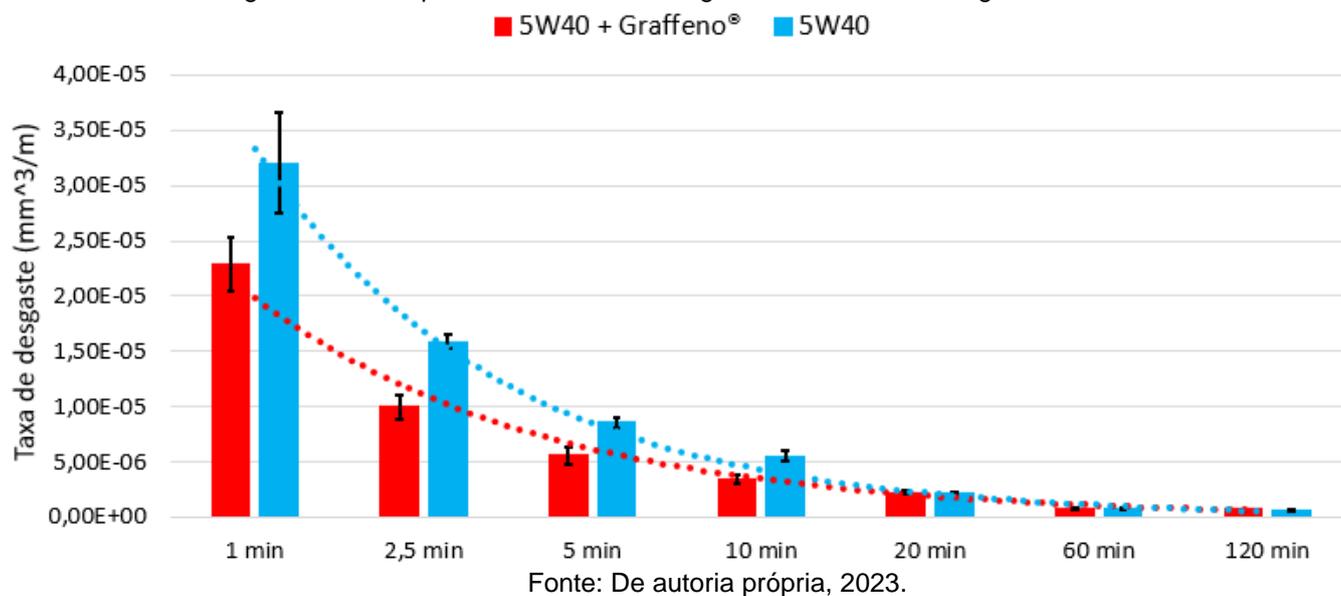
Nas figuras 59 e 60 são apresentadas de forma gráfica e comparativa, a perda de massa e a taxa de desgaste em função do tempo para os ensaios realizados com carga de 25 N.

Figura 59 – Comparativo de perda de massa. Ensaios com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 60 – Comparativo de taxa de desgaste. Ensaio com carga normal de 25 N.



Com Graffeno®, o teste de 1 minuto apresentou aproximadamente 25% da perda de massa em relação ao de 120 minutos, já com óleo 5W40 puro, essa diferença foi de aproximadamente 40%. Esse comportamento indica que, proporcionalmente, a maior parte do desgaste ocorre nos instantes iniciais do teste.

Essa afirmação encontra respaldo na taxa de desgaste. O decaimento logarítmico demonstra que à medida que a duração do teste diminui, a taxa de desgaste aumenta, o que significa que uma quantidade significativa de material é removida em um curto período.

Esse comportamento ocorre, possivelmente, devido ao processo inicial de acomodação das superfícies. Durante esse período, a área de contato é pequena, a pressão é alta e, em certos pontos, ocorre contato direto e sem lubrificação, resultando em altas taxas de remoção de material. Por esse motivo, durante os períodos de *running*, a força de atrito é demasiadamente elevada. Segundo Hutchings (1992), o período inicial de deslizamento pode apresentar comportamento transitório, no qual as taxas de desgaste podem ser superiores às correspondentes durante o estado estacionário do deslizamento.

4.1.5 PRESSÃO DE CONTATO E REGIME DE LUBRIFICAÇÃO

Nas tabelas 12 e 13 são apresentados os valores da área e pressão de contato para os ensaios lubrificados com óleo 5W40 e óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N. Segundo Hutchings (1992), em contatos não conformes, o regime de lubrificação é elastohidrodinâmico, enquanto em contatos conformes, o regime é hidrodinâmico. Sabendo que o contato inicial dos ensaios realizados é não conforme e, portanto, o regime de lubrificação inicial é elastohidrodinâmico, é importante identificar o momento da transição para o regime hidrodinâmico que, segundo Hutchings (1992), ocorre quando a pressão de contato fica menor do que 50Mpa.

Tabela 12 – Pressão de contato. Ensaio lubrificados com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.

Tempo [s]	Área de contato [mm ²]	Pressão [MPa]
0	0,001	25000,00
60	1,64	15,24
150	1,83	13,66
300	1,88	13,31
600	2,13	11,74

Fonte: De autoria própria, 2023.

Tabela 13 - Pressão de contato. Ensaio lubrificados com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.

Tempo [s]	Área de contato [mm ²]	Pressão [MPa]
0	0,001	25000,00
60	1,47	17,01
150	1,53	16,34
300	1,58	15,82
600	1,87	13,37

Fonte: De autoria própria, 2023.

Analisando os dados, nota-se que, para as duas condições de lubrificação, aos 60 segundos, a pressão de contato entre as superfícies já havia ficado menor que 50Mp. Nesse sentido, é possível estimar o momento no qual a pressão fica abaixo de 50Mpa e ocorre a transição de regimes de lubrificação, considerando o período de 0 a 60 segundos como crescimento linear. Neste cenário, o teste lubrificado com óleo 5W40 passou por sua transição em cerca de 18 segundos, enquanto o teste com Graffeno® alcançou sua transição em aproximadamente 20 segundos. A mudança nos regimes acontece devido ao desgaste progressivo durante o ensaio, que resulta

no aumento da área de contato entre o disco e o pino, diminuindo, portanto, a pressão de contato.

4.2 CARGA NORMAL: 50 N

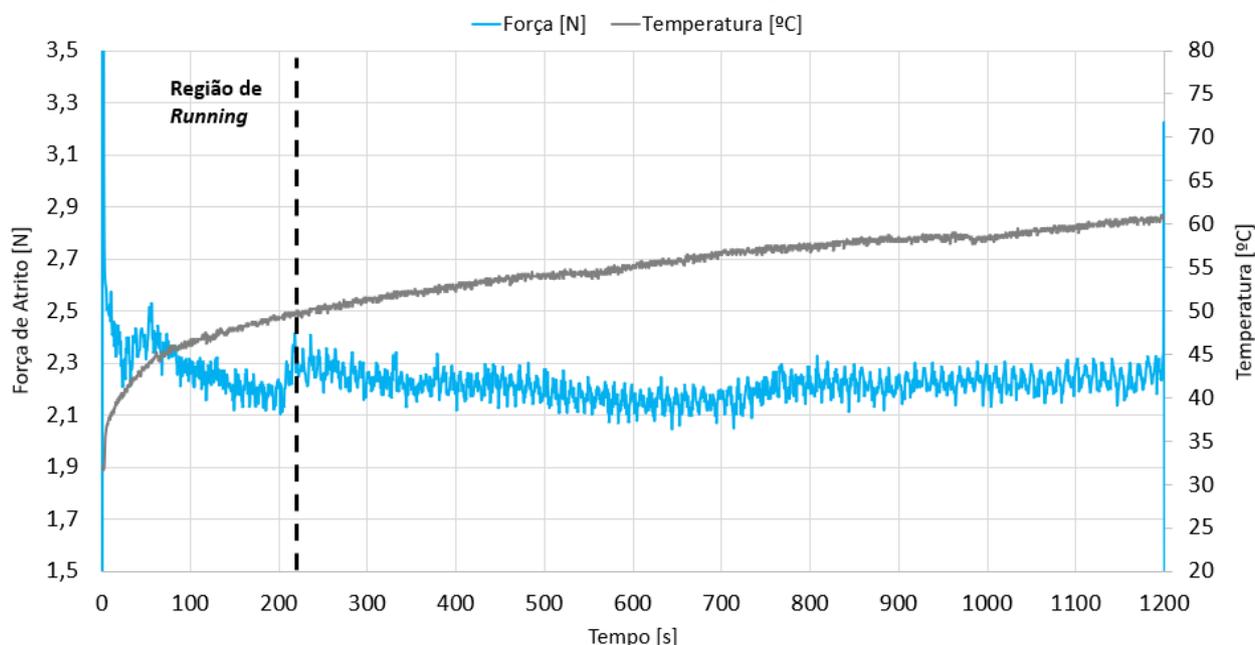
4.2.1 TESTES – 20 MINUTOS

4.2.1.1 TESTE 20 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40

Força de atrito: Na figura 61 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o *running*, pouco mais de 200 segundos, a força de atrito se estabiliza entre 2,1 e 2,3 N valor que perdura até o final do ensaio, em 1200 segundos. Neste ensaio, a curva não apresentou picos sugestivos de falha na lubrificação ou detritos abrasivos.

Temperatura: O ensaio inicia em 32 °C e, assim como nos testes anteriores, após rápido aumento inicial, a temperatura passa a subir lentamente, de forma quase linear, até atingir o valor de 61 °C ao final do ensaio.

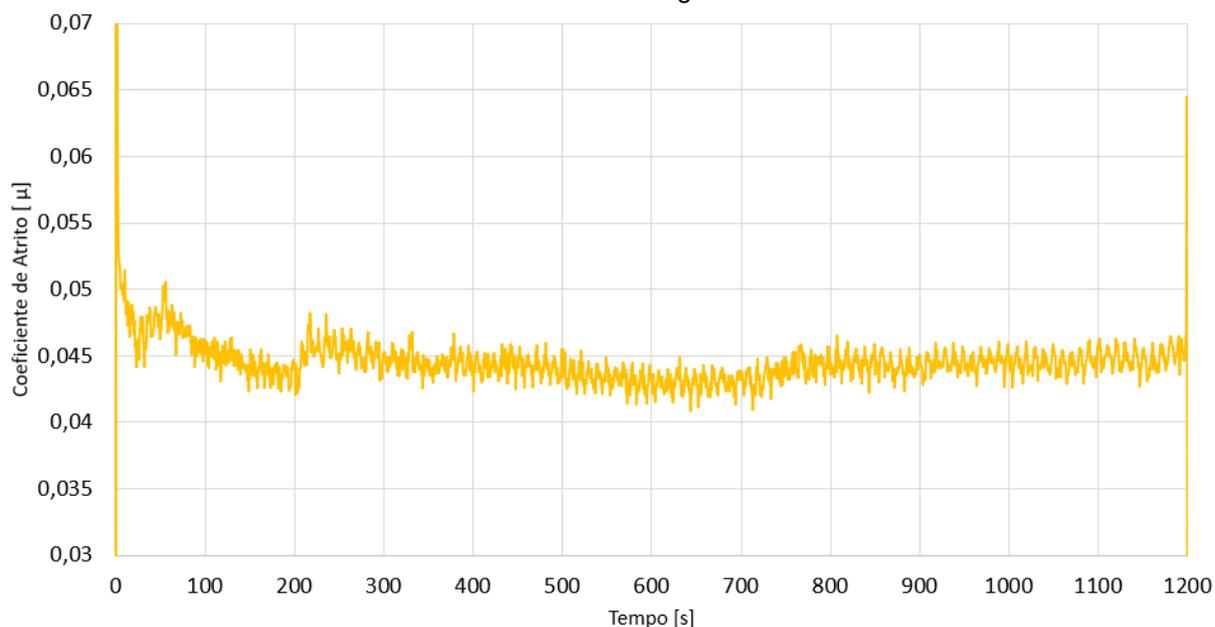
Figura 61 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Coeficiente de atrito: Na figura 62 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito estabilizou próximo de 0,045, não sofrendo grandes mudanças no decorrer do teste.

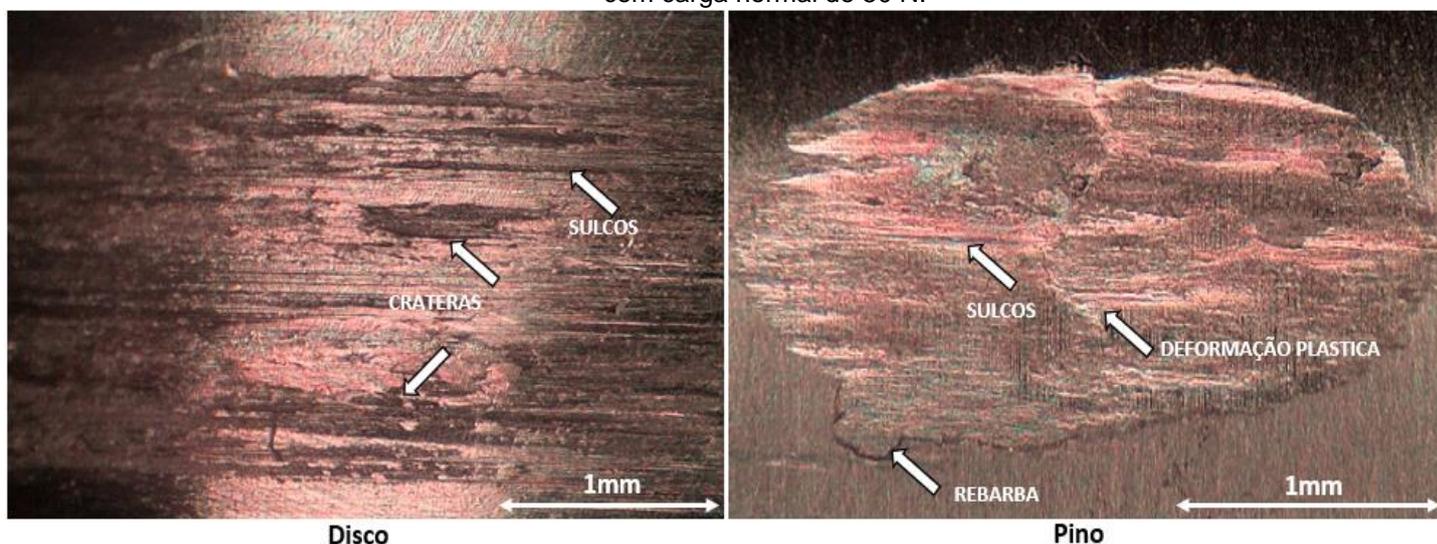
Figura 62 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 63 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco estão presentes diversos sulcos distribuídos aleatoriamente, indicativos de desgaste abrasivo, além de crateras, características do desgaste por fadiga, causado por tensões cíclicas. No pino nota-se poucos sulcos, demasiadamente rasos, e ausência de crateras, que contrasta com o que foi encontrado no disco. É possível observar ainda uma região com grande quantidade de rebarbas e, em sua região central, uma trilha de deformação plástica.

Figura 63 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.

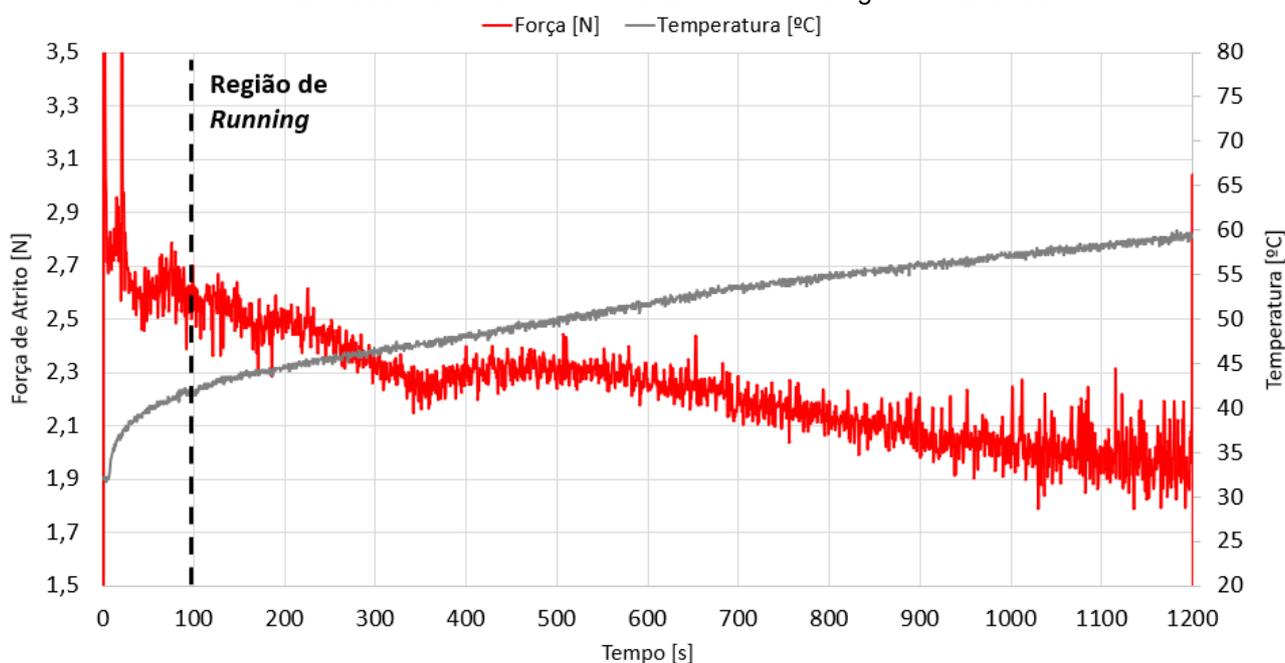


Fonte: De autoria própria, 2023.

4.2.1.2 TESTE 20 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40 + GRAFFENO®

Força de atrito: Na figura 64 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o *running*, cerca de 100 segundos, a força de atrito fica próxima de 2,5 N com tendência diminutiva, chegando a 2 N ao final do ensaio. Nota-se que, a partir de aproximadamente 900 segundos, ocorreu um aumento significativo nas oscilações dos valores de força de atrito, contrastando com o padrão observado nos testes anteriores, nos quais o Graffeno® mantinha a força de atrito estável ao longo do tempo.

Figura 64 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

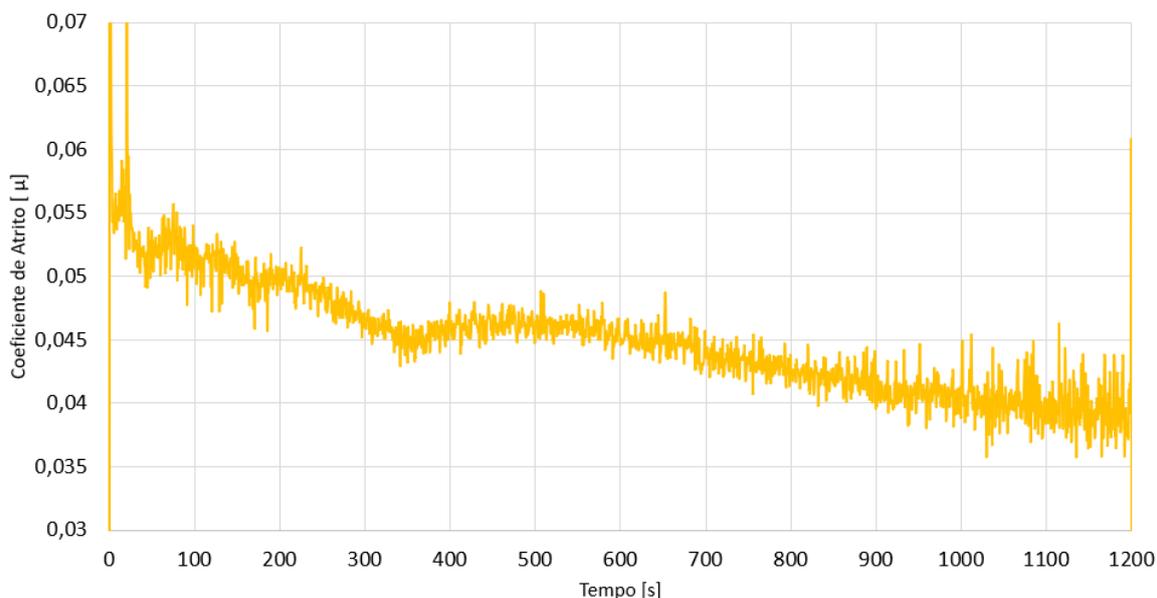


Fonte: De autoria própria, 2023.

Temperatura: O ensaio inicia em 32 °C e, assim como nos testes anteriores, após rápido aumento inicial, a temperatura passa a subir lentamente, de forma quase linear, até atingir o valor de 60 °C ao final do ensaio.

Coefficiente de atrito: Na figura 65 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito manteve-se inicialmente próximo de 0,050 com tendência diminutiva, chegando a 0,040 ao final do ensaio.

Figura 65 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

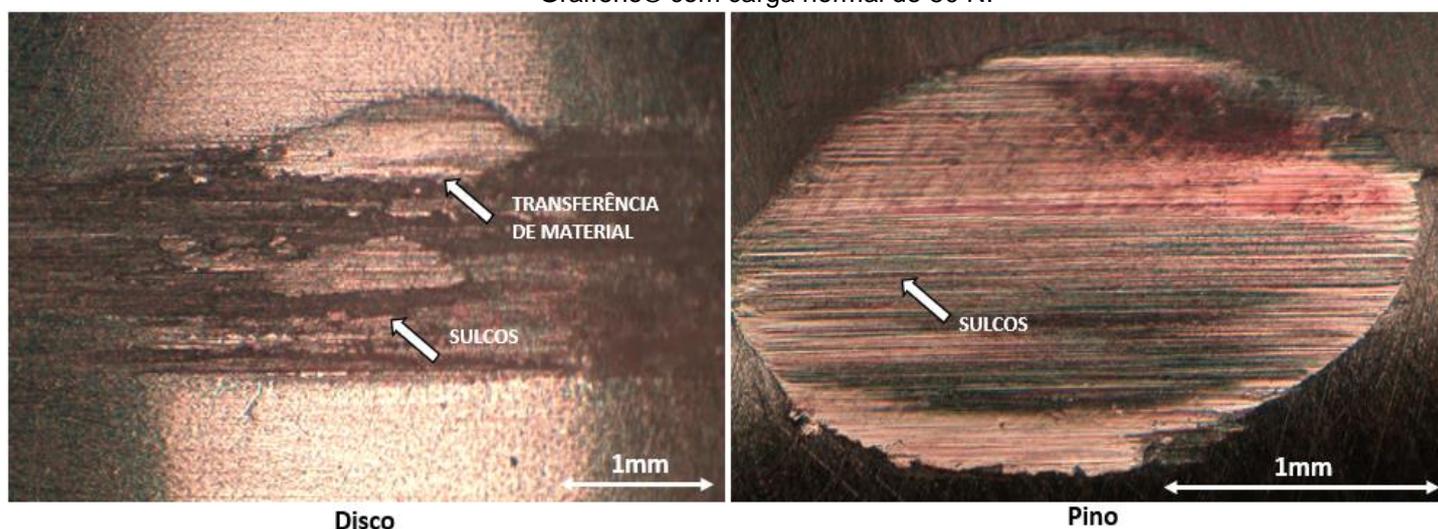


Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 66 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco observam-se alguns sulcos profundos, evidenciados pela tonalidade escura, característicos de desgaste abrasivo. Além disso, há um ponto de grande transferência e adesão de material.

