CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GABRIELA EVELYN DUARTE FIGUEIRA

AVALIAÇÃO DE LUBRIFICANTE A BASE DE GRAFENO NO ENSAIO PINO SOBRE DISCO EM AÇO ABNT 1045

BELO HORIZONTE

2023

GABRIELA EVELYN DUARTE FIGUEIRA

AVALIAÇÃO DE LUBRIFICANTE A BASE DE GRAFENO NO ENSAIO PINO SOBRE DISCO EM AÇO ABNT 1045

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2023

GABRIELA EVELYN DUARTE FIGUEIRA

AVALIAÇÃO DE LUBRIFICANTE A BASE DE GRAFENO NO ENSAIO PINO SOBRE DISCO EM AÇO ABNT 1045

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos (Orientador)

Prof. Me. Anderson Júnior dos Santos

Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me permitido chegar até aqui e a toda a minha família, em especial aos meus pais por todo apoio e incentivo durante esse processo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos, que foi essencial em todas as fases desse projeto, desde a elaboração do tema até toda a execução e discussão.

Ao Prof. Me. Anderson Júnior dos Santos por ter me auxiliado nos ensaios realizados na UFMG e por toda a disponibilidade em sanar as dúvidas que surgiram ao longo das análises.

Ao Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara por ter cedido os equipamentos dos laboratórios da UFMG para a realização dos testes.

A Prof. Dr. Aline Silva Magalhães por todos os ensinamentos que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho tem como finalidade avaliar a resposta do lubrificante a base de grafeno na redução do coeficiente de atrito e volume desgastado do aço ABNT 1045. Para isso 12 corpos de prova de aço ABNT 1045 confeccionados no formato de discos foram faceados e retificados, os pinos utilizados tinham o formato de esfera. Uma amostra do material utilizado para a confecção dos discos foi submetido a ataque químico com Nital 3% e foi observada no microscópio óptico para obtenção da microestrutura. No ensaio pino sobre disco a carga normal foi variada entre 5N, 10N e 25N, para cada carga normal houve um teste a seco e um com presença de lubrificante, todas as configurações foram replicadas. Os corpos de prova testados a seco com carga normal de 5N, 10N e 25N e o lubrificado com carga normal de 25N passaram pela perfilometria de contato para quantificar volume perdido de material e rugosidade. Por fim as trilhas de desgaste foram observadas no microscópio óptico para a identificação do mecanismo de desgaste. Por meio da microestrutura identificou-se ferrita e perlita, o esperado para aço ABNT 1045. Por meio dos ensaios foi possível concluir que a presença do lubrificante a base de grafeno reduziu o coeficiente de atrito e a profundidade de desgaste, se comparado ao teste a seco, em todas as situações testadas, no entanto ambas as curvas do teste pino sobre disco apresentaram alta dispersão devido a sensibilidade do sensor utilizado. A presença do lubrificante a base de grafeno no corpo de prova submetido a carga normal de 25N reduziu a profundidade de desgaste em aproximadamente 88% e o volume de material removido em aproximadamente 94%. Além disso, maiores valores de rugosidade causaram maiores profundidades de desgaste e volume de material removido e possivelmente os mecanismos de desgaste atuantes foram a abrasão e a adesão.

Palavras-chave: Atrito, Desgaste, Grafeno, Lubrificante.

ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate the response of graphene-based lubricant in reducing the coefficient of friction and worn volume of ABNT 1045 steel. For this purpose, 12 ABNT 1045 steel test specimens in the form of discs were faced and ground, and the pins used were in the shape of spheres. A sample of the material used for the fabrication of the discs underwent chemical etching with 3% Nital and was observed under an optical microscope to obtain the microstructure. In the pin-on-disc test, the load was varied between 5N, 10N, and 25N. For each load, there was a dry test and a test with the presence of lubricant, and all configurations were replicated. The test specimens tested under dry conditions with loads of 5N, 10N, and 25N, and the lubricated specimen with a load of 25N, underwent contact profilometry to quantify the lost volume of material and surface roughness. Finally, the wear tracks were observed under an optical microscope to identify the wear mechanism. The microstructure analysis revealed the presence of ferrite and pearlite, confirming that it was ABNT 1045 steel. Through the tests, it was possible to conclude that the presence of graphene-based lubricant reduced the coefficient of friction and wear depth in all tested situations. However, all curves of the pin-on-disc test exhibited high dispersion due to sensor instabilities. The presence of graphene-based lubricant in the test specimen subjected to a load of 25N reduced the wear depth by approximately 88% and the lost material volume by approximately 94%. Additionally, high values of surface roughness caused greater wear depths and lost material volume, and possibly the only active wear mechanism in all tests was abrasion.

Keywords: Friction, Wear, Graphene, Lubricant.