A superfície do pino apresenta formato bem definido, além de diversos sulcos rasos, distribuídos de forma homogênea, levando a crer que o desgaste ocorreu de maneira uniforme. Nota-se ainda, pouca quantidade de rebarbas e deformações plásticas, dando a entender que o desgaste por adesão na superfície foi baixo.

Figura 66 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 20 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

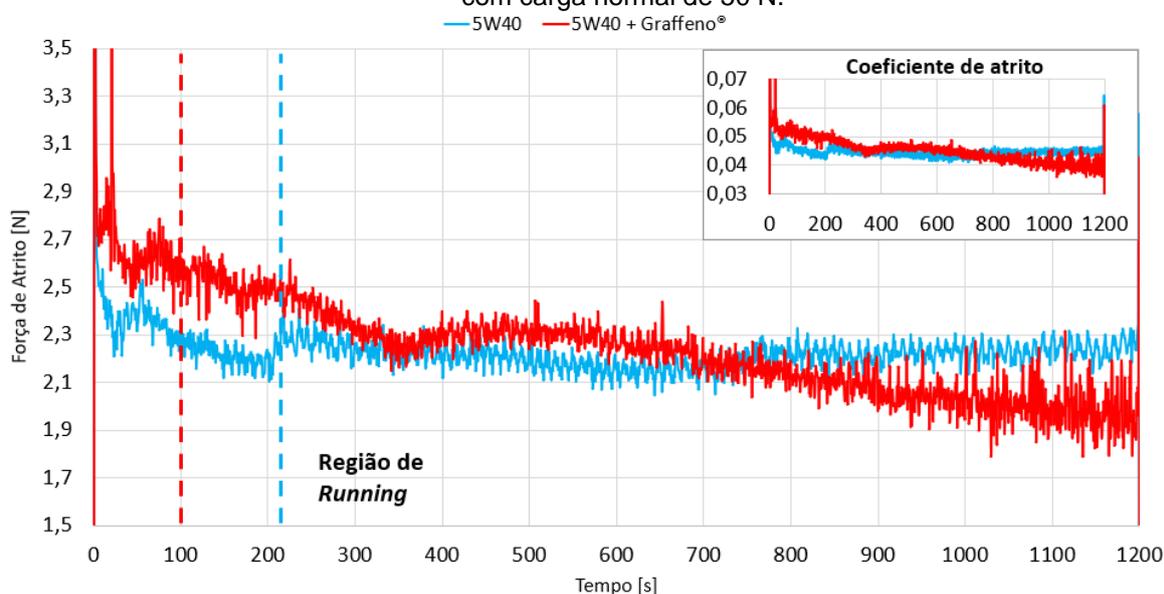
4.2.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TESTES DE 20 MINUTOS

Força e coeficiente de atrito: Na figura 67 é apresentado o comparativo da variação da força de atrito e do coeficiente de atrito, em função do tempo, para os ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N. Após os períodos de *running*, a força de atrito se manteve em torno de 2,3 N até aproximadamente 800 segundos. A partir de 800 segundos até o final do teste, o Graffeno® se mostrou eficaz na redução da força de atrito. Enquanto com óleo 5W40 a força de atrito se estabiliza próxima de 2,3 N, com o Graffeno® ela se consolida, em 2 N, isto é, aproximadamente 13% menor. O mesmo comportamento é observado com o coeficiente de atrito.

Todavia, a partir de aproximadamente 900 segundos, o ensaio com Graffeno® passou a apresentar maiores instabilidades comparado com o óleo 5W40 puro. Esse comportamento se opõe ao observado nos ensaios com carga normal de 25 N, nos quais o Graffeno® mantinha a força de atrito estável ao longo do tempo. A partir disso, é possível inferir que a interação do condicionador de metais com a superfície e sua relação com a estabilidade do atrito variam de acordo com a carga normal aplicada, podendo levar a comportamentos completamente opostos no que tange a estabilidade da força e coeficiente de atrito.

Por fim, os períodos de *running* foram relativamente próximos. Enquanto com 5W40 durou cerca de 200 segundos, com Graffeno® durou aproximadamente 100 segundos, indicando pequena diferença na rugosidade superficial inicial dos testes.

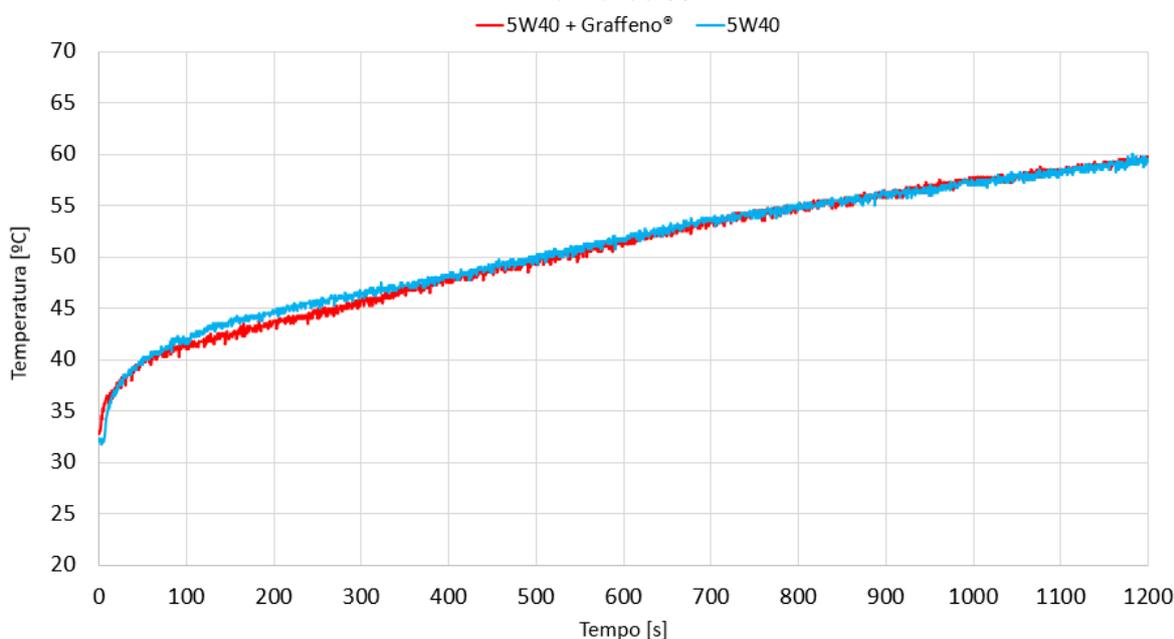
Figura 67 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Temperatura: Na figura 68 é apresentado um comparativo da variação da temperatura em função do tempo para os ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N. É possível observar que as duas condições de lubrificação obtiveram praticamente o mesmo desempenho térmico. Partindo do mesmo ponto, ambas se mantiveram em igual crescimento e atingiram valores finais entre 60 °C e 61 °C.

Figura 68 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaio de 20 minutos com carga normal de 50 N.

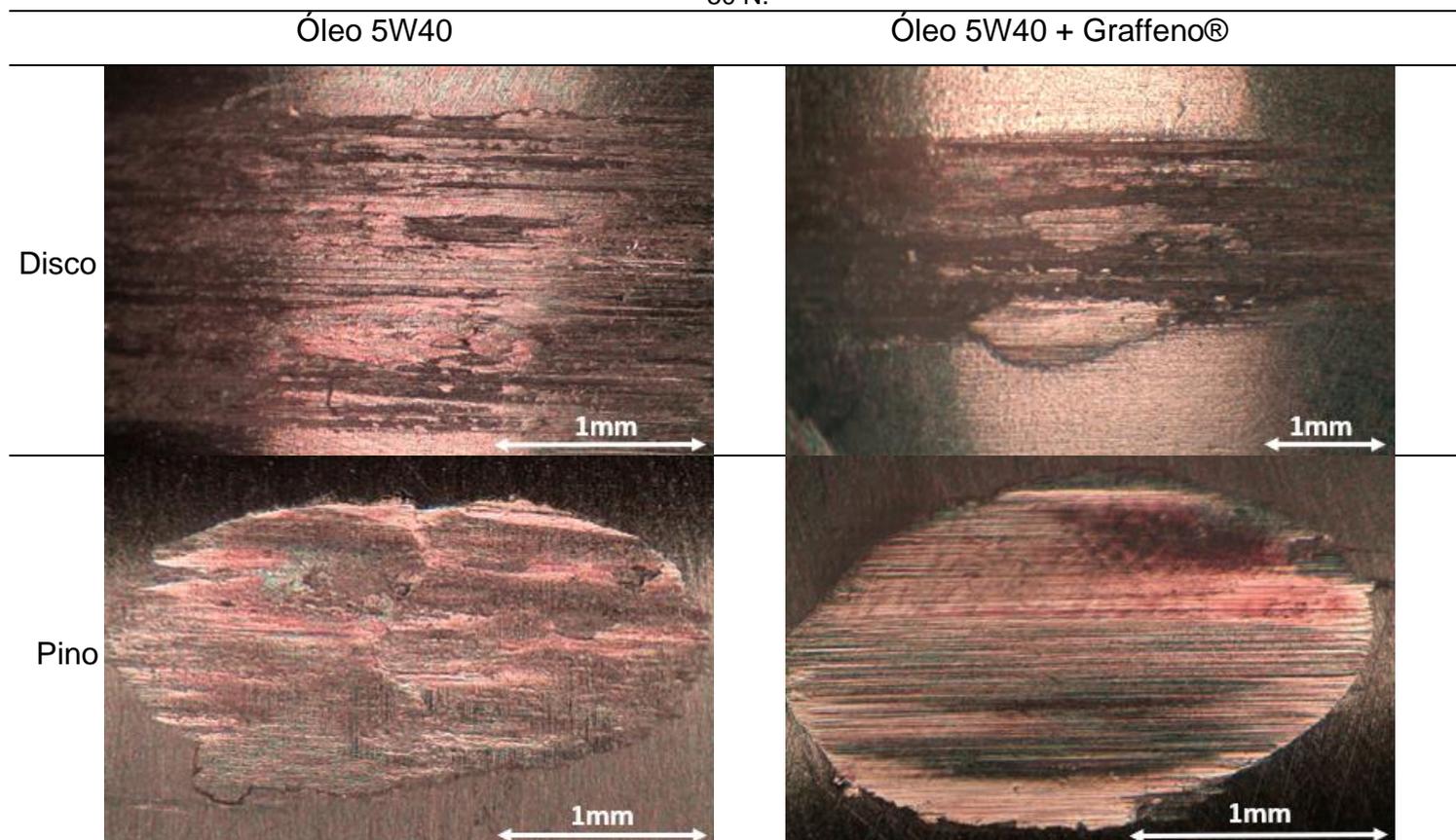


Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na tabela 14 é mostrado o comparativo das superfícies desgastadas dos discos e pinos após os ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N. No disco, a presença do Graffeno® reduziu a quantidade de sulcos e, além de os aprofundar, tornou sua distribuição mais uniforme ao longo da trilha. Observa-se ainda que o Graffeno® retardou o processo de formação de crateras, evidentes na lubrificação somente com óleo 5W40, e favoreceu a transferência e adesão de material, fato observado em diversos ensaios até então.

No pino, o Graffeno® agravou a abrasão. Essa condição pode ser visualizada através da quantidade de sulcos criados na presença do condicionador de metais. Já a lubrificação com óleo 5W40 favoreceu a presença de deformações plásticas pela superfície e maior quantidade de rebarbas, que na presença do Graffeno®, praticamente não existiram. Por fim, o elipsoide na superfície do pino com Graffeno® ficou mais uniforme se comparado ao óleo 5W40 puro, indicando maior uniformidade no processo de desgaste.

Tabela 14 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaio de 20 minutos com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

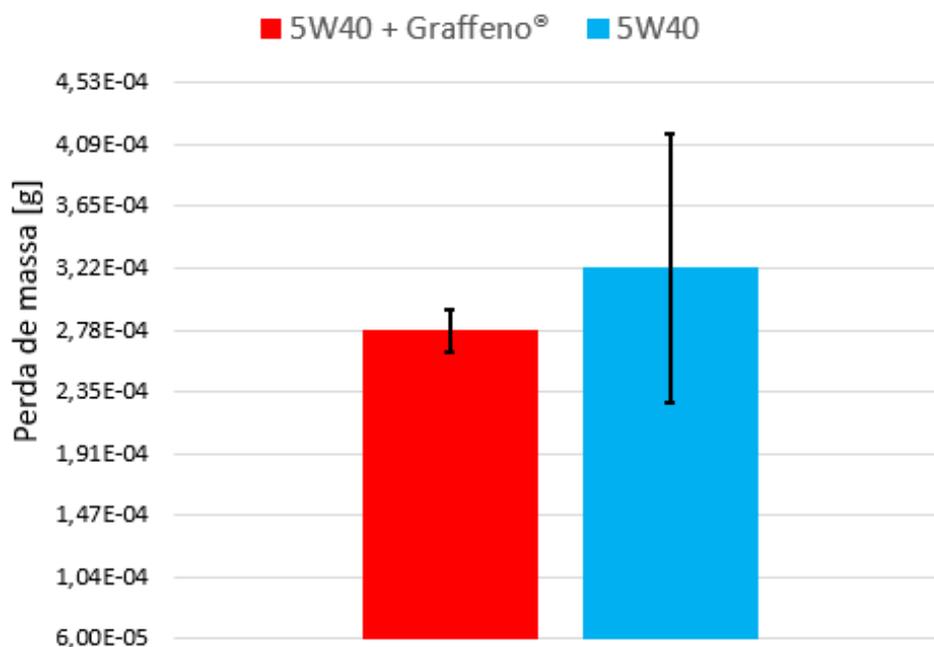
Perda de massa e desgaste: Na tabela 15 são apresentados, em função do tipo de ensaio realizado, os valores de perda de massa e taxas de desgaste calculados para os ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N. Na figura 69 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as perdas de massa.

Tabela 15 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaio de 20 minutos com carga normal de 50 N.

Tipo de ensaio	Perda de massa [10^{-4} g]	Taxa de desgaste [10^{-6} mm ³ /m]
Óleo 5W40	$3,21 \pm 0,95$	$6,00 \pm 1,77$
Óleo 5W40 + Graffeno®	$2,78 \pm 0,15$	$5,19 \pm 0,29$

Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 69 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Para os ensaios de 20 minutos com carga normal de 50 N, o Graffeno® mostrou-se, em média, eficiente na redução do desgaste. Em relação a perda de massa, além de obter valor médio menor, proporcionou menor dispersão e maior uniformidade nos resultados.

Analisando detalhadamente, a diferença na perda de massa foi de $4,3 \times 10^{-5}$ g a favor do óleo 5W40 + Graffeno®. Esse valor denota uma diferença de $8,1 \times 10^{-7}$ mm³/m na taxa de desgaste, que por sua vez equivale a uma resistência ao desgaste 15,6% maior do pino lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® em relação ao lubrificado com óleo puro.

No entanto, como o ensaio com óleo 5W40 apresentou grande variação em seus resultados e a diferença apontada encontra-se dentro dos limites da dispersão observada, não é possível garantir que a perda de massa foi de fato menor.

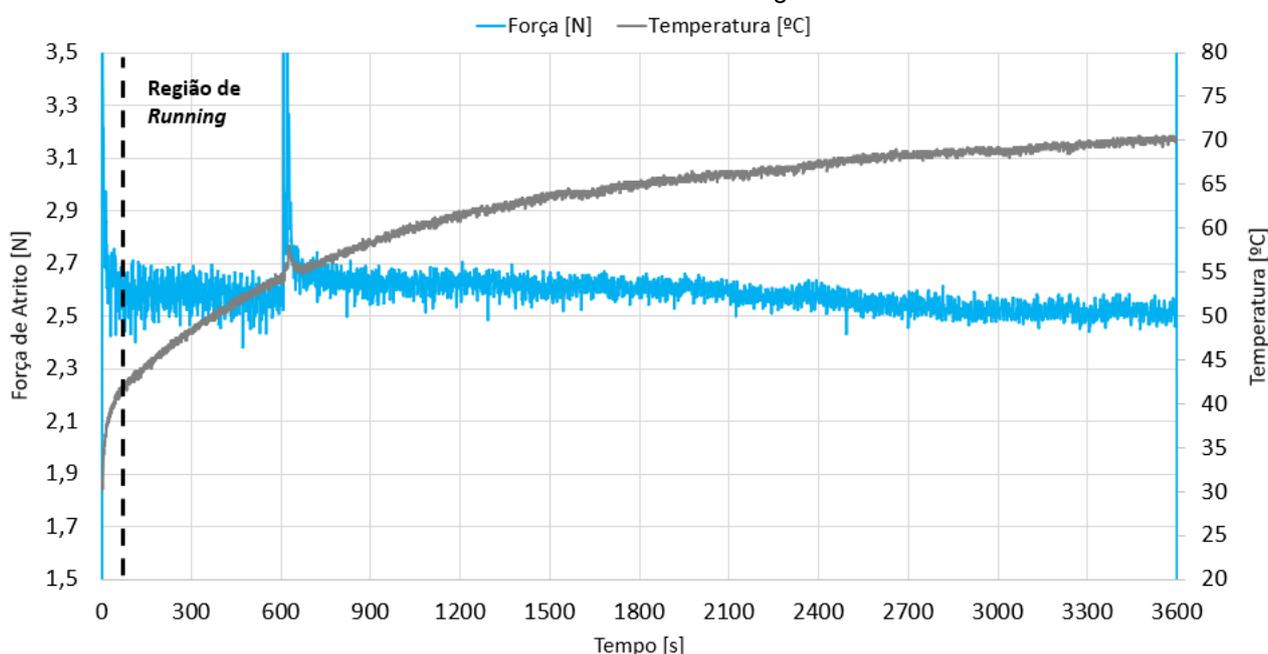
4.2.2 TESTES – 60 MINUTOS

4.2.2.1 TESTE 60 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40

Força de atrito: Na figura 70 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o *running*, cerca de 50 segundos, a força de atrito se estabiliza entre 2,5 e 2,7 N, valor que perdura até o final do ensaio. Aos 600 segundos, é possível observar um grande pico que, pela intensidade apresentada, provavelmente foi causado por falha na lubrificação e, em decorrência disso, contato direto entre as superfícies metálicas. Comportamento semelhante foi observado por Pacheco (2021). A região de *running* é mostrada de forma ampliada na figura 71.

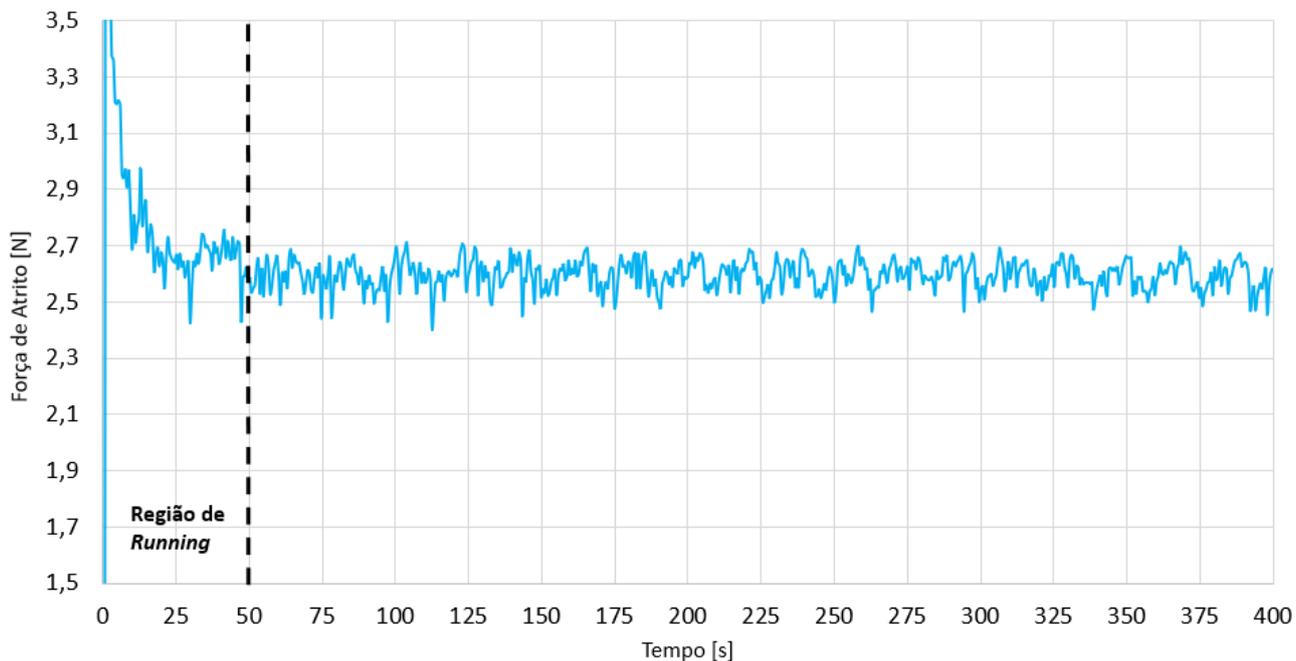
Temperatura: O ensaio inicia em 31 °C. A temperatura aumenta de forma rápida nos primeiros segundos, acompanhando o aumento da força de atrito, como visto anteriormente. Em seguida, passa a aumentar lentamente até 70 °C, valor que atinge ao final do ensaio. Aos 600 segundos, nota-se um pequeno pico de temperatura, possivelmente causado pelo contato direto entre as superfícies metálicas, conforme observado anteriormente para a força de atrito. Este contato pode produzir quantidade considerável de calor em um curto intervalo de tempo, que é rapidamente dissipado, retornando a temperatura ao seu estado estável e, em seguida, continuando a aumentar normalmente.

Figura 70 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

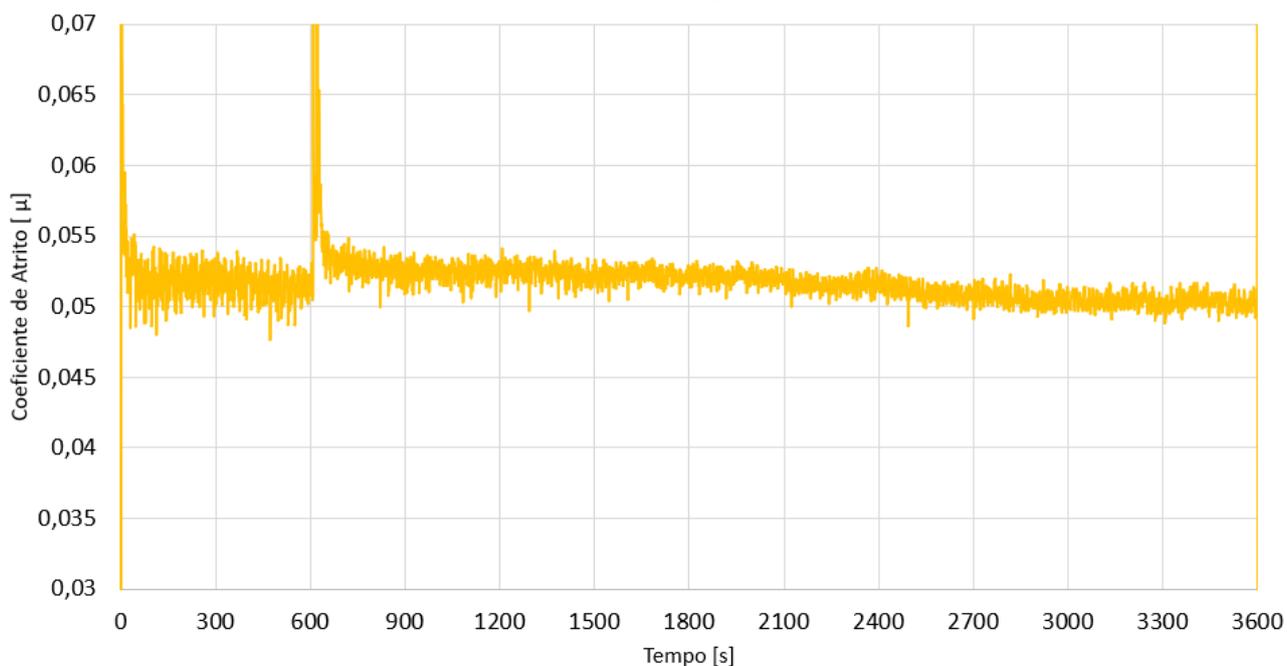
Figura 71 – Região de *Running* ampliada. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Coefficiente de atrito: Na figura 72 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito estabilizou próximo de 0,050, não sofrendo grandes mudanças no decorrer do teste.

Figura 72 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.

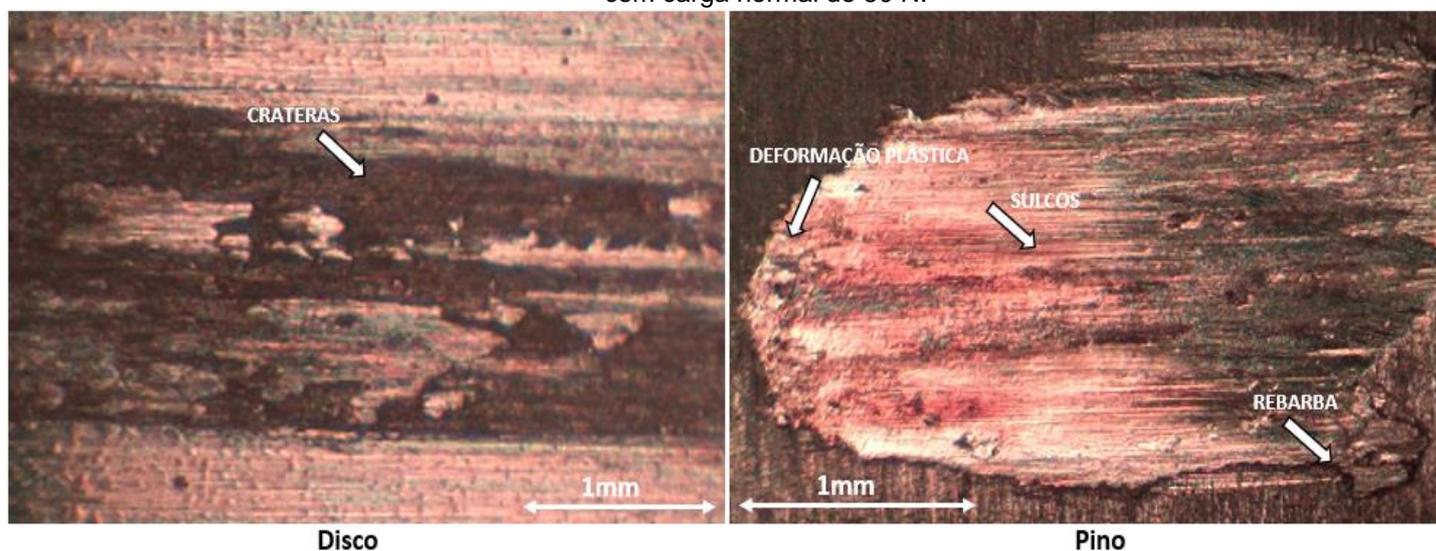


Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 73 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco são notáveis crateras bem escuras e profundas, bem como pouca quantidade de sulcos. Possivelmente a maior parte dos sulcos transformou-se em crateras devido ao desgaste por fadiga cíclica.

Na superfície do pino, nota-se pouca quantidade de sulcos, demasiadamente rasos, bem como bastante rebarba e deformações plásticas na região de saída do contato pino-disco. Pela dinâmica do ensaio, a rotação do disco empurra o material para a ponta do elipsoide, que ali tende a acumular-se. Cargas normais altas por elevadas durações favorecem o deslocamento desse material.

Figura 73 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

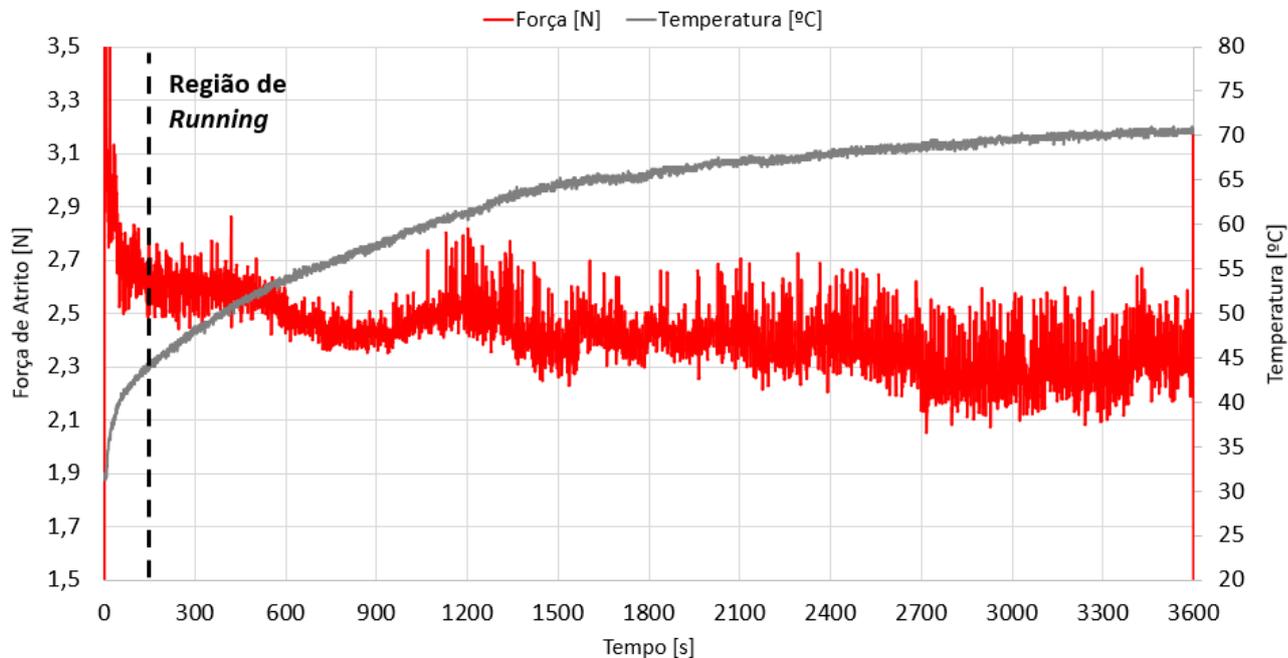
4.2.2.2 TESTE 60 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40 + GRAFFENO®

Força de atrito: Na figura 74 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o *running*, cerca de 150 segundos, a força de atrito manteve-se, em média, entre 2,5 N e 2,7 N com tendência diminutiva, chegando ao valor médio de 2,3 N ao final do ensaio. A região de *running* é mostrada na figura 75.

Após cerca de 1000 segundos, houve um aumento significativo nas oscilações da força de atrito, permanecendo assim até o término do teste. Considerando que os picos normalmente são causados por partículas abrasivas e, sabendo que, segundo Ludema (2019), no decorrer do ensaio os mecanismos de desgaste predominantes se alternam, possivelmente a partir deste ponto (1000 segundos) os mecanismos de desgaste abrasivos tenham predominado sobre quaisquer outros, causando alta

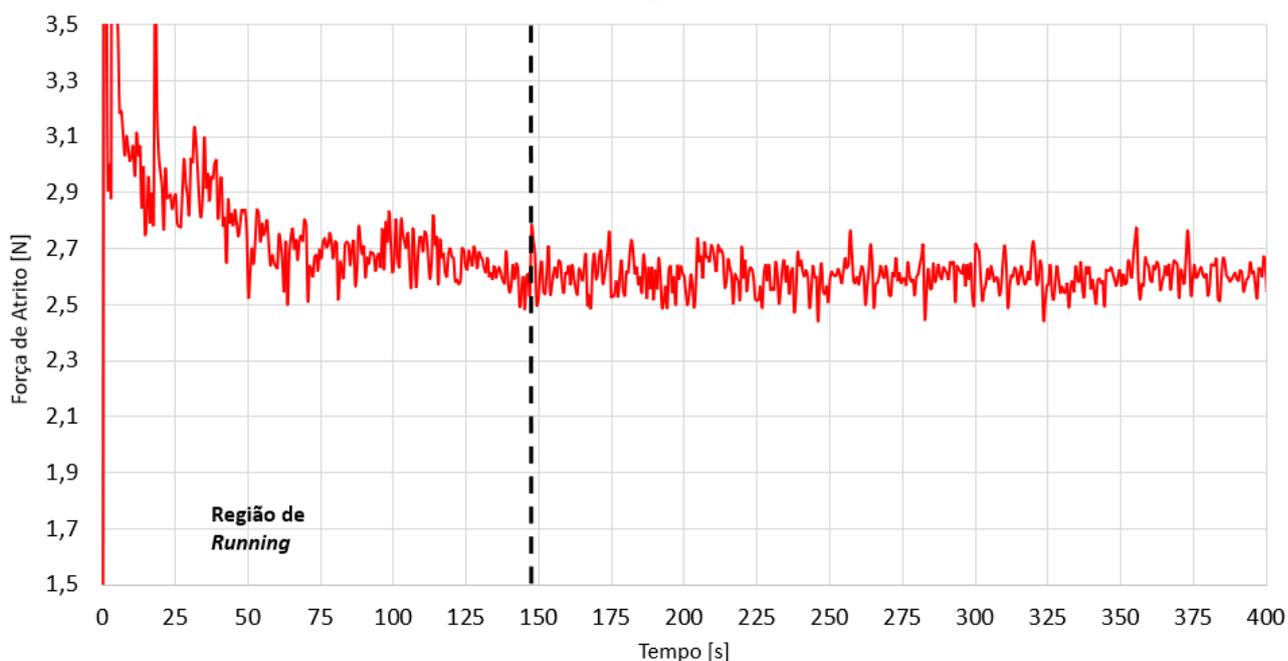
quantidade de oscilações. Isso pode sugerir que o Graffeno® atue potencializando a abrasão nessas condições de ensaio.

Figura 74 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 75 - Região de *Running* ampliada. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

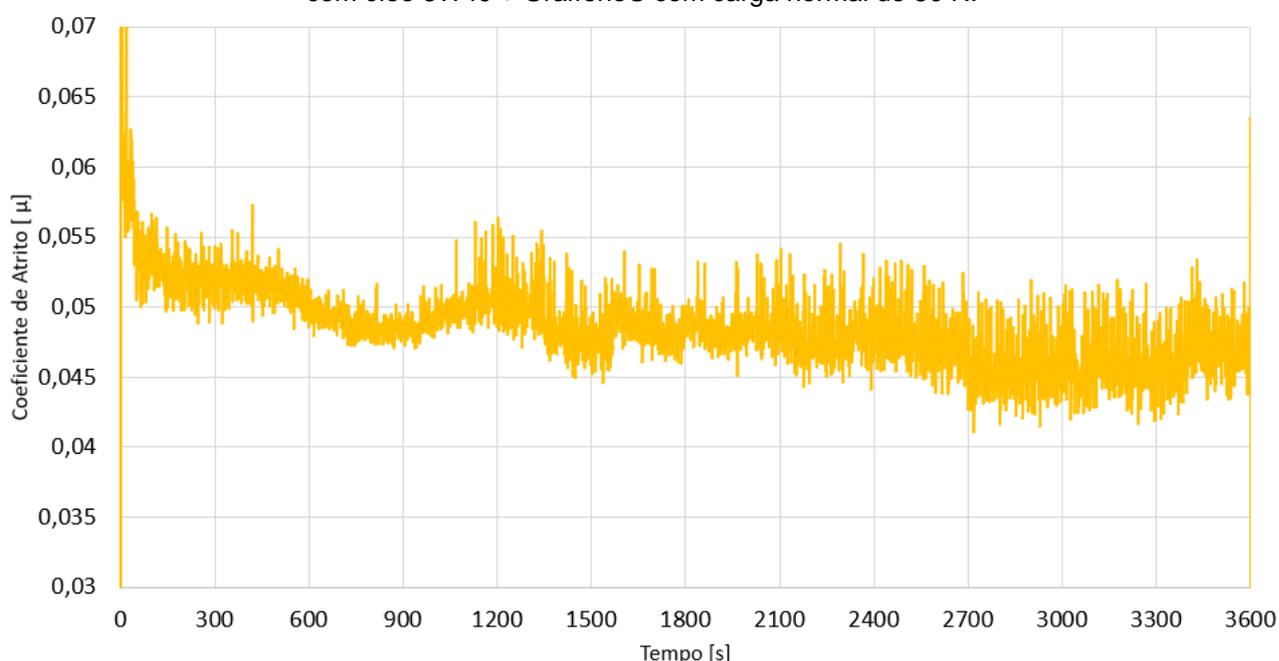


Fonte: De autoria própria, 2023.

Temperatura: O ensaio inicia em 32 °C. A temperatura aumenta de forma rápida nos primeiros segundos, acompanhando o aumento da força de atrito, como visto anteriormente. Em seguida, passa a aumentar lentamente até 71 °C, valor que atinge ao final do ensaio.

Coefficiente de atrito: Na figura 76 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito manteve-se entre 0,050 e 0,055 com tendência diminutiva, oscilando entre 0,045 e 0,050 ao final do ensaio.

Figura 76 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

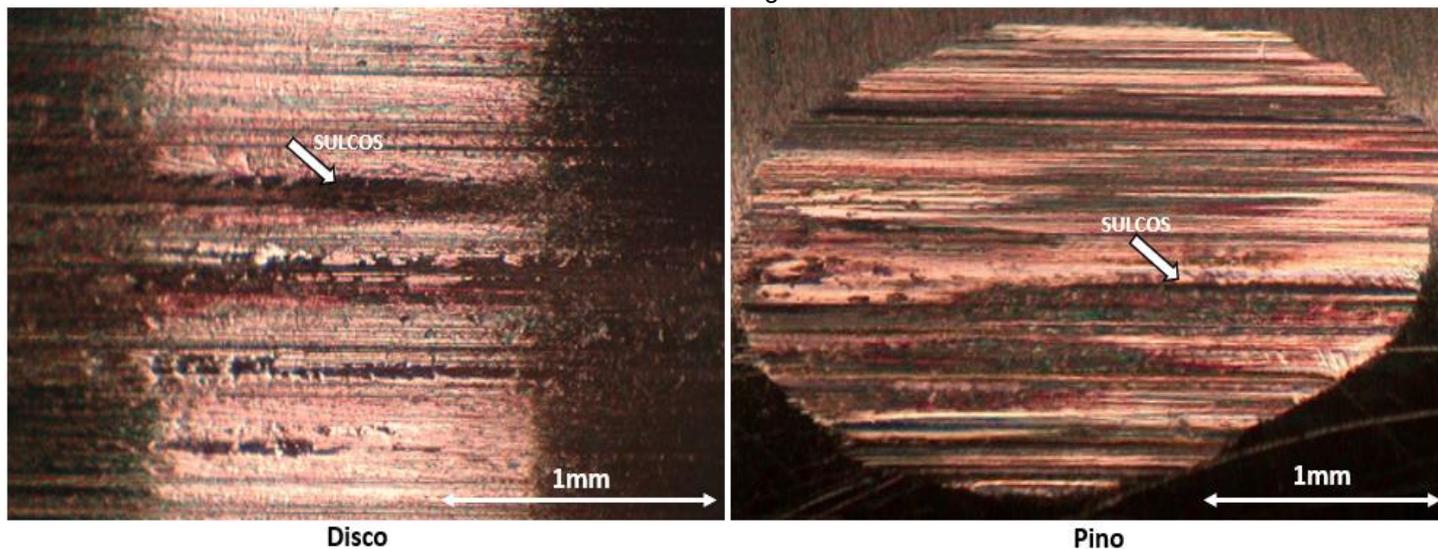


Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 77 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco estão presentes sulcos largos, profundos e bem definidos característicos de desgaste abrasivo.

A superfície do pino apresenta grande quantidade de sulcos, de variadas larguras e profundidades, evidenciados pela tonalidade escura. Os sulcos estão distribuídos de forma homogênea e juntamente com o formato uniforme do elipsoide, indicam que o desgaste, especialmente abrasivo, ocorreu de maneira uniforme sobre a superfície. Ademais, não foram observadas rebarbas e deformações plásticas no pino. Essa informação corrobora com os apontamentos realizados para a força de atrito e as oscilações, que neste ensaio, possivelmente indicam predominância do desgaste por abrasão.

Figura 77 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 60 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

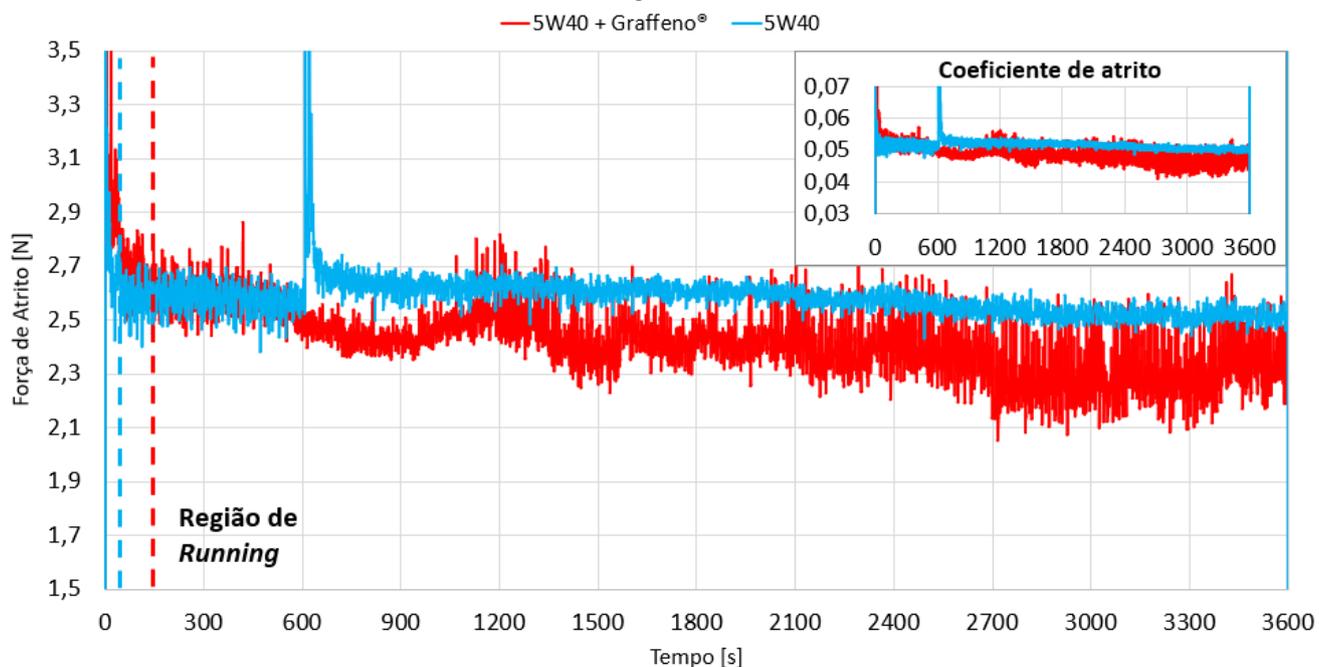


Fonte: De autoria própria, 2023.

4.2.2.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TESTES DE 60 MINUTOS

Força e coeficiente de atrito: Na figura 78 é apresentado um comparativo da variação da força de atrito e do coeficiente de atrito, em função do tempo, para os ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N.

Figura 78 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 60 minutos com carga normal de 50 N.



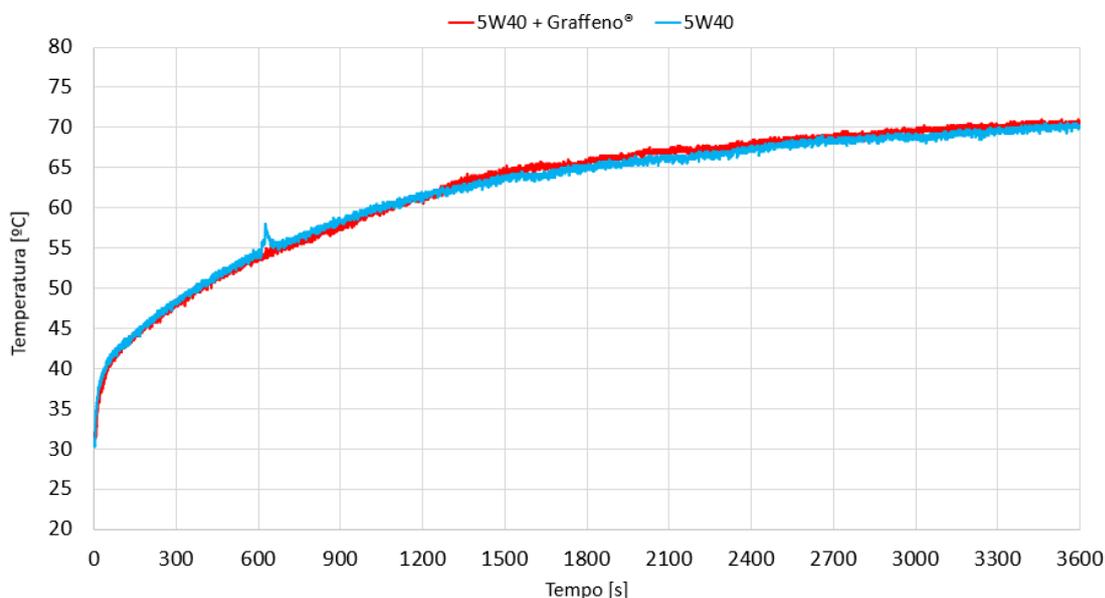
Fonte: De autoria própria, 2023.

Após os períodos de *running* e até aproximadamente 600 segundos, os valores da força de atrito mantiveram-se próximos, entre 2,5 e 2,7 N. A partir de 600 segundos até o final do teste, o Graffeno® apresentou uma sensível redução na força de atrito. Enquanto no teste com 5W40 a força de atrito mantém-se próxima de 2,5 N, com o Graffeno® ela se consolida, em média, em 2,3 N, isto é, 8% menor. O mesmo comportamento ocorreu com o coeficiente de atrito, que reduziu na mesma proporção.

A partir de 1000 segundos, o padrão do ensaio se repete. Com Graffeno®, a força de atrito apresenta instabilidades significativas em comparação com o óleo puro. Tal comportamento sugere que a influência do condicionador de metais na superfície e no atrito podem mudar conforme a carga normal aplicada e a duração do ensaio. Ensaio longos com uma carga normal de 50 N apresentaram maior instabilidade, possivelmente, devido a prevalência de mecanismos abrasivos de desgaste. Por fim, os períodos de *running* foram relativamente próximos. Enquanto com 5W40 durou cerca de 50 segundos, com Graffeno® durou aproximadamente 150 segundos, indicando pequena diferença na rugosidade superficial inicial dos testes.