SUMÁRIO

1. INT	RODUÇÃO	11
2. OBJ	ETIVOS	
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3. REV	/ISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Nanomateriais	14
3.2	Grafeno	16
3.3	Aplicações gerais e tribológicas do grafeno	17
3.3.	.1 Lubrificante a base de grafeno	
3.3.	.2 Produtos concorrentes	
3.4	Aço 1045	22
3.5	Rugosidade superficial de contato	22
3.6	Perfilometria por contato	25
3.7	Atrito a seco e atrito fluido	26
3.8	Mecanismos de desgaste	26
3.9	Ensaios tribológicos	27
2 4 0	Mieropopio	
3.10		
4. ME	rodologia	
3.10 4. MET 4.1	Planejamento experimental	
4. MET 4.1 4.2	Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova	
4. MET 4.1 4.2 4.3	Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria	
4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica Discussão dos resultados	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 5. RES	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica Discussão dos resultados	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 5. RES 5.1	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica Discussão dos resultados ULTADOS E DISCUSSÃO Análise Metalográfica	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 5. RES 5.1 5.2	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica Discussão dos resultados ULTADOS E DISCUSSÃO Análise Metalográfica Ensaio de Desgaste	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 5. RES 5.1 5.2 5.2.1	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica Discussão dos resultados ULTADOS E DISCUSSÃO Análise Metalográfica Ensaio de Desgaste	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 5. RES 5.1 5.2 5.2.1 5.3	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica Discussão dos resultados ULTADOS E DISCUSSÃO Análise Metalográfica Ensaio de Desgaste Comparação entre os ensaios realizados	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 5. RES 5.1 5.2 5.2.1 5.3 5.3.1	FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica Discussão dos resultados ULTADOS E DISCUSSÃO Análise Metalográfica Ensaio de Desgaste Comparação entre os ensaios realizados Comparação entre os ensaios realizados	
4. MET 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 5. RES 5.1 5.2 5.2.1 5.2 5.2.1 5.3 5.3.1 5.4	Inicioscopia FODOLOGIA Planejamento experimental Preparação dos corpos de prova Análise metalográfica Ensaio de desgaste Ensaio de perfilometria Microscopia Óptica Discussão dos resultados ULTADOS E DISCUSSÃO Análise Metalográfica Ensaio de Desgaste Comparação entre os ensaios realizados Ensaio de perfilometria Comparação entre os ensaios realizados Microscopia Óptica	

REFERÊNCIAS	
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Relação entre tamanho, área superficial e percentual de átomos na superfície de	
um nanomaterial1	.4
Figura 3.2 - Nanomateriais de carbono1	5
Figura 3.3 - Relação entre a qualidade do processo e o custo do grafeno1	7
Figura 3.4 - Resultado da taxa de desgaste/10^(-6)mm * N^(-1) m^(-1) do disco em função d	a
concentração de ODA-RGO1	.9
Figura 3.5 - Resultado do coeficiente de atrito em função do tempo de deslizamento2	20
Figura 3.6 - Comparativo da perda de massa para ensaio a seco e lubrificado de diferentes	
formas com carga de 10 N2	21
Figura 3.7 - Comparativo do coeficiente de atrito para ensaio a seco e lubrificado de	
diferentes formas com carga de 10 N2	22
Figura 3.8 - Comparativo do coeficiente de atrito em função da rugosidade superficial2	23
Figura 3.9 - Comprimentos para avaliação da rugosidade2	24
Figura 3.10 - Componentes de um perfilômetro2	25
Figura 3.11 - Tipos de desgaste abrasivo2	27
Figura 3.12 - Geometrias do ensaio de desgaste2	28
Figura 4.1 - Fluxograma dos processos de metodologia	60
Figura 4.2 - Tribômetro Microtest modelo MT/60/NI3	2
Figura 4.3- Perfilômetro 3D HOMMELWERKE modelo T80003	3
Figura 5.1 - Microestrutura Aço ABNT 1045: Figura a) Ampliação de 200x; Figura l	b)
Ampliação de 400x3	4
Figura 5.2 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 5N a seco; Figura b)	_
Réplica do ensaio com carga de 5N a seco <u>.</u> 3	5
Figura 5.3 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 5N lubrificado; Figura	ra
b) – Réplica do ensaio com carga de 5N lubrificado <u>.</u> 3	6
Figura 5.4 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 10N a seco; Figura l	0)
– Réplica do ensaio com carga de 10N a seco3	8
Figura 5.5 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 10N lubrificado	0;
Figura b) – Réplica do ensaio com carga de 10N lubrificado3	9
Figura 5.6 - Ensaio Pino Sobre disco – Ensaio com carga de 25N a seco. 4	0
Figura 5.7 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 25N lubrificado	0;
Figura b) – Réplica do ensaio com carga de 25N lubrificado4	-2