Temperatura: Na figura 79 é apresentado um comparativo da variação da temperatura em função do tempo para os ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N. Novamente, as duas condições de lubrificação obtiveram praticamente o mesmo desempenho térmico. Partindo do mesmo ponto, ambas se mantiveram em igual crescimento e atingiram valores finais entre 70 °C e 71 °C.

Figura 79 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaio de 60 minutos com carga normal de 50 N.



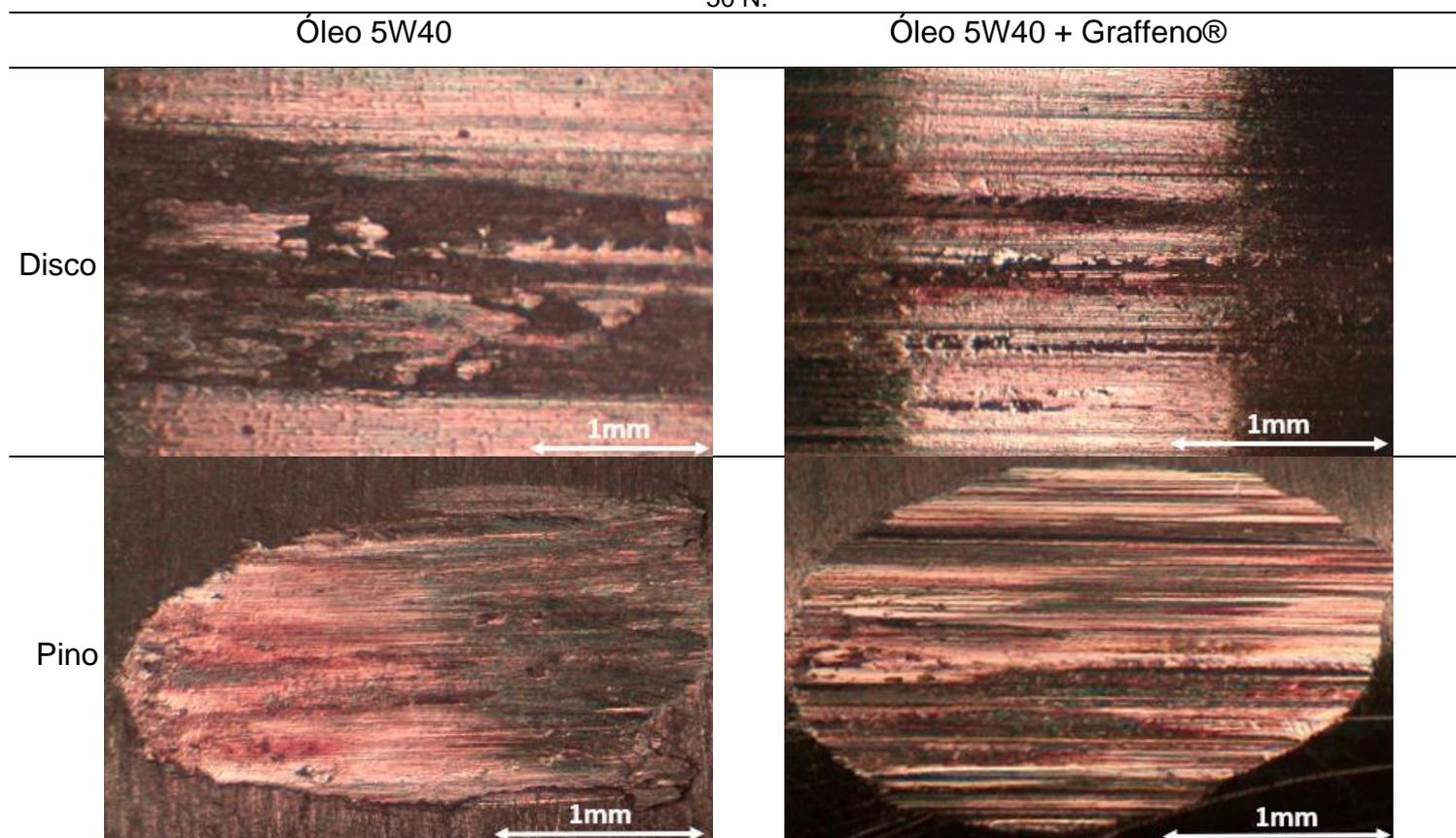
Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na tabela 16 é mostrado o comparativo das superfícies desgastadas dos discos e pinos após os ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N. No disco, o Graffeno® potencializou os processos abrasivos, evidentes pela presença de sulcos uniformes, e retardou o processo de fadiga, evitando a formação de crateras.

No pino, os mecanismos de desgaste predominantes foram completamente opostos. Enquanto na presença do Graffeno® ficou evidente grande quantidade de sulcos de variadas larguras e profundidades, que, segundo Serbino (2005), indicam abrasão, com o óleo 5W40 predominam deformações plásticas e rebarbas, que, segundo Kato (2001), são características típicas de mecanismos adesivos. Isso sugere que o Graffeno®, para a duração e carga analisadas, atua acentuando a abrasão e atenuando fadiga e adesão. Esse comportamento também foi observado nos ensaios de 20 minutos.

Por fim, o elipsoide na superfície do pino com Graffeno® apresentou-se mais uniforme se comparado ao óleo 5W40 puro, como de costume. Isso indica maior uniformidade no processo de desgaste.

Tabela 16 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaio de 60 minutos com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

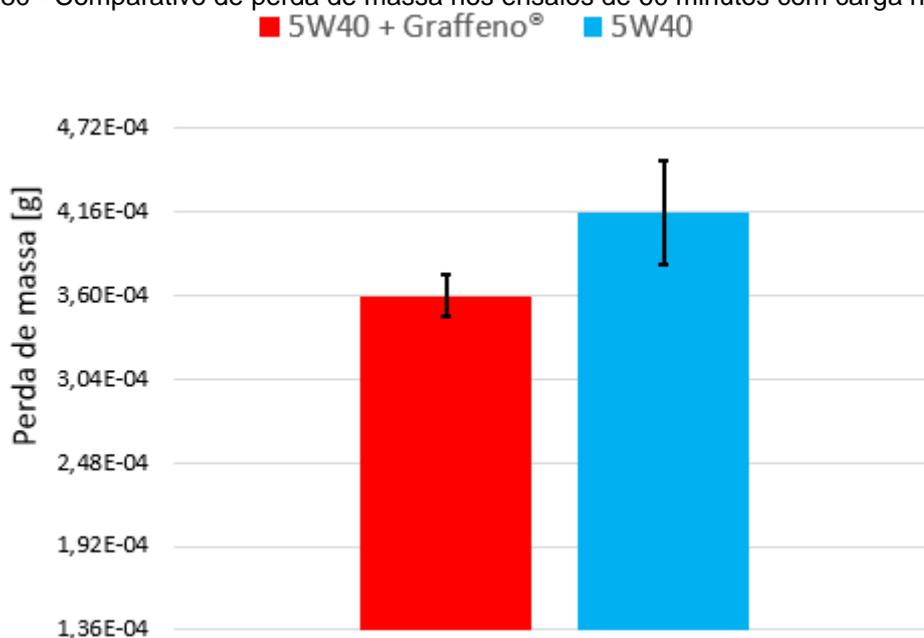
Perda de massa e desgaste: Na tabela 17 são apresentados, em função do tipo de ensaio realizado, os valores de perda de massa e taxas de desgaste calculados para os ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N. Na figura 80 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as perdas de massa.

Tabela 17 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N.

Tipo de ensaio	Perda de massa [10^{-4} g]	Taxa de desgaste [10^{-6} mm ³ /m]
Óleo 5W40	4,16 ± 0,35	2,59 ± 0,30
Óleo 5W40 + Graffeno®	3,60 ± 0,14	2,24 ± 0,08

Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 80 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 60 minutos com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Para o ensaio de 60 minutos com carga normal de 50 N, o Graffeno® mostrou-se eficaz na redução do desgaste. Em relação a perda de massa, novamente obteve valor médio menor e proporcionou menor dispersão nos resultados.

Analisando detalhadamente, a diferença na perda de massa foi de $5,6 \times 10^{-5}$ g a favor do óleo 5W40 + Graffeno®. Esse valor denota uma diferença de $3,5 \times 10^{-7}$ mm³/m na taxa de desgaste, que por sua vez equivale a uma resistência ao desgaste 15,6% maior do pino lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® em relação ao lubrificado com óleo puro, valor semelhante ao ensaio de 20 minutos.

De posse desses dados, respeitando a dispersão observada, é possível afirmar que o Graffeno®, para essa duração de ensaio, foi benéfico para a superfície no que tange a perda de massa.

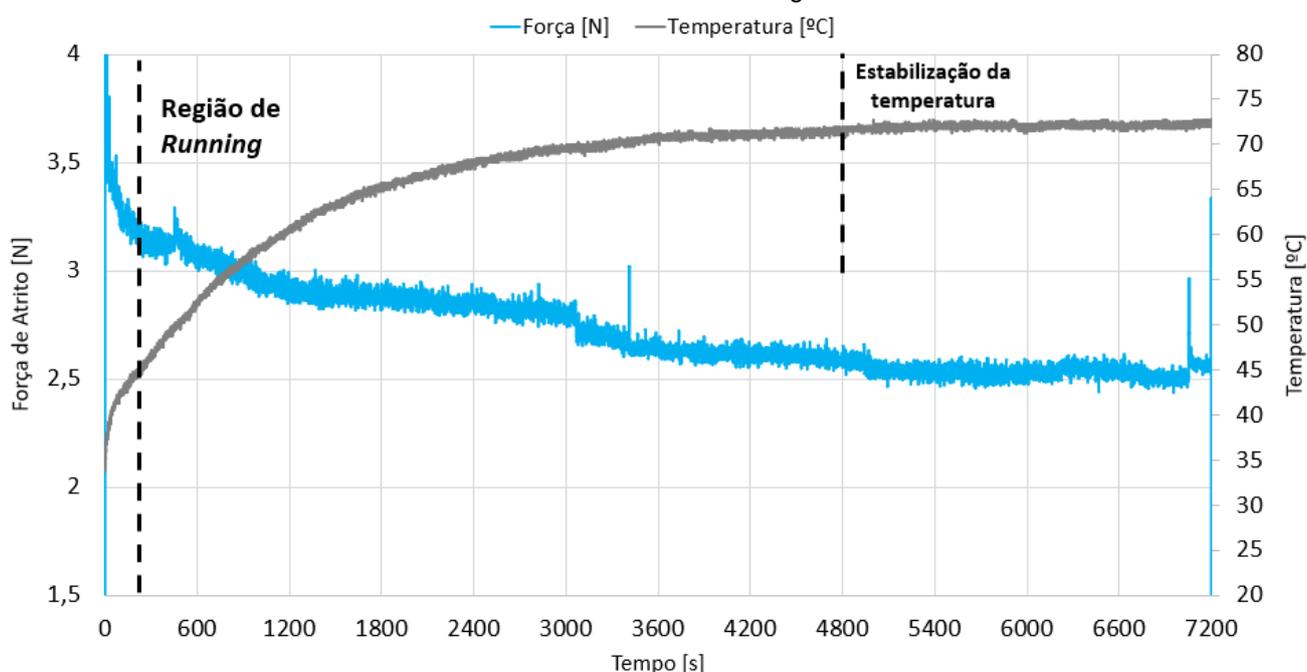
4.2.3 TESTES – 120 MINUTOS

4.2.3.1 TESTE 120 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40

Força de atrito: Na figura 81 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o *running*, cerca de 200 segundos, a força de atrito atinge, aproximadamente, 3,3 N e, ao longo de praticamente todo o ensaio, diminui gradualmente, alcançando um valor médio de 2,5 N ao final dos 7200 segundos. Esse comportamento de diminuição ocorre, devido à tendência natural da força em se aproximar de seu ponto de equilíbrio, onde se estabiliza sem grandes flutuações. Nesse ensaio específico, diferentemente dos testes anteriores, a força de atrito inicial foi consideravelmente alta, e por isso ao longo do tempo ela diminui até alcançar seu ponto de equilíbrio, cerca de 2,5 N para as condições estudadas. A região de *running* é mostrada de forma ampliada na figura 82.

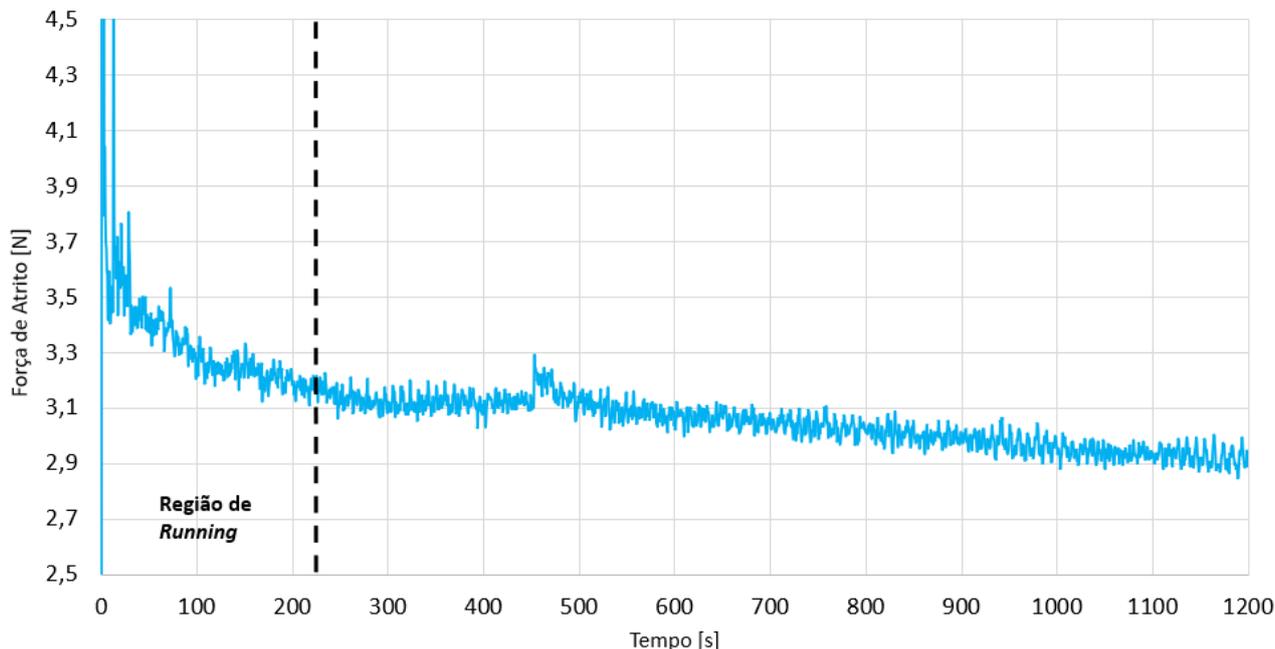
Temperatura: O ensaio inicia em 34 °C. Após rápido aumento inicial, a temperatura segue subindo lentamente até o valor máximo de 72 °C, que alcança próximo dos 4800 segundos. A partir desse ponto, o equilíbrio térmico foi alcançado e a temperatura parou de variar.

Figura 81 - Variação da força de atrito e temperatura em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

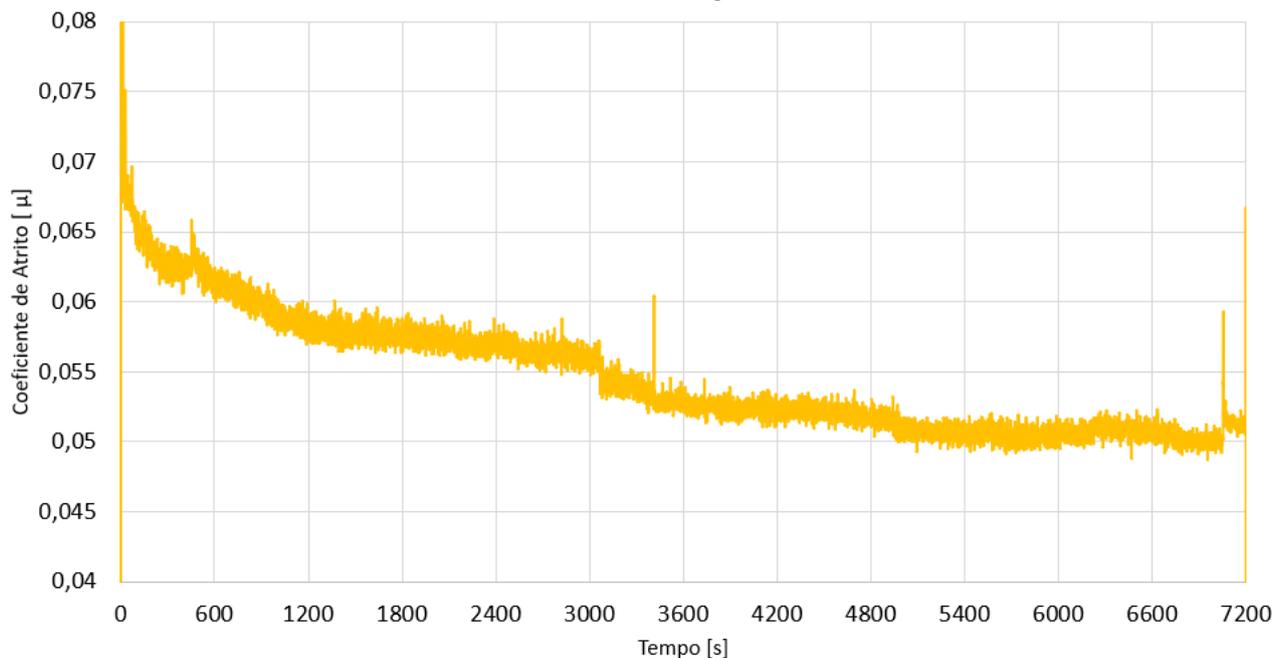
Figura 82 - Região de *Running* ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Coefficiente de atrito: Na figura 83 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito inicialmente atingiu o pico de 0,065 e ao longo do tempo decaiu até 0,050, onde se manteve até o final do ensaio.

Figura 83 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.

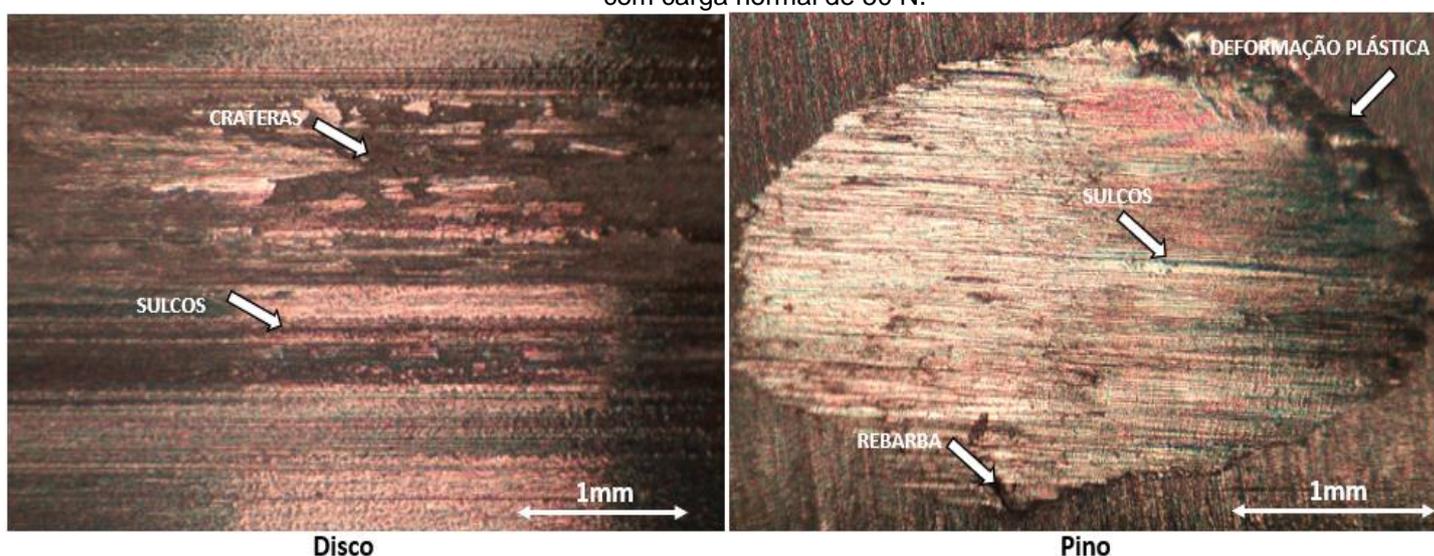


Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 84 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco destacam-se crateras (fadiga) e pouca quantidade de sulcos (abrasão).

Na superfície do pino é perceptível uma pequena quantidade de sulcos, os quais são muito rasos, juntamente com uma quantidade considerável de rebarbas e deformações plásticas, estas representadas pelo acúmulo de material na região de saída do contato pino-disco. Nota-se ainda, que o elipsoide apresenta formato uniforme, indicando a uniformidade do desgaste ocorrido. Ensaio prolongados favorecem maior homogeneidade no desgaste.

Figura 84 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

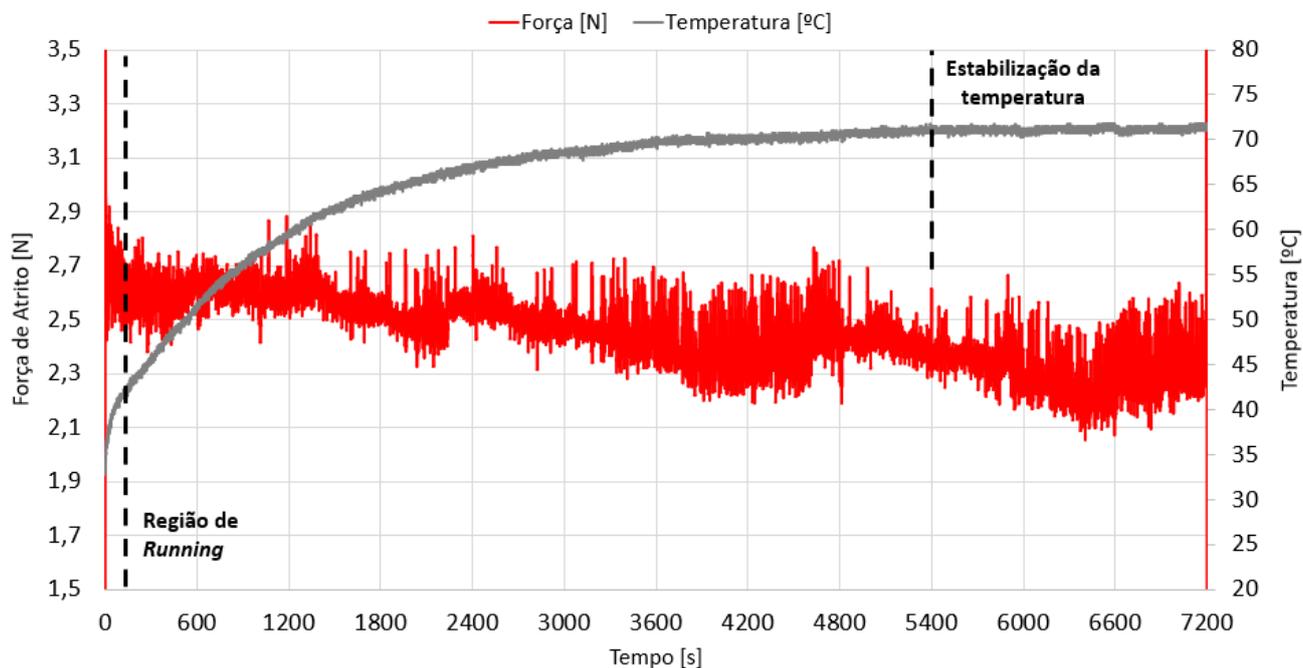
4.2.3.2 TESTE 120 MINUTOS LUBRIFICADO COM ÓLEO 5W40 + GRAFFENO®

Força de atrito: Na figura 85 é apresentada a variação da força de atrito e temperatura. Após o running, cerca de 50 segundos, a força de atrito manteve-se entre 2,5 N e 2,7 N com tendência diminutiva, chegando ao valor médio de 2,3 N ao final do ensaio. A região de *running* é mostrada de forma ampliada na figura 86.

Novamente, a partir de 1000 segundos, nota-se instabilidades significativas na força de atrito. Esse comportamento pode ser atribuído a predominância de mecanismos abrasivos e a potencialização deles por parte do Graffeno®.

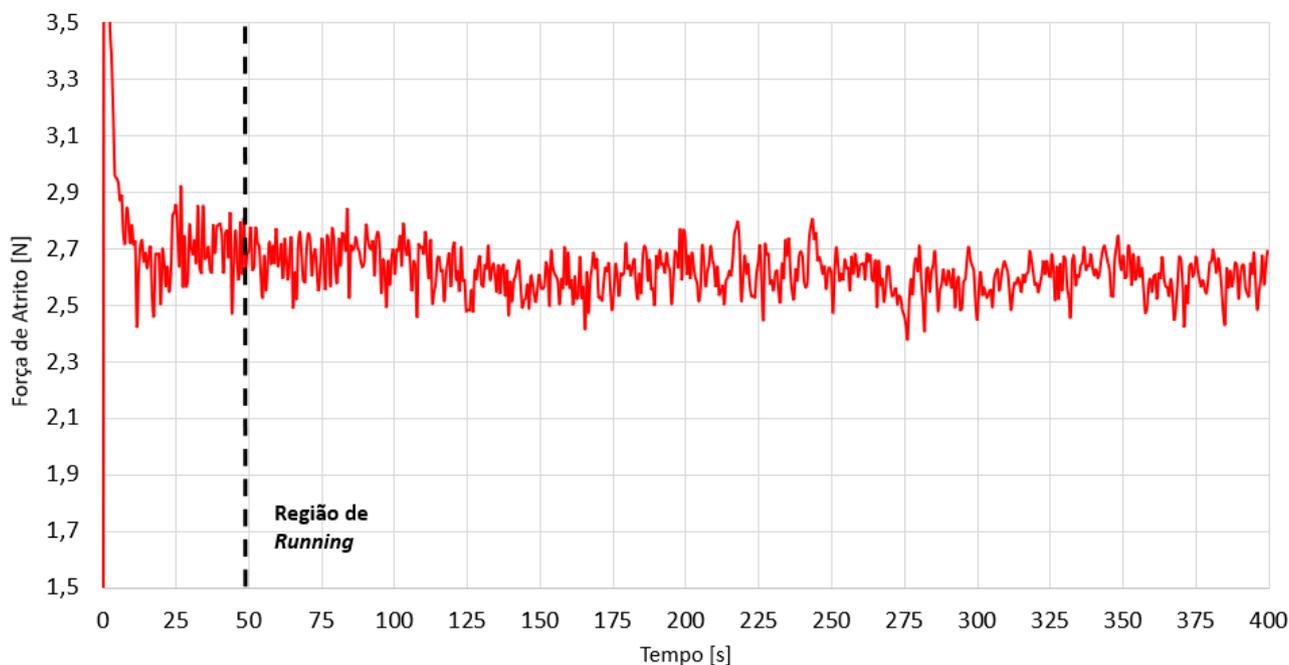
Temperatura: O ensaio inicia em 33 °C e atinge seu pico a 71 °C, aproximadamente aos 5400 segundos. A partir desse ponto, a estabilidade térmica foi alcançada e a temperatura parou de variar.

Figura 85 - Variação da força de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

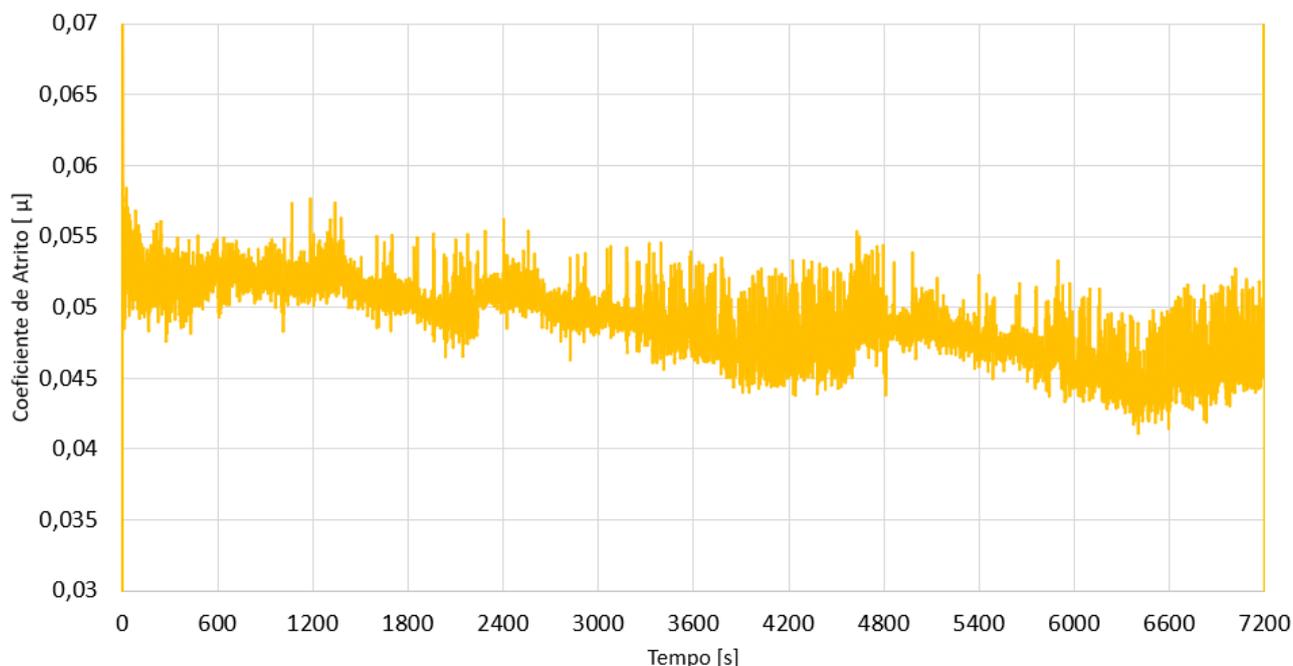
Figura 86 - Região de *Running* ampliada. Ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Coefficiente de atrito: Na figura 87 é mostrada a variação do coeficiente de atrito. Para este ensaio, o coeficiente de atrito manteve-se entre 0,050 e 0,055 com tendência diminutiva, oscilando entre 0,045 e 0,050 ao final do ensaio.

Figura 87 - Variação do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos lubrificado



com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

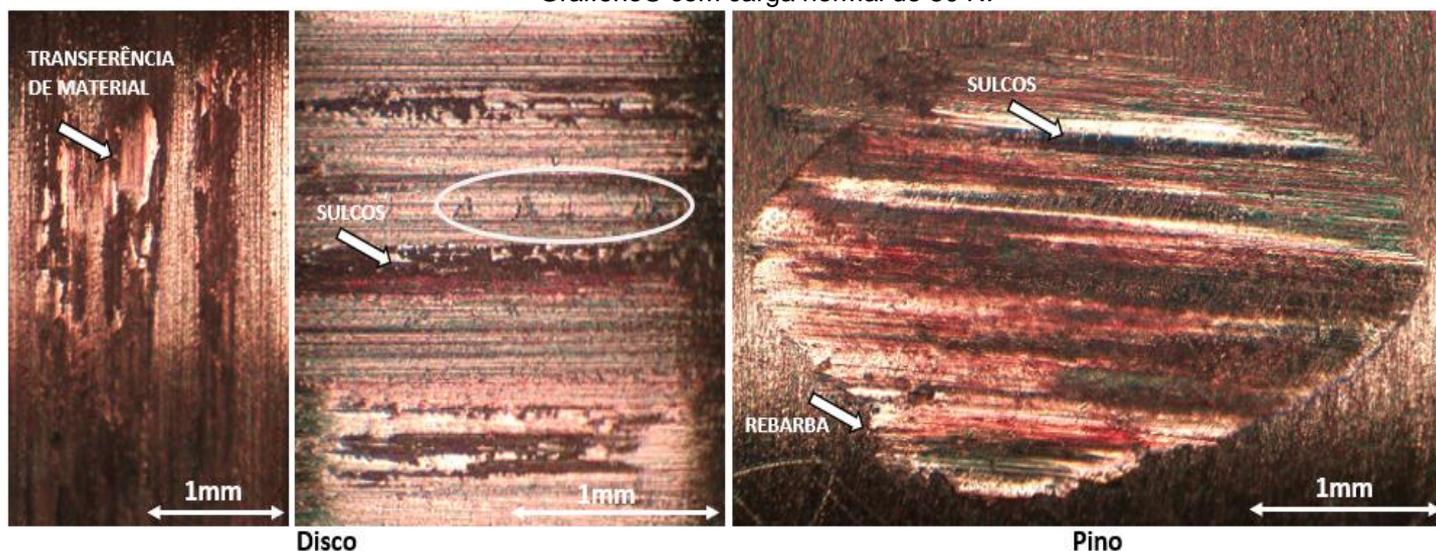
Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na figura 88 são mostradas as superfícies desgastadas do disco e do pino após o ensaio. Na superfície do disco, destacam-se sulcos largos e profundos, característicos de forte abrasão. Em alguns pontos, estes sulcos apresentaram certa disformidade em sua distribuição, de certa forma assemelhando-se com a distribuição de crateras, quando existentes. É possível observar ainda um grande ponto de transferência e adesão de material e marcas que indicam a possibilidade de que algum detrito tenha sido prensado naquela região.

A superfície do pino apresenta sulcos bem largos, distribuídos de forma homogênea, que, juntamente com o formato uniforme do elipsoide, indicam a uniformidade do desgaste ocorrido.

Foram observadas ainda poucas rebarbas e praticamente nenhuma região com deformações plásticas. Essa característica, como observado em testes anteriores, indica a predominância do desgaste abrasivo, como evidenciado na força de atrito.

Figura 88 - Superfícies do disco e do pino após o ensaio de 120 minutos lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

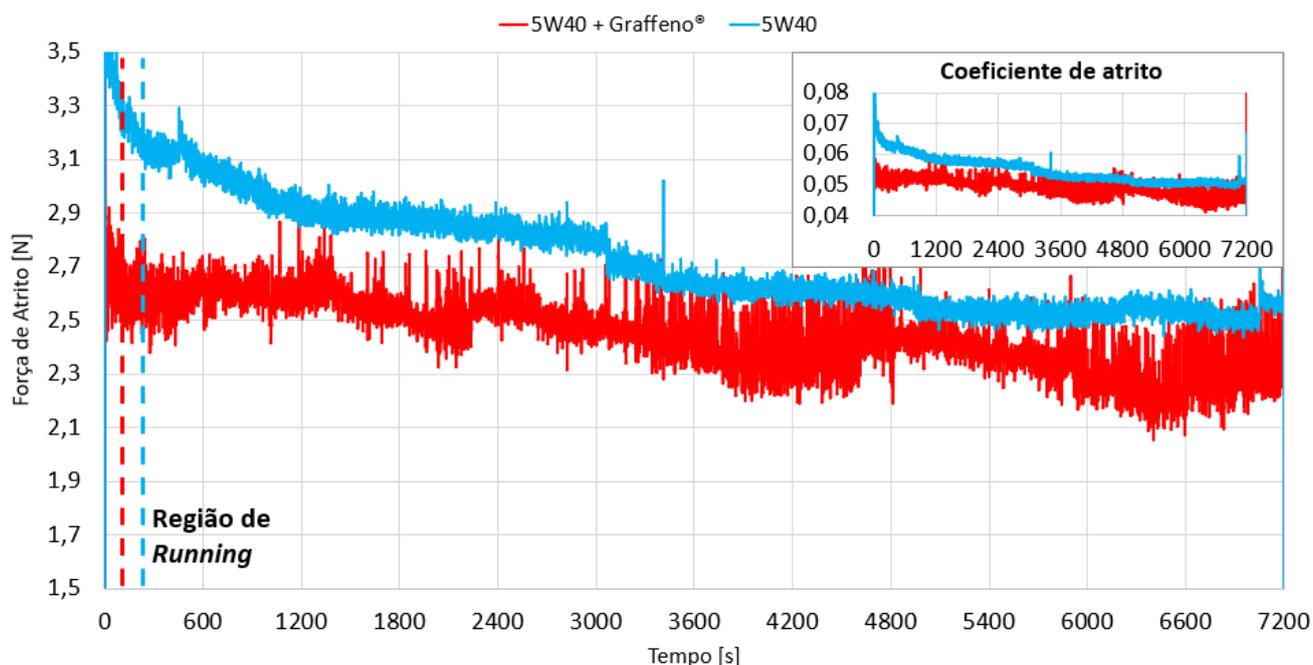


Fonte: De autoria própria, 2023.

4.2.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS TESTES DE 120 MINUTOS

Força e coeficiente de atrito: Na figura 89 é apresentado um comparativo da variação da força de atrito e do coeficiente de atrito, em função do tempo, para os ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.

Figura 89 - Comparativo da força e coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio de 120 minutos com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

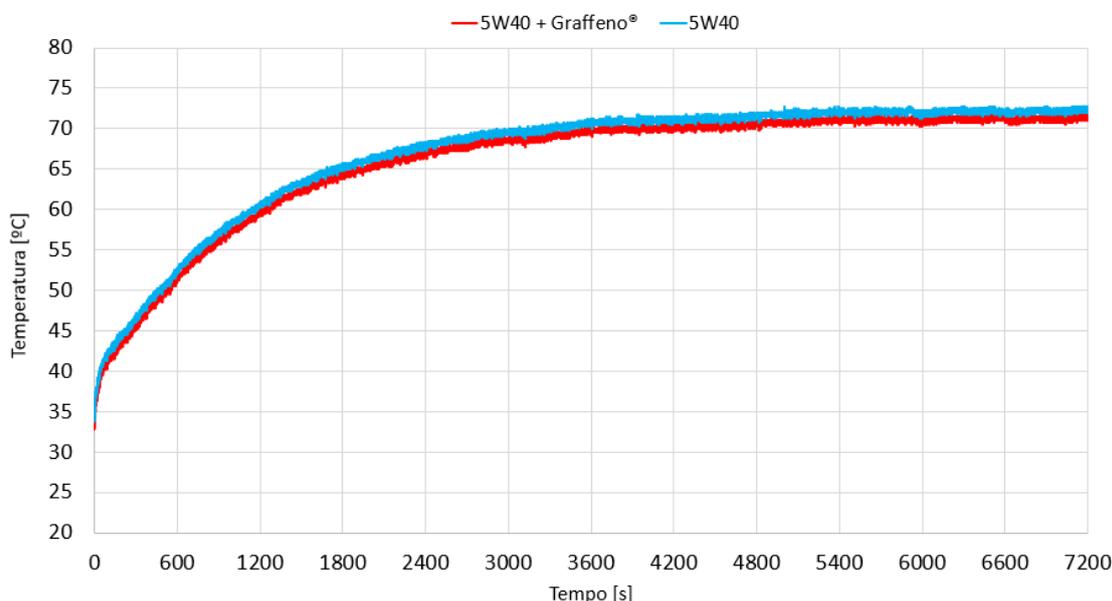
Durante todo o ensaio o Graffeno® se mostrou eficaz na redução da força de atrito. Enquanto no teste com óleo 5W40 a força de atrito atinge o pico inicial de 3,3 N e reduz até estabilizar em 2,5 N, com o Graffeno® ela inicia entre 2,5 e 2,7 N e se consolida, em média, em 2,3 N. Apesar da dificuldade em estabelecer um valor exato para a diferença, a redução da força de atrito, causada pelo Graffeno®, é facilmente perceptível ao examinar e comparar as curvas. O mesmo comportamento ocorre com o coeficiente de atrito. Os dados apresentados ratificam que o uso do Graffeno®, para essa carga, é eficaz na redução da força de atrito para testes curtos e longos.

A partir de 1000 segundos, o comportamento dos ensaios anteriores se repete. O Graffeno® intensificou o desgaste abrasivo, resultando em diversas instabilidades na força de atrito, fato que não aconteceu na lubrificação com óleo puro.

Por fim, os períodos de *running* variaram bastante. Enquanto com 5W40 o *running* foi de, aproximadamente, 200 segundos, com Graffeno® ele durou 50 segundos. Isso indica que, ao início do teste, as superfícies com óleo 5W40 apresentavam maior rugosidade do que as superfícies com Graffeno®.

Temperatura: Na figura 90 é apresentado um comparativo da variação da temperatura em função do tempo para os ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N. As duas condições de lubrificação obtiveram desempenho térmico semelhante. Apesar de leve discrepância no início, ambas demonstraram crescimento semelhante, alcançando valores finais entre 71 °C e 72 °C.

Figura 90 - Comparativo da temperatura em função do tempo. Ensaio de 120 minutos com carga normal de 50 N.



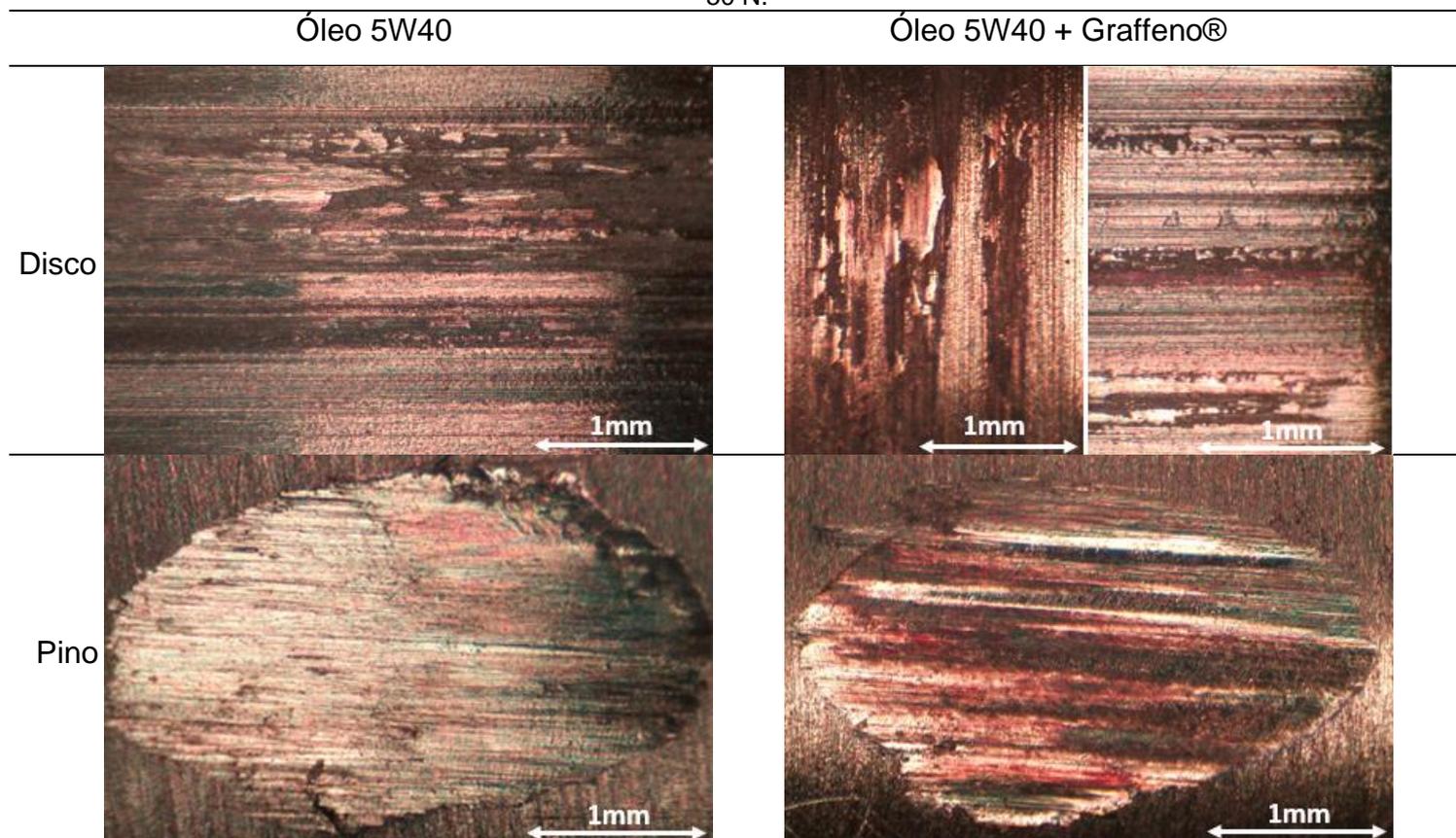
Fonte: De autoria própria, 2023.

Análise superficial: Na tabela 18 é mostrado o comparativo das superfícies desgastadas dos discos e pinos após os ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N. No disco, observa-se que o Graffeno® evita a criação de crateras, isto é, reduz o desgaste por fadiga e favorece a transferência e adesão de material, comportamento observado frequentemente. Os sulcos aparentam ter profundidade igual, mas na presença do Graffeno® sua distribuição torna-se mais uniforme.

No pino os mecanismos de desgaste predominantes foram opostos. Com Graffeno®, observam-se sulcos largos e profundos, indicando forte abrasão. Com óleo 5W40, destacam-se, em grande quantidade, rebarbas e deformações plásticas, mecanismos essencialmente adesivos. Em geral, o Graffeno® potencializa a abrasão e mitiga a adesão e a fadiga, comportamento já conhecido.

Por fim, ambos os elipsoides apresentaram formato similarmente homogêneos, destoando dos ensaios anteriores nos quais os elipsoides com Graffeno® sempre apresentavam formato mais uniforme. Isso sugere que a alta duração do ensaio está diretamente ligada com a uniformização dos processos de desgaste.