Figura 5.8 - Perfil de ondulação da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de
5N sem lubrificação: Figura a) – Corte inferior; Figura b) x Corte mediano; Figura c) – Corte
superior45
Figura 5.9 - Perfil de ondulação da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de
10N sem lubrificação: Figura a) – Corte inferior; Figura b) x Corte mediano; Figura c) – Corte
superior47
Figura 5.10 - Perfil de ondulação da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga
de 25N sem lubrificação: Figura a) - Corte inferior; Figura b) x Corte mediano; Figura c) -
Corte superior48
Figura 5.11 - Perfil de ondulação da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga
de 25N com lubrificação: Figura a) - Corte inferior; Figura b) x Corte mediano; Figura c) -
Corte superior49
Figura 5.12 - Vista tridimensional no Ensaio de Perfilometria: Figura a) - Corpo de prova
submetido a carga de 5N sem lubrificação; Figura b) Corpo de prova submetido a carga de
10N sem lubrificação; Figura c) Corpo de prova submetido a carga de 25N sem lubrificação;
Figura d) Corpo de prova submetido a carga de 25N com lubrificação51
Figura 5.13 - Esquema de montagem da Perfilometria. 52
Figura 5.14 Microscopia Óptica com ampliação de 100x da trilha de desgaste do corpo de
prova submetido a carga de 10N sem lubrificação53
Figura 5.15 - Microscopia Óptica da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga
de 25N sem lubrificação54
Figura 5.16: Microscopia Óptica com ampliação de 200 x da trilha de desgaste do corpo de
prova submetido a carga de 25N com lubrificação55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planejamento experimental. 30
Tabela 2 - Composição química dos aços 1045 e 5210031
Tabela 3 - Parâmetros de Rugosidade de corpo de prova submetido a carga de 5 N sem
lubrificação46
Tabela 4 - Parâmetros de Rugosidade de corpo de prova submetido a carga de 10 N sem
lubrificação47
Tabela 5 - Parâmetros de Rugosidade de corpo de prova submetido a carga de 25 N sem
lubrificação49
Tabela 6 - Parâmetros de Rugosidade de corpo de prova submetido a carga de 25 N com
lubrificação50
Tabela 7 – Média das larguras, profundidades de desgaste e volume de material perdido para
cada condição ensaiada50
Tabela 8 – Médias dos Parâmetros de Rugosidade para cada condição ensaiada

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Média do coeficiente de atrito.	43
Quadro 2 - Média da profundidade de desgaste	44

LISTA DE SIGLAS

- C Carbono
- Cr Cromo
- HB Dureza Brinell
- le Comprimento de amostragem
- lm Comprimento útil
- In Comprimento para parada do apalpador
- lt Comprimento total
- lv Comprimento para atingir a velocidade do apalpador
- Mn Manganês
- Mo Molibdênio
- Ni Níquel
- ODA Octadecilamina
- P Fósforo
- R_a Desvio aritmético médio
- Rmax Rugosidade máxima
- R_p Altura máxima do pico
- R_{pm} Altura média do pico
- R_q Desvio médio quadrático
- R_t Rugosidade total
- R_v Altura máxima do vale
- R_{vm} Altura média do vale
- R_z Altura média entre pico e vale
- RGO Óxido de grafeno reduzido
- S Enxofre
- Si Silício
- SiC Carbeto de Silício
- UFMG Universidade Federal de Minas Gerais
- 5w40 Óleo sintético 5w40 API SN da marca Petronas

1. INTRODUÇÃO

O grafeno é uma forma alotrópica do carbono em que os átomos se organizam em uma monocamada que forma uma rede hexagonal plana e bidimensional. Este material foi citado pela primeira vez no trabalho de P.R.Wallace em 1947, como uma camada hexagonal da grafite. Este estudo conseguiu prever o comportamento das dispersões de energia e a estrutura eletrônica do material, desde então outros estudos surgiram com o objetivo de investigar as propriedades do grafeno (NETO, 2017).

Em 2004 os pesquisadores Novoselov e Geim conseguiram, pela primeira vez, obter películas monoatômicas livres e estáveis de grafeno por meio de esfoliação mecânica de uma estrutura de grafite. Foi a partir desse estudo que se comprovou a existência de cristais bidimensionais livres em condições ambientes, sendo o grafeno, o primeiro cristal conhecido (NETO, 2017).

A partir desse estudo, novos trabalhos surgiram com o objetivo de descobrir outros cristais bidimensionais livres em condições ambientes. Além disso, propriedades do grafeno como condutividade elétrica, condutividade térmica e resistência à ruptura fizeram com que houvesse grande interesse da indústria para que o material fosse utilizado em aplicações tecnológicas (NETO, 2017).