Tabela 18 - Comparativo das superfícies desgastadas. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

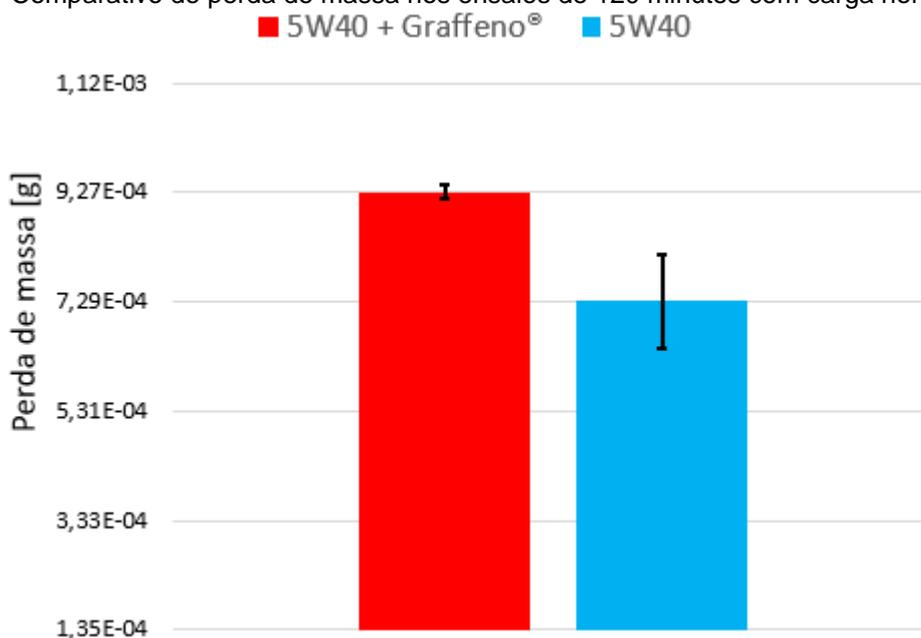
Perda de massa e desgaste: Na tabela 19 são apresentados, em função do tipo de ensaio realizado, os valores de perda de massa e taxas de desgaste calculados para os ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N. Na figura 91 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as perdas de massa.

Tabela 19 - Perda de massa e taxa de desgaste. Ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.

Tipo de ensaio	Perda de massa [10^{-4} g]	Taxa de desgaste [10^{-6} mm ³ /m]
Óleo 5W40	7,29 ± 0,84	2,27 ± 0,26
Óleo 5W40 + Graffeno®	9,27 ± 0,13	2,89 ± 0,04

Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 91 - Comparativo de perda de massa nos ensaios de 120 minutos com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

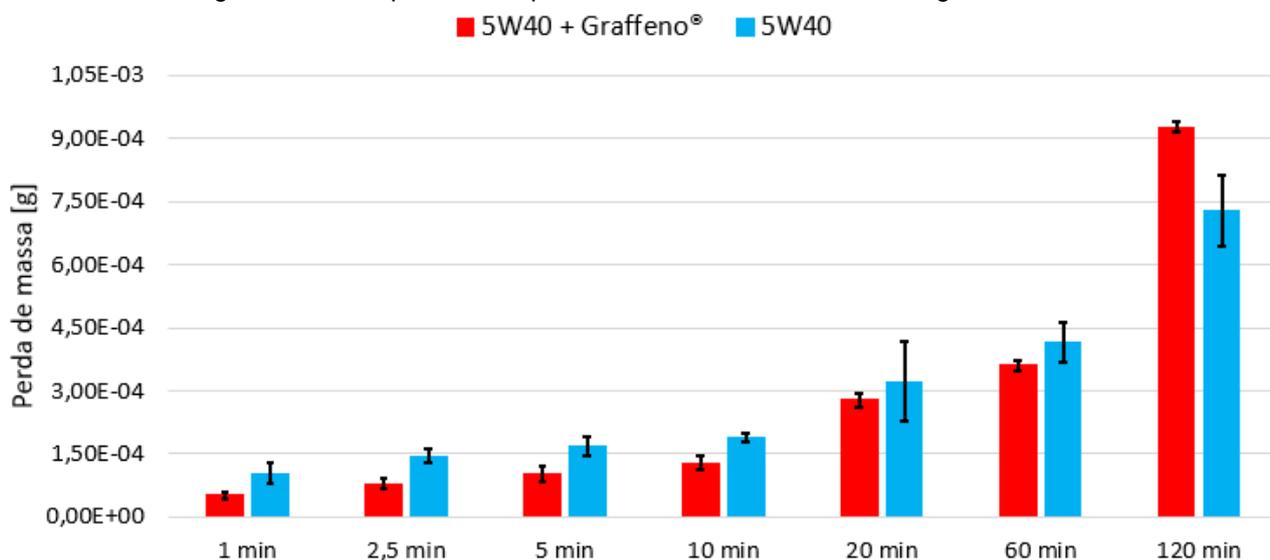
No ensaio de 120 minutos com carga normal de 50 N, indo de encontro aos dados obtidos nas curvas de força de atrito, o Graffeno® apresentou piores resultados de perda de massa e taxa de desgaste se comparado ao óleo puro. Comportamento semelhante foi observado nos ensaios de 120 minutos com carga normal de 25 N.

Analisando detalhadamente, a diferença na perda de massa foi de aproximadamente 2×10^{-4} g a favor do óleo 5W40 puro. Esse valor representa uma diferença de $6,2 \times 10^{-7}$ mm³/m na taxa de desgaste, que por sua vez equivale a uma resistência ao desgaste 27,3% maior do pino lubrificado com óleo 5W40 puro em relação ao lubrificado com óleo + Graffeno®. De posse desses dados, respeitando a dispersão observada nos testes, é possível afirmar que o Graffeno®, para essa duração de ensaio, foi prejudicial para a superfície no que tange a perda de massa.

4.2.4 COMPORTAMENTO DA PERDA DE MASSA E DESGASTE AO LONGO DO TEMPO

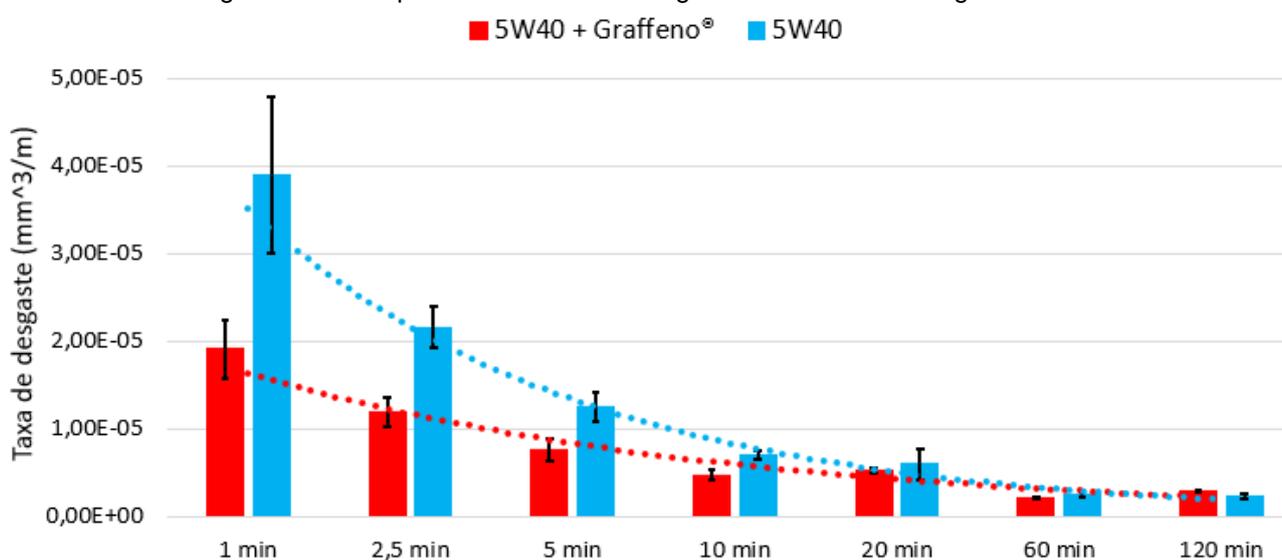
Nas figuras 92 e 93 são apresentadas de forma gráfica e comparativa, a perda de massa e a taxa de desgaste em função do tempo para os ensaios realizados com carga de 50 N. Com Graffeno®, o teste de 1 minuto apresentou aproximadamente 5% da perda de massa em relação ao de 120 minutos, já com óleo 5W40 puro, essa diferença foi de aproximadamente 15%. Em relação ao ensaio de 60 minutos, os valores são de 15% e 25%, respectivamente.

Figura 92 – Comparativo de perda de massa. Ensaio com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 93 – Comparativo de taxa de desgaste. Ensaio com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Embora os valores sejam inferiores aos registrados com a carga normal de 25 N, ainda é evidente que, proporcionalmente, a maior parte do desgaste ocorre nos momentos iniciais do teste. Novamente a análise da taxa de desgaste sustenta essa constatação. Observa-se o mesmo padrão de decaimento logarítmico, menos pronunciado em relação aos ensaios realizados com 25 N, evidenciando que, à medida que a duração do teste diminui, a taxa de desgaste aumenta, indicando muita remoção de material no início do teste.

Os valores inferiores e a redução menos pronunciada, em relação aos testes com 25 N, sugerem que quanto maior a carga, maior a relevância da duração do ensaio na perda de massa. Cargas elevadas aplicadas por longos períodos exercem um estresse excessivo na superfície, resultando em mais material removido. Esse comportamento fica claro no ensaio de 120 minutos com Graffeno®, que apresentou mais que o dobro da perda de massa em comparação ao ensaio de 60 minutos.

4.2.5 PRESSÃO DE CONTATO E REGIME DE LUBRIFICAÇÃO

Nas tabelas 20 e 21 são apresentados os valores da área e pressão de contato para os ensaios lubrificados com óleo 5W40 e óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

Tabela 20 – Pressão de contato. Ensaio lubrificados com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.

Tempo [s]	Área de contato [mm ²]	Pressão [MPa]
0	0,001	50000,00
60	1,91	26,18
150	2,16	23,15
300	2,27	22,03
600	2,55	19,61

Fonte: De autoria própria, 2023.

Tabela 21 - Pressão de contato. Ensaio lubrificados com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

Tempo [s]	Área de contato [mm ²]	Pressão [MPa]
0	0,001	50000,00
60	1,23	40,65
150	1,62	30,86
300	1,92	26,04
600	2,19	22,83

Fonte: De autoria própria, 2023.

Analisando os dados, novamente nota-se que, para as duas condições de lubrificação, aos 60 segundos, a pressão de contato entre as superfícies já havia ficado menor que 50Mpa, indicando que a transição do regime de lubrificação elastohidrodinâmico para o hidrodinâmico ocorreu antes de 60 segundos.

Considerando o período de 0 a 60 segundos como crescimento linear, o momento aproximado no qual a pressão de contato fica abaixo de 50Mpa e ocorre a transição do regime elastohidrodinâmico para hidrodinâmico no ensaio com óleo 5W40 é cerca de 31 segundos, enquanto o teste com óleo 5W40 + Graffeno® alcançou essa transição em aproximadamente 49 segundos.

Conforme observado por Guimarães (2023), é perceptível que o aumento da carga normal resulta em um maior tempo necessário para a transição do regime de lubrificação elastohidrodinâmico para o hidrodinâmico. Para o teste com óleo 5W40 a carga de 25 N demandou aproximadamente 18 segundos para a transição, enquanto com 50 N, o tempo aumentou para 31 segundos. Já para o ensaio com óleo 5W40 + Graffeno®, a carga de 25 N exigiu cerca de 20 segundos para a transição e ao aumentar para 50 N o tempo necessário se estendeu para 49 segundos.

Esse comportamento ocorre pois o aumento da carga normal resulta em um aumento na pressão exercida entre as superfícies em contato, quer por sua vez gera uma resistência adicional para reduzir a pressão de contato abaixo do limite de transição para o regime hidrodinâmico. Como consequência, é necessário mais energia ou tempo para diminuir a pressão de contato a um nível que permita a transição entre regimes de lubrificação.

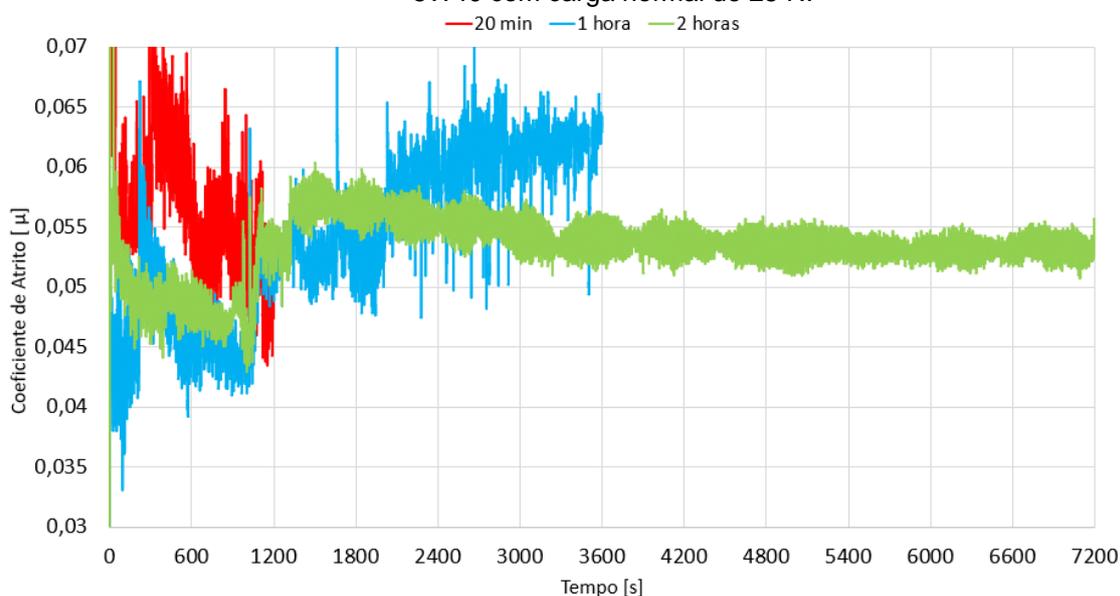
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 COMPARATIVO ENTRE OS ENSAIOS: 20, 60 E 120 MINUTOS

5.1.1 25 N

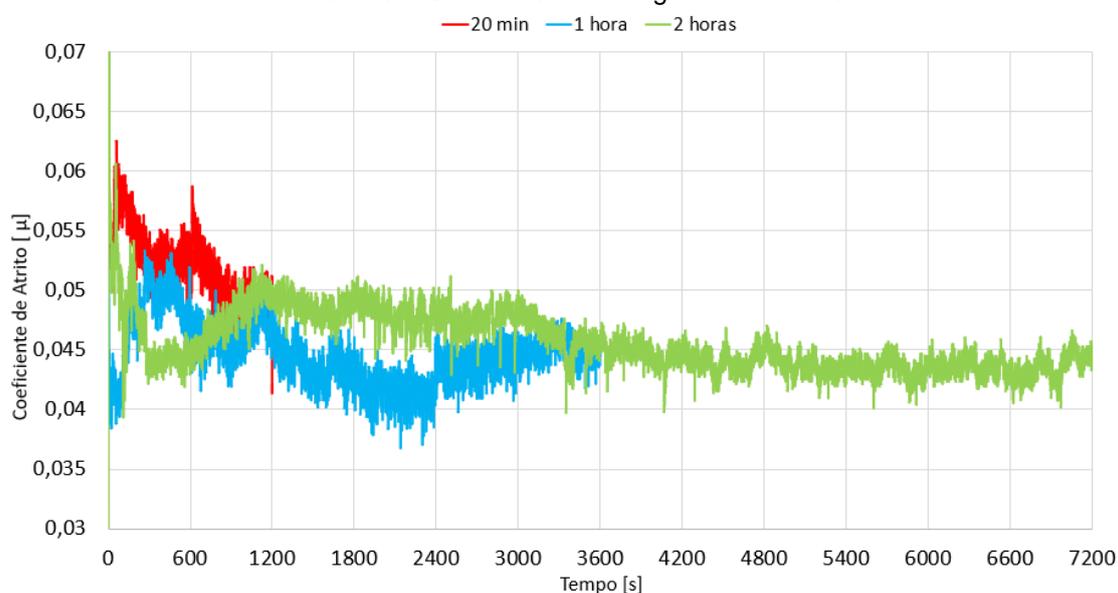
Coefficiente de atrito: Nas figuras 94 e 95 são apresentados os comparativos da variação do coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios de diferentes durações lubrificadas com óleo 5W40 e Graffeno® com carga normal de 25 N.

Figura 94 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 95 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

É possível analisar que, de forma geral, o Graffeno® não se mostrou tão eficaz na diminuição do coeficiente de atrito. Mesmo com uma pequena redução, em média de 0,01, os valores são muito próximos aos obtidos nos ensaios lubrificados somente com óleo 5W40.

Os resultados obtidos por Guimarães (2023), utilizando outro condicionador de metais sob a mesma condição de carga de 25 N, velocidade tangencial de 3,3 m/s e duração do teste de 20 minutos, revelaram uma redução aproximada de 0,1 no coeficiente de atrito. Isso contrasta com os resultados deste estudo e sugere que, em velocidades tangenciais inferiores, o condicionador de metais poderia ter obtido resultados mais expressivos.

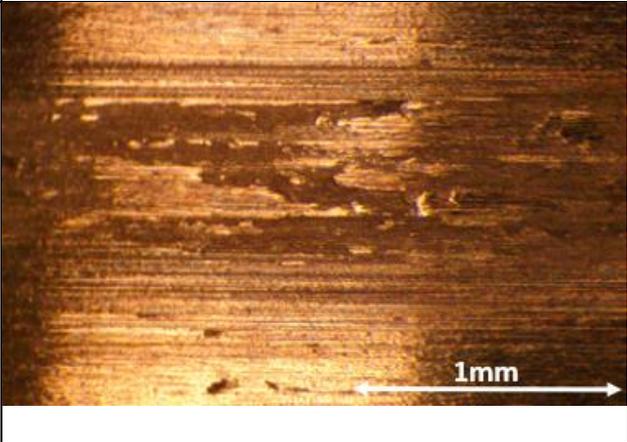
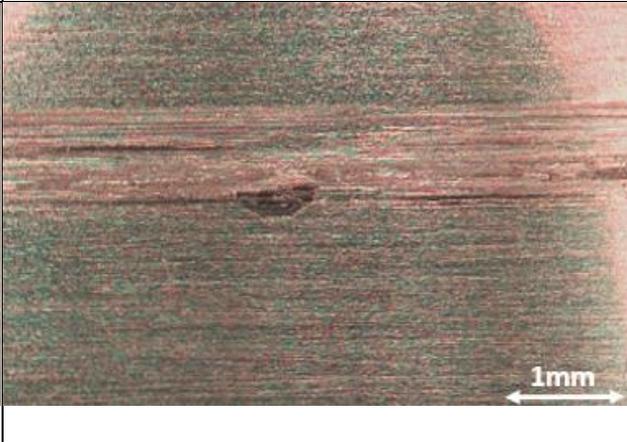
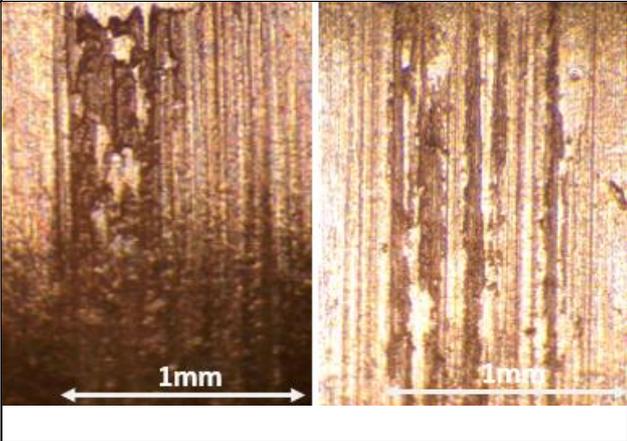
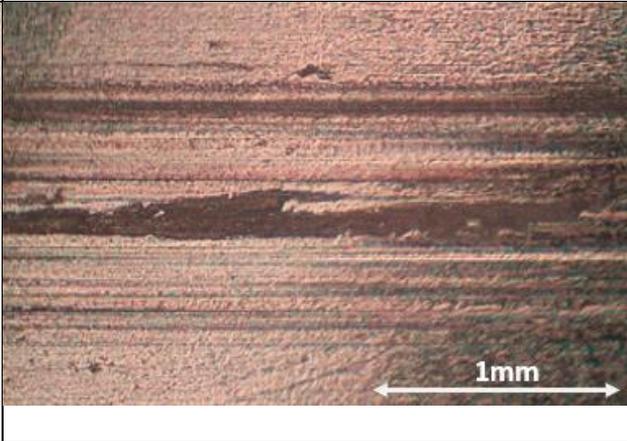
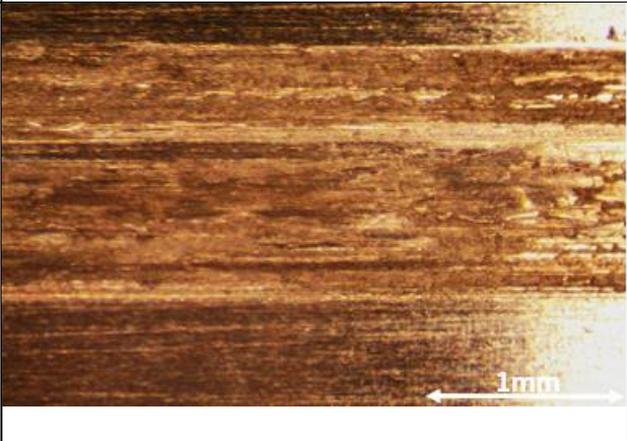
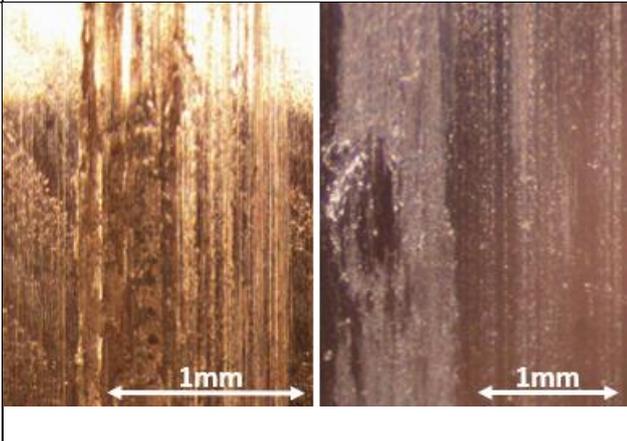
Nos testes conduzidos com Graffeno®, é notável que o coeficiente de atrito exibe, em linhas gerais, oscilações menores, sugerindo que o condicionador de metais, nas condições analisadas, demonstra sua maior eficácia estabilizando o coeficiente de atrito. Este padrão pode ser justificado pelas propriedades do condicionador de metais, que, segundo Mosleh et al. (2009), reduz a rugosidade ao preencher os sulcos e simultaneamente promove um polimento nas superfícies, resultando na redução das asperezas. Além disso, a formação de um tribofilme protetor também contribui para mitigar o efeito abrasivo causado por detritos.

A respeito do tempo de teste, o Graffeno® mantém o coeficiente de atrito estável ao longo de todo o ensaio, suavizando a tendência de subida que tipicamente ocorre em torno dos 1200 segundos. Esse aumento sugere uma alteração nos mecanismos de desgaste predominantes entre as superfícies.

Nesse sentido, o tribofilme protetor, criado na superfície pelo condicionador de metais, pode ter interferido e suavizado a força de atrito no momento dessa transição. É a partir desse ponto que se observa alguma variação nos valores médios do coeficiente de atrito ao comparar as duas condições de lubrificação.

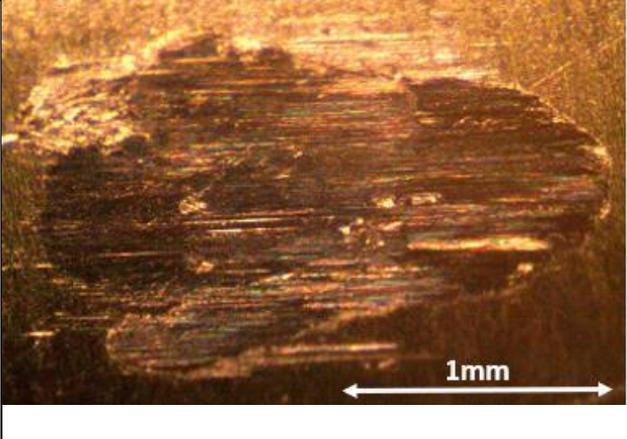
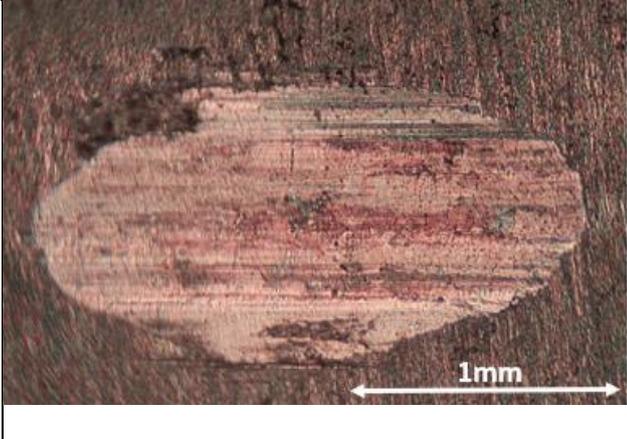
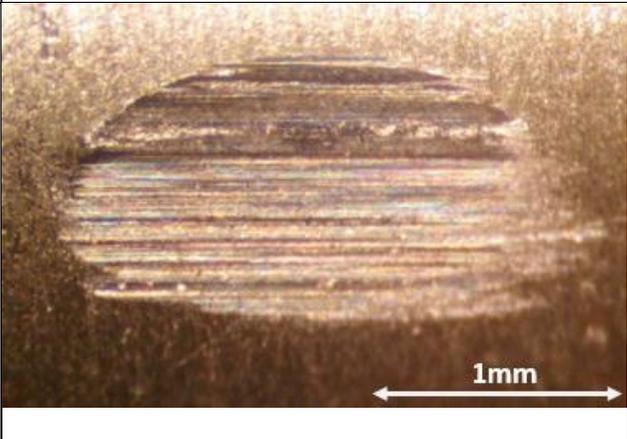
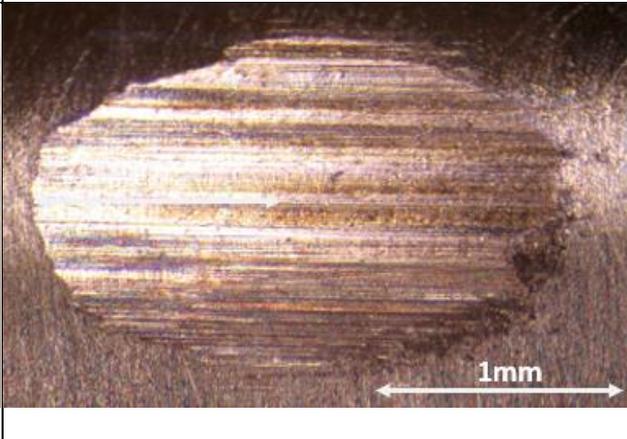
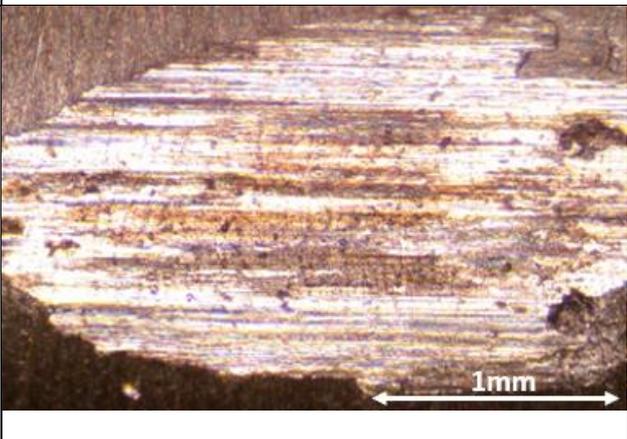
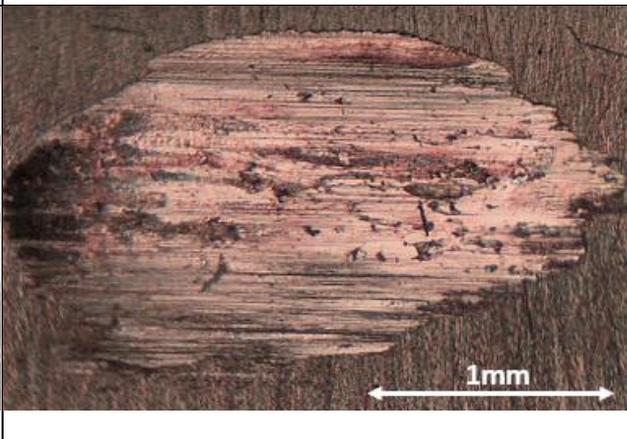
Análise superficial: Nas tabelas 22 e 23 são apresentados os comparativos das superfícies desgastadas dos discos e pinos para os ensaios de diferentes durações lubrificados com óleo 5W40 e Graffeno® com carga normal de 25 N.

Tabela 22 - Comparativo das superfícies desgastadas dos discos. Ensaios com carga normal de 25 N.

Tipo de ensaio / Tempo	Óleo 5W40	Óleo 5W40 + Graffeno®
20 min		
60 minutos		
120 minutos		

Fonte: De autoria própria, 2023.

Tabela 23 - Comparativo das superfícies desgastadas dos pinos. Ensaio com carga normal de 25 N.

Tipo de ensaio / Tempo	Óleo 5W40	Óleo 5W40 + Graffeno®
20 min		
60 minutos		
120 minutos		

Fonte: De autoria própria, 2023.

De maneira geral, o uso do Graffeno® resultou em uma ligeira diminuição no tamanho da trilha de desgaste, retardou o processo de formação de crateras, reduziu a quantidade de sulcos, embora tenha os aprofundado, favoreceu a transferência e adesão de material e diminuiu rebarbas e deformações plásticas. Essa combinação de efeitos resultou em maior uniformidade no processo de desgaste como um todo.

A redução da trilha de desgaste e da quantidade de sulcos pode ser associada à adsorção do condicionador de metais nas superfícies. De acordo com o fabricante, Graffeno (2023), esse processo resulta na formação de películas protetoras sobre o metal, as quais minimizam o contato direto entre as peças. Por outro lado, o aprofundamento dos sulcos pode ser explicado pela possível presença de partículas abrasivas de grafeno no condicionador de metais. Essas partículas, ao se depositarem nas superfícies, podem ter atuado como agentes abrasivos, intensificando o desgaste abrasivo nelas e, conseqüentemente, aprofundando os sulcos.

De acordo com Bordignon (2018), a diminuição de rebarbas e deformações plásticas pode ser resultado da baixa energia de superfície do grafeno, que evita a adesão entre as superfícies metálicas. Além disso, a prevenção da formação de crateras é atribuída à redução do desgaste por fadiga promovida pelo condicionador de metais. Segundo De Oliveira et al. (2014), as propriedades do condicionador de metais, como a formação de uma película protetora, a diminuição do atrito, o preenchimento dos sulcos e a proteção contra corrosão, entre outras características, atuam de maneira conjunta para atenuar o desgaste por fadiga.

Por fim, a transferência e adesão de material ocorrem devido ao efeito do condicionador de metais, que intensifica o desgaste abrasivo e, por conseguinte, promove a remoção de material. Esse material removido, pela dinâmica do ensaio, retorna à região de contato e é depositado na superfície, onde se adere, assim como observado por Pacheco (2021).

Esses dados indicam que o Graffeno®, sob as condições examinadas, atenuou os mecanismos de desgaste, adesão e fadiga, enquanto intensificou a abrasão. Esses efeitos contribuíram para uma maior uniformidade no processo de desgaste, conforme discutido anteriormente neste estudo.

Perda de massa e desgaste: Nas tabelas 24 e 25 são apresentados respectivamente, em função do tipo de ensaio realizado, os valores de perda de massa e taxas de desgaste calculados para os ensaios de diferentes durações lubrificadas com óleo 5W40 e Graffeno® com carga normal de 25 N. Na figura 96 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as perdas de massa.

Tabela 24 - Comparativo da perda de massa entre os ensaios. Ensaios com carga normal de 25 N.

Tipo de ensaio	Massa 20 min [10 ⁻⁴ g]	Massa 60 minutos [10 ⁻⁴ g]	Massa 120 minutos [10 ⁻⁴ g]
Óleo 5W40	1,17 ± 0,06	1,28 ± 0,15	2,02 ± 0,08
Óleo 5W40 + Graffeno®	1,20 ± 0,07	1,25 ± 0,06	2,34 ± 0,10

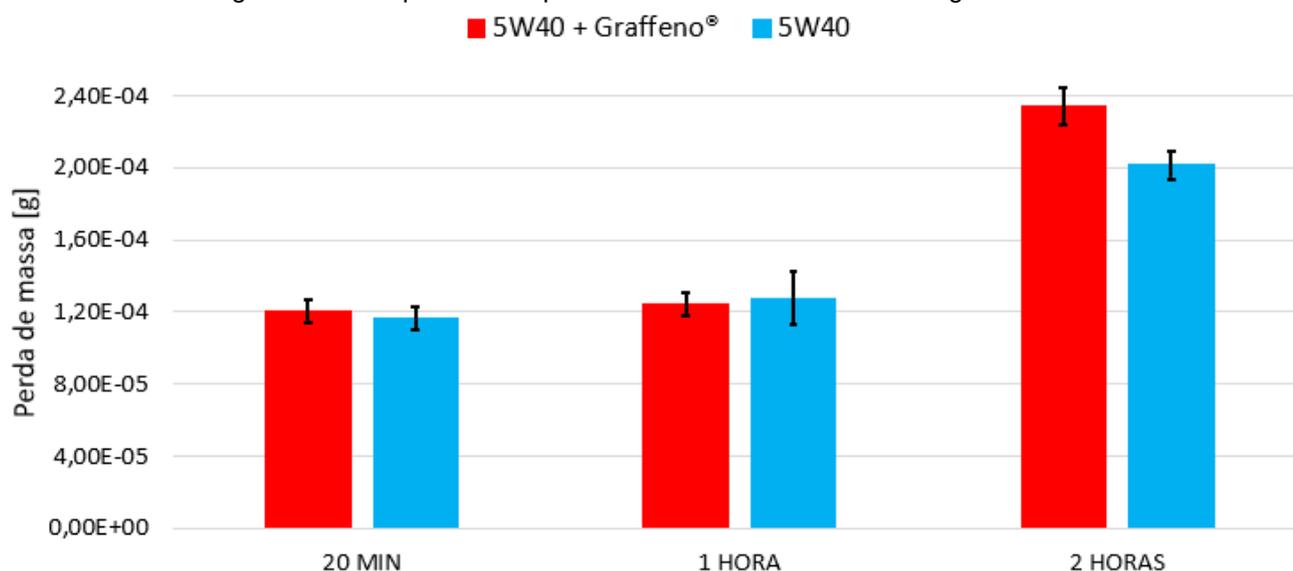
Fonte: De autoria própria, 2023.

Tabela 25 - Comparativo da taxa de desgaste entre os ensaios. Ensaios com carga normal de 25 N.

Tipo de ensaio	T. Desgaste 20 min [10 ⁻⁶ mm ³ /m]	T. Desgaste 60 minutos [10 ⁻⁶ mm ³ /m]	T. Desgaste 120 minutos [10 ⁻⁶ mm ³ /m]
Óleo 5W40	2,18 ± 0,11	0,79 ± 0,09	0,63 ± 0,02
Óleo 5W40 + Graffeno®	2,25 ± 0,13	0,78 ± 0,04	0,73 ± 0,03

Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 96 - Comparativo de perda de massa. Ensaios com carga normal de 25 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Ao contrário do que foi encontrado por Guimarães (2023), nos testes de 20 minutos, o condicionador de metais apresentou maior perda de massa média em comparação ao óleo 5W40 puro. No entanto, a diferença foi tão pequena que é plausível considerar que os dois tiveram desempenho similar. Comportamento similar ocorreu no teste de 60 minutos.

O ensaio de 60 minutos com Graffeno® registrou a menor variação de massa, apresentando apenas cerca de 4% a mais de perda de massa em comparação com o ensaio de 20 minutos, tendo sido essa, a faixa de maior eficácia do Graffeno® para a carga de 25 N, entre 20 minutos e 60 minutos. Em contraste, o ensaio de 60 minutos com óleo 5W40 apresentou aproximadamente 9% a mais de perda de massa em comparação com o ensaio de 20 minutos, nas mesmas condições.

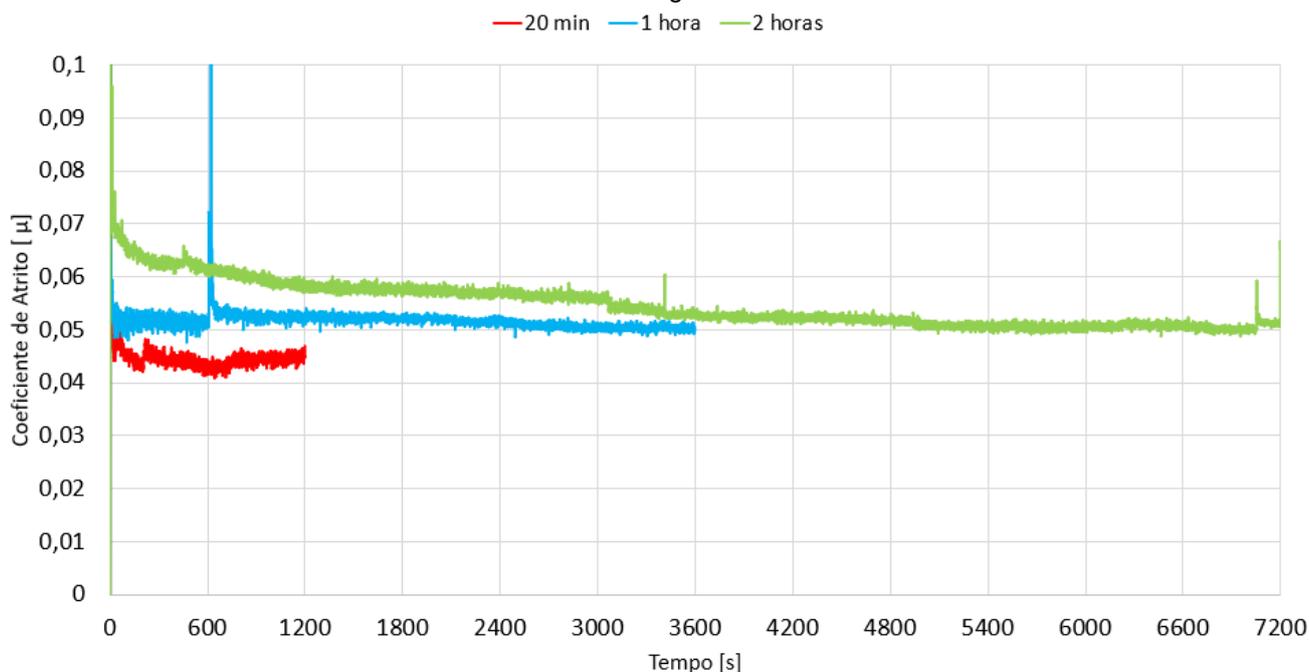
O ensaio de 120 minutos com Graffeno® registrou a maior variação de massa, apresentando aproximadamente 87% a mais de perda de massa em comparação com o ensaio de 60 minutos, tendo sido essa, a faixa de pior atuação do Graffeno® para a carga de 25 N, entre 60 minutos e 120 minutos. Em contraste, o ensaio de 120 minutos com óleo 5W40 apresentou aproximadamente 58% a mais perda de massa em comparação com o ensaio de 60 minutos, nas mesmas condições.

Assim, verificou-se que, considerando as condições de velocidade e carga avaliadas, de maneira geral, o Graffeno® manteve as resistências ao desgaste das superfícies, nos períodos de 20 minutos a 60 minutos, semelhantes. Contudo, entre 60 e 120 minutos, observou-se que o Graffeno® intensificou a perda de massa na superfície, piorando a resistência ao desgaste.

5.1.2 50 N

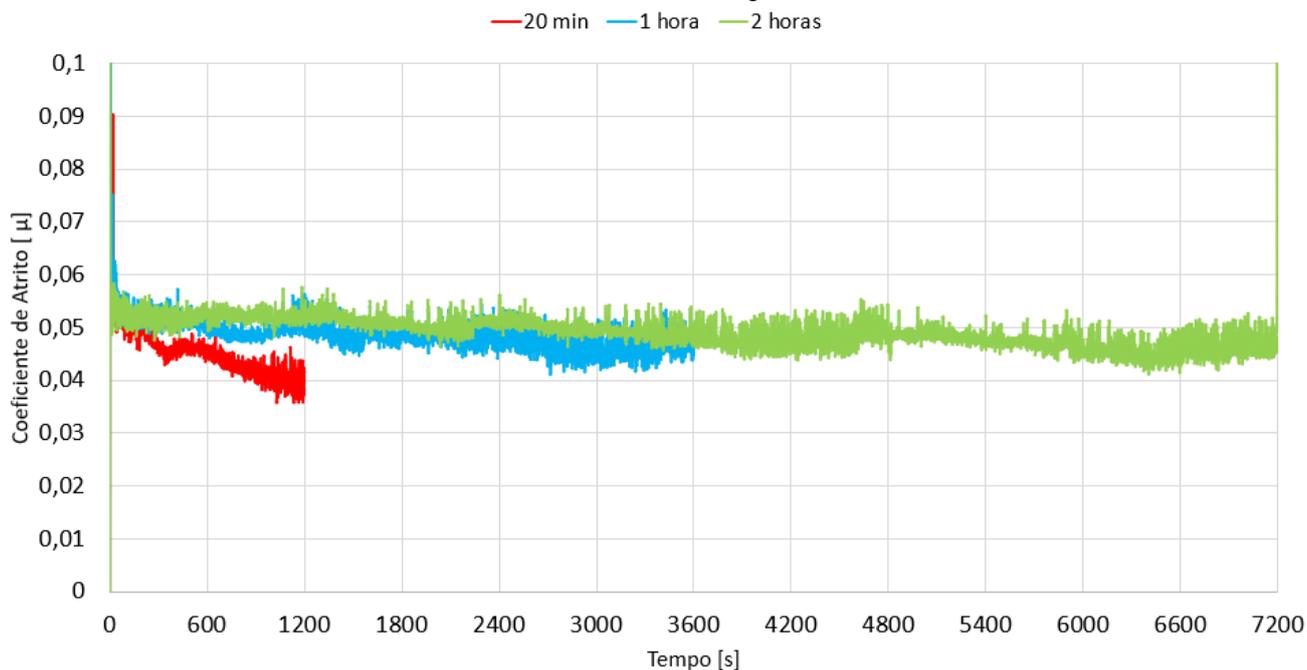
Coefficiente de atrito: Nas figuras 97 e 98 são apresentados os comparativos da variação do coeficiente de atrito em função do tempo para os ensaios de diferentes durações lubrificadas com óleo 5W40 e Graffeno® com carga normal de 50 N.

Figura 97 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio lubrificado com óleo 5W40 com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 98 - Comparativo do coeficiente de atrito em função do tempo. Ensaio lubrificado com óleo 5W40 + Graffeno® com carga normal de 50 N.

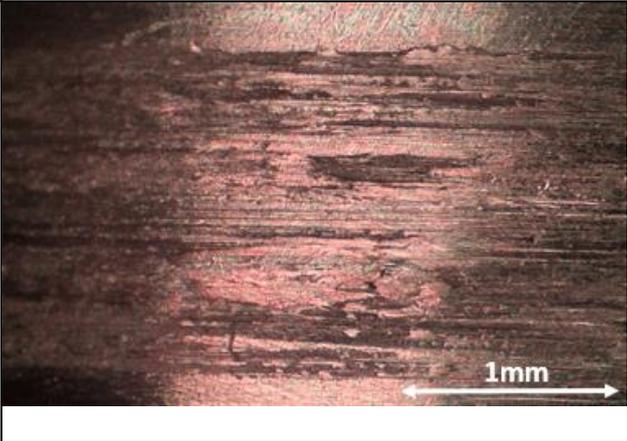
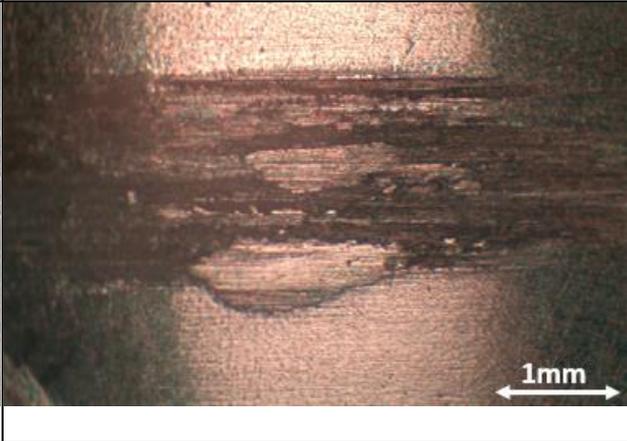
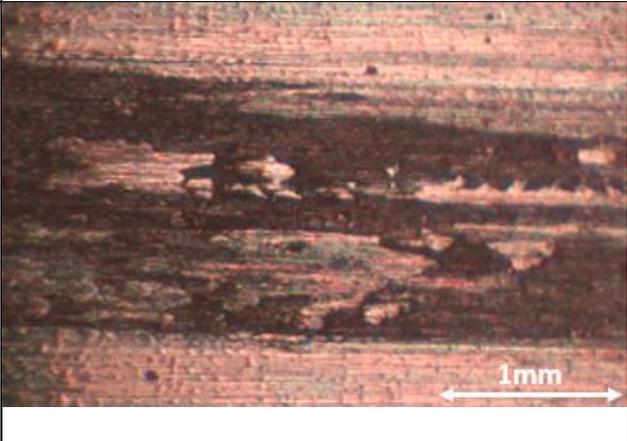
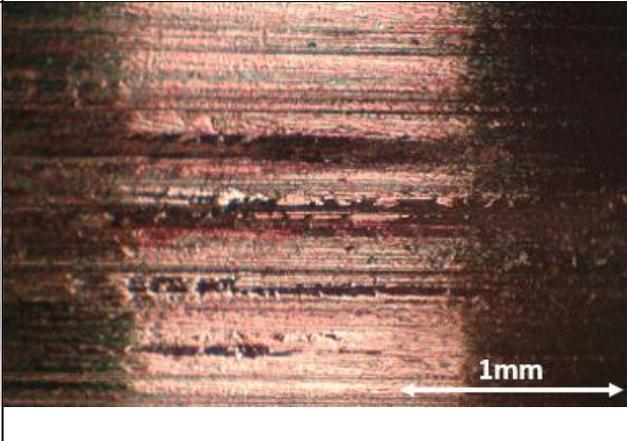
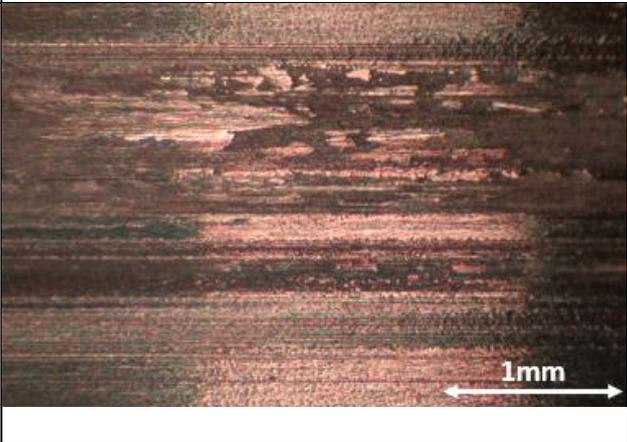
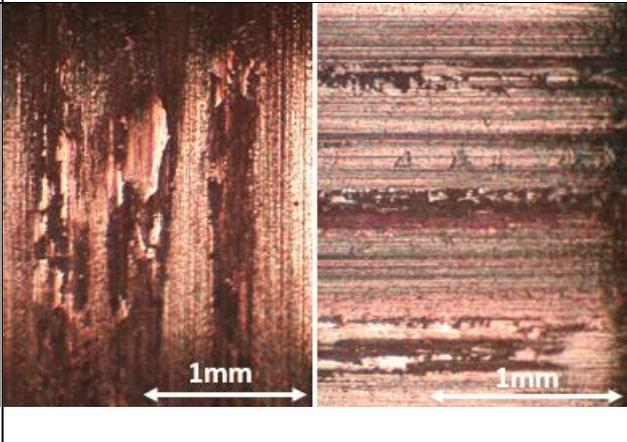


É possível analisar que, de forma geral, assim como nos ensaios com carga normal de 25 N, o Graffeno® não se mostrou tão eficaz na diminuição do coeficiente de atrito. Embora em alguns testes tenha havido variações no coeficiente de atrito em relação ao seu valor inicial, a tendência, ao se estabilizar, é de permanecer em torno do valor de 0,05, tanto para o Graffeno® quanto para o óleo puro.

Nos testes conduzidos com Graffeno®, indo de encontro ao observado nos ensaios com carga normal de 25 N, é notável que o coeficiente de atrito exibe maiores oscilações. Esse comportamento pode ser explicado pela predominância de mecanismos abrasivos durante o teste com carga normal de 50 N, os quais podem ser responsáveis pelo aumento das oscilações. A partir disso é factível deduzir que a interação entre o condicionador de metais e a superfície, bem como sua influência na estabilidade do atrito, variam conforme a carga aplicada, podendo resultar em comportamentos completamente opostos no que diz respeito à estabilidade do coeficiente de atrito. A respeito do tempo de teste, as instabilidades provocadas pelo Graffeno® ocorrem a partir de aproximadamente 1000 segundos.

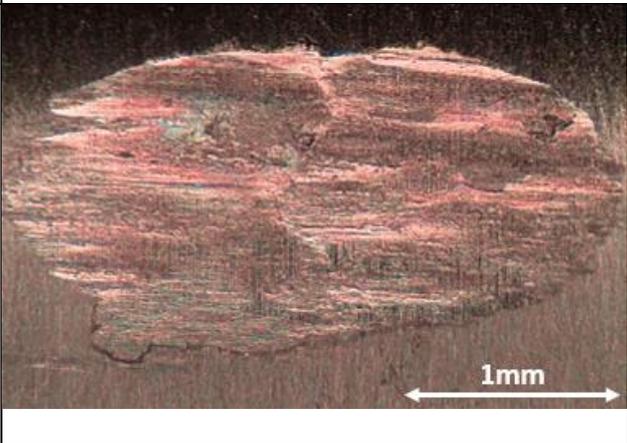
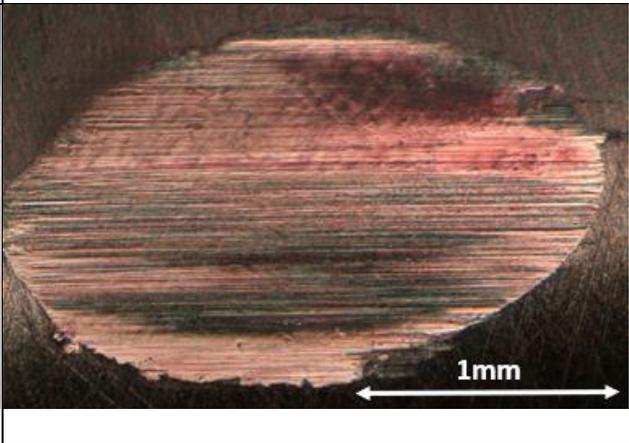
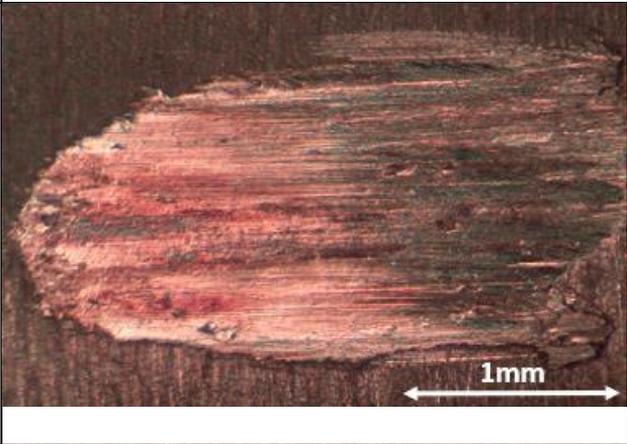
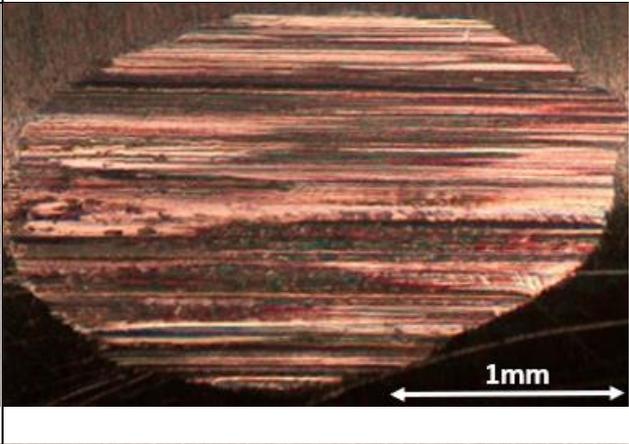
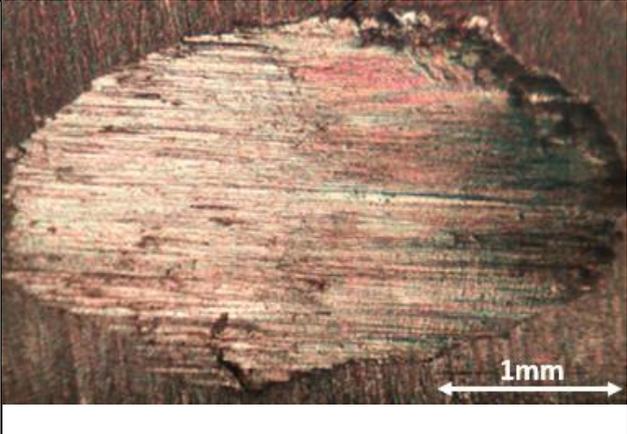
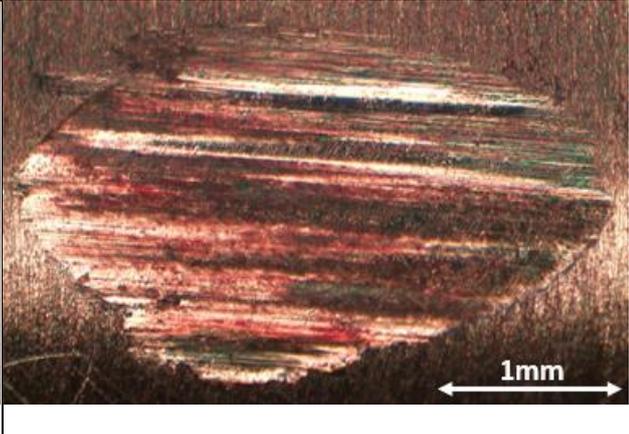
Análise superficial: Nas tabelas 26 e 27 são apresentados os comparativos das superfícies desgastadas dos discos e pinos para os ensaios de diferentes durações lubrificadas com óleo 5W40 e Graffeno® com carga normal de 50 N.

Tabela 26 - Comparativo das superfícies desgastadas dos discos. Ensaio com carga normal de 50 N.

Tipo de ensaio / Tempo	Óleo 5W40	Óleo 5W40 + Graffeno®
20 min		
60 minutos		
120 minutos		

Fonte: De autoria própria, 2023.

Tabela 27 - Comparativo das superfícies desgastadas dos pinos. Ensaio com carga normal de 50 N.

Tipo de ensaio / Tempo	Óleo 5W40	Óleo 5W40 + Graffeno®
20 min		
60 minutos		
120 minutos		

Fonte: De autoria própria, 2023.

Nos discos, o uso do Graffeno® retardou o processo de formação de crateras, potencializou os processos abrasivos através do aprofundamento e uniformização dos sulcos e favoreceu a transferência e adesão de material.

Nos pinos, as propriedades abrasivas do condicionador de metais ficaram bem evidentes ao observar a grande quantidade de sulcos de diversas larguras e

profundidades nos elipsoides. Enquanto na presença do óleo puro destaca-se grande quantidade de rebarbas e deformações plásticas, indicando predominantemente mecanismos de desgaste adesivo. A uniformização dos processos de desgaste pode ser notada através da consistência nos formatos uniformes dos elipsoides, bem como na distribuição homogênea dos sulcos, quando utilizando o Graffeno®.

A respeito do tempo de teste, nota-se que, com a presença do Graffeno®, à medida que o tempo aumenta, os sulcos tornam-se mais largos e profundos, especialmente nos pinos. Por outro lado, utilizando apenas óleo 5W40, à medida que o tempo decorre, há um aumento nas rebarbas, deformações plásticas e crateras.

Em linhas gerais, pode-se dizer que o comportamento das superfícies nos ensaios de 25 N e 50 N foi semelhante. Apesar de algumas disparidades, em essência, a introdução do Graffeno® foi responsável por intensificar os processos abrasivos e reduzir o desgaste por adesão e fadiga cíclica, ao passo que contribuiu para uniformização dos processos de desgaste.

Perda de massa e desgaste: Nas tabelas 28 e 29 são apresentados respectivamente, em função do tipo de ensaio realizado, os valores de perda de massa e taxas de desgaste calculados para os ensaios de diferentes durações lubrificadas com óleo 5W40 e Graffeno® com carga normal de 50 N. Na figura 99 são apresentadas, de forma gráfica e comparativa, as perdas de massa.

Tabela 28 - Comparativo da perda de massa entre os ensaios. Ensaio com carga normal de 50 N.

Tipo de ensaio	Massa 20 min [10 ⁻⁴ g]	Massa 60 minutos [10 ⁻⁴ g]	Massa 120 minutos [10 ⁻⁴ g]
Óleo 5W40	3,21 ± 0,95	4,16 ± 0,49	7,29 ± 0,84
Óleo 5W40 + Graffeno®	2,78 ± 0,15	3,60 ± 0,14	9,27 ± 0,13

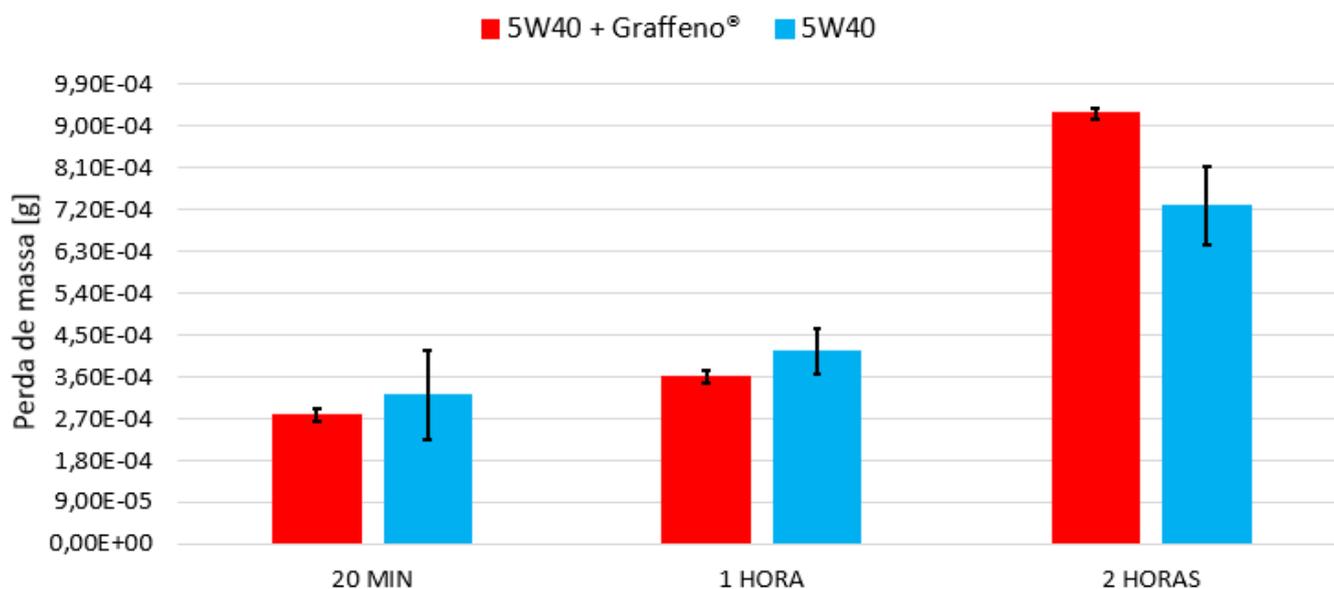
Fonte: De autoria própria, 2023.

Tabela 29 - Comparativo da taxa de desgaste entre os ensaios. Ensaio com carga normal de 50 N.

Tipo de ensaio	T. Desgaste 20 min [10 ⁻⁶ mm ³ /m]	T. Desgaste 60 minutos [10 ⁻⁶ mm ³ /m]	T. Desgaste 120 minutos [10 ⁻⁶ mm ³ /m]
Óleo 5W40	6,00 ± 1,77	2,59 ± 0,30	2,27 ± 0,26
Óleo 5W40 + Graffeno®	5,19 ± 0,29	2,24 ± 0,08	2,89 ± 0,04

Fonte: De autoria própria, 2023.

Figura 99 - Comparativo de perda de massa. Ensaio com carga normal de 50 N.



Fonte: De autoria própria, 2023.

Nos ensaios de 20 minutos e 60 minutos, o Graffeno® apresentou valores médios inferiores de perda de massa e exibiu resultados mais consistentes, apresentando menores variações quando comparado ao óleo 5W40 puro. Esse resultado contrasta com o ocorrido nos ensaios com carga normal de 25 N, nos quais o condicionador de metais e o óleo 5W40 puro obtiveram desempenhos equivalentes em ambas as durações. Isso sugere que, dentro desse intervalo de tempo, o condicionador de metais pode apresentar desempenho superior quando utilizado com carga normal de 50 N.

Os ensaios de 60 minutos com Graffeno® e óleo puro registraram variações de massa semelhantes, aproximadamente 29,5% a mais de perda de massa em comparação com os respectivos ensaios de 20 minutos. Já o ensaio de 120 minutos com Graffeno® registrou a maior variação de massa, apresentando aproximadamente 158% a mais de perda de massa em comparação com o ensaio de 60 minutos, tendo sido essa, a faixa de pior atuação do Graffeno® para a carga de 50 N, entre 60 minutos e 120 minutos, assim como ocorreu com carga normal de 25 N. Todavia, o ensaio de 120 minutos com óleo 5W40 apresentou, aproximadamente, 75% a mais perda de massa em comparação com o ensaio de 60 minutos, nas mesmas condições.

Para as condições de carga e velocidade avaliadas, ao analisar os resultados médios, o Graffeno® melhorou a resistência ao desgaste da superfície no período de 20 minutos a 60 minutos. No entanto, entre 60 minutos e 120 minutos intensificou a perda de massa e obteve o pior resultado de todos os testes realizados.

É Interessante notar que nesse tipo de ensaio a perda de massa nem sempre cresce na mesma proporção da carga normal aplicada. Por exemplo, o ensaio de 20 minutos com Graffeno® e carga normal de 25 N apresentou perda de massa de $1,20 \times 10^{-4}$ g. No entanto, ao aumentar a carga para 50 N, a perda de massa subiu para $2,78 \times 10^{-4}$ g, representando o dobro da carga normal, mas resultando em mais do que o dobro da perda de massa. Esse padrão se repetiu em todos os ensaios realizados com cargas de 25 N e 50 N, sendo notável que quanto maior a duração do ensaio, maior a discrepância observada.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados neste trabalho forneceram informações valiosas a respeito das características, interações e desempenho do condicionador de metais Graffeno® em comparação com o óleo 5W40 convencional, em condições específicas de carga e duração dos testes.

Em relação ao coeficiente de atrito, embora o Graffeno® tenha proporcionado alguma estabilidade e redução em certos momentos, não se observou uma diminuição significativa em comparação ao óleo 5W40 puro. As oscilações notadas, com cargas normais de 50 N, indicam que as interações do condicionador de metais com o óleo lubrificante e sua relação com a superfície são complexas e variam de acordo com a carga normal aplicada e duração do ensaio.

Quanto maior foi a duração do ensaio, diversos e mais severos foram os mecanismos de desgaste experienciados. Diante disso, sugere-se que o Graffeno® desempenha um papel na redução do desgaste por adesão e fadiga, resultando no retardamento da formação de crateras. Simultaneamente, intensifica os processos abrasivos, ao passo que contribui para a uniformização dos processos de desgaste.

Por meio dos dados de perda de massa e taxas de desgaste, foi possível observar que, em testes de curta duração, o Graffeno® apresenta vantagens, exibindo menores perdas de massa e taxas de desgaste mais consistentes em comparação ao óleo 5W40. No entanto, em ensaios prolongados, foi notável um aumento significativo na perda de massa, indicando uma possível redução no desempenho do Graffeno®.

O desgaste não acontece de forma linear ao longo do tempo. A remoção de material é maior nos instantes iniciais do ensaio, de forma que quanto maior a área de contato, menor é a taxa de arrancamento de material.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência da concentração do condicionador de metais nos resultados de desgaste.
- Utilizar cargas normais maiores, a fim de estudar cargas críticas e a transição de desgaste suave para desgaste severo.
- Analisar os detritos depositados no óleo ao fim dos ensaios.

BIBLIOGRAFIA

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

ASTM INTERNACIONAL. ASTM A576 : Standard specification for steel bars, carbon, hot-wrought, special quality. West Conshohocken, 2017.

BALDO, Lucas Ferreira. Estudo sobre Mecânica do Contato no Desgaste por Deslizamento Alternado em um Contato Cilindro Plano. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

BAYER, R. G. Mechanical Wear Fundamentals and Testing. 2th Edition, Revised and Expanded. Armcel, Dekker, Inc, 2004.

BINDER, C. Desenvolvimento de novos tipos de aços sinterizados autolubrificantes a seco com elevada resistência mecânica aliada ao baixo coeficiente de atrito via moldagem de pós por injeção. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

Blog Sacchelli. A importância do aço na indústria automotiva. 2023. <<https://sacchelli.com.br/a-importancia-do-aço-na-industria-automotiva/>>. Online, acesso em 05 de setembro de 2023.

BORDIGNON, R. Desempenho tribológico de grafeno funcionalizado como aditivo em óleo lubrificante de baixa viscosidade. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

CALLISTER, W. D. RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais. 10th Edition, LTC Ltda, 2020.

CLEMENTE, C. M. CUEVA, E. G. Influence of lubricant on sliding wear of AISI 304. Faculdade Gama - FGA, Universidade de Brasília - UnB, 2017.

Coppermetal. Tudo sobre o aço SAE 1045. 2023. <<https://www.coppermetal.com.br/blog/aço-carbono/aço-sae-1045/>>. Online, acesso em 05 de setembro de 2023.

Gelson Luz. Aço SAE 1045, propriedades mecânicas e composição química. 2017. . Online, acesso em 31 de maio de 2023.

GRAFFENO®. Disponível em:< <https://www.Graffeno.com.br/site/>>. Acesso em: 20 de julho de 2023.

GUERRA, Gustavo Andrade; LAGE, Isaac Nelson Carvalho; PROCÓPIO, Keiler coelho Lage. Usinagem do aço 1045 no torno convencional. Brasília, 2023.

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) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

- HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of engineering materials. 1. Edition. Elsevier Limited, 1992.
- KATO, K. Adachi, K. "Wear Mechanisms", MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22, 2001.
- Ludema, K.C. Friction, Wear, Lubrication A textbook in Tribology. 2. Edition. CRC Press, 2019.
- Lupeng Wu, Le Gu, Ranran Jian, Lubrication mechanism of graphene nanoplates as oil additives for ceramics/steel sliding components, Ceramics International, Volume 47, Issue 12, 2021.
- Marlinda, A.R.; Thien, G.S.H.; Shahid, M.; Ling, T.Y.; Hashem, A.; Chan, K.-Y.; Johan, M.R. Graphene as a Lubricant Additive for Reducing Friction and Wear in Its Liquid-Based Form. Lubricants 2023.
- Mezghani, I., Demirci, I., Yousfi, M. e Mansori, E.2013. "Running-in wear modeling honed surface for combustion engine cylinder liners". Wear 302. pp. 1360–1369
- MOSLEH, M. et al. Modification of sheet metal forming fluids with dispersed nanoparticles for improved lubrication. Wear, v. 267, n. 5–8, p. 1220–1225, jun. 2009.
- Noria. Lubrication Regimes Explained. 2017. . Online, acesso em 20 de junho de 2023. Citado na página 28.
- Oliveira, Fernando Santos de. Avaliação do desempenho de machos tratados com um condicionador metálico no processo de rosqueamento interno. 109 f. Dissertação(Programa de Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2015.
- PACHECO, A. P. Estudo do atrito e desgaste em diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino-disco de AÇO 1045. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- PIERSON, H. O. Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications. 1st ed. William Andrew Publishing, 1993.
- RADI et al. "Tribologia, Conceitos e Aplicações", 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós Graduação do ITA – XIII ENCITA. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2010.
- Rijeza metalurgia. O que é resistência ao desgaste. 2023. < <https://rijeza.com.br/blog/o-que-e-resistencia-ao-desgaste/>>. Online, acesso em 05 de setembro de 2023.
- SAMPAIO, M. A. B. Mecânica do contato com o método dos elementos de contorno para modelagem de máquinas tuteladoras. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paula. São Paulo, 2009.

SERBINO, Edison Marcelo. Um estudo dos mecanismos de desgaste em discos de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

Sembariski, Paulo Ricardo Borgmann. Influência do tipo de lubrificação no desgaste por deslizamento de metais. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Instituto Federal de Santa Catarina, 2018.

SHIGLEY, J. E.; Mischke, C. R.; Budynas, R. G.: Projeto de Engenharia Mecânica. 7ª Edição. Bookman. 2012.

STACHOWIAK, G. BATCHELOR, A. W. Engineering Tribology. 3rd Edition. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

WANG, Xinbo et al. Experimental research on tribological properties of liquid phase exfoliated graphene as an additive in SAE 10W-30 lubricating oil. Tribology International, [s.l.], v. 135, p.29-37, jul. 2019.

YAZAWA, S.; MINAMI, I.; PRAKASH, B. Reducing Friction and Wear of Tribological Systems through Hybrid Tribofilm Consisting of Coating and Lubricants. Lubricants, v. 2, n. 2, p. 90–112, 2014.