Outra aplicação do grafeno que vem sendo estudada é como aditivo em óleos lubrificantes. Os lubrificantes têm como principais objetivos a redução do desgaste em peças que ocorre devido ao atrito, o resfriamento de sistemas, a proteção contra a corrosão e a limpeza. As principais aplicações que necessitam de lubrificação envolvem contato entre metais na indústria e no meio automotivo (MATOS, 2011).

Seja na indústria ou no meio automotivo, é importante que o maquinário possua a maior eficiência possível com o menor gasto energético, isso porque o gasto de energia gera prejuízos ao meio ambiente e se torna um fator desfavorável economicamente já que maior quantidade de combustível será necessária. Por isso a utilização de lubrificantes se torna necessária, já que as maiores perdas de energia em um motor ocorrem devido ao atrito entre o pistão e o cilindro (ELLWANGER, 2021).

Além de influenciar diretamente na perda de energia por atrito entre componentes, os lubrificantes também são importantes para reduzir o desgaste causado pelo contato entre superfícies, para isso pesquisas continuadas buscam desenvolver lubrificantes com aditivos cada vez mais eficazes, a exemplo o grafeno.

O princípio ativo do grafeno é maleável, flexível e impermeável. Quando este material se encontra na forma de nanopartículas, ele se adere perfeitamente aos metais formando uma película extremamente fina e hiper resistente. Conforme informações de fabricantes de produtos à base de grafeno a redução do desgaste pode chegar a 20% se comparada aos óleos lubrificantes convencionais, além de promover uma proteção permanente da superfície, redução do coeficiente de atrito e maior vida útil dos componentes.

O grafeno vem sendo explorado em aplicações tribológicas, porém não é grande o número de pesquisas científicas que comprovem a eficácia prometida pelos fabricantes presentes no mercado. Portanto, o presente trabalho tem por finalidade analisar e comparar por meio de ensaios tribológicos, a proteção da superfície e passivação do desgaste deste produto a base de grafeno, mesmo que em escalas de esforços menos severas comparado às aplicações sugeridas no mercado.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a resposta do lubrificante a base de grafeno na redução do coeficiente de atrito e volume desgastado entre o aço ABNT 1045 e esfera de aço SAE 52100.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaio de desgaste por contato pino sobre disco a seco e lubrificado com lubrificante a base de grafeno no aço ABNT 1045 para compreender o comportamento do coeficiente de atrito e profundidade de desgaste;
- Avaliar a perda de volume do disco de aço ABNT 1045 por meio da perfilometria de contato;
- Comparar coeficiente de atrito a seco e lubrificado correlacionando com a profundidade de desgaste;
- Identificar o mecanismo de desgaste utilizando Microscopia Óptica;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Nanomateriais

Nanomaterial é uma classe de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos, que possuem, no mínimo, uma dimensão na faixa de 1 a 100 nanômetros (BAIG et al., 2021). Diversos conceitos são importantes nessa ciência, como a dimensionalidade. Materiais 3D, 2D e 1D possuem, respectivamente, três, duas e uma dimensão superior a 100 nm, já o material 0D possui todas as dimensões inferiores a 100 nm e é denominado nanopartícula (FECHINE, 2020).

Os nanomateriais vêm sendo estudados e muito utilizados nos últimos anos devido às suas propriedades como resistência mecânica e condutividade térmica e elétrica. Um dos fatores que influenciam essas propriedades é a área superficial elevada, se comparada a outros materiais que não se encontram em escala nanométrica. Essa relação pode ser entendida pela Figura 3.1, que mostra que com a diminuição do tamanho, a área superficial aumenta, o que faz com que mais átomos estejam disponíveis na superfície, aumentando a reatividade (FECHINE, 2020).

Figura 3.1 - Relação entre tamanho, área superficial e percentual de átomos na superfície de um nanomaterial.



Fonte: (FECHINE, 2020).

Alguns materiais possuem propriedades quando estão em escala nanométrica que não são relevantes quando todas as suas dimensões ultrapassam 100 nm. São exemplos: magnetismo, efeitos quânticos, elevada condutividade térmica e elétrica, atividade antimicrobiana e boas propriedades mecânicas (BAIG et al., 2021).

Uma classe muito importante de nanomateriais são os baseados em carbono. Os principais deles são o fulereno, nanotubo de carbono, ponto quântico de carbono, nanodiamante e grafeno e podem ter a sua estrutura observada na Figura 3.2 (FECHINE, 2020).

Figura 3.2 - Nanomateriais de carbono.



Fonte: Adaptada (FECHINE, 2020).

O fulereno possui uma estrutura em forma de gaiola com hibridização sp^2 composta por diversos átomos de carbono, sendo o C60, que possui 60 carbonos, o mais abundante deles (BAIG et al., 2021), esse material possui boas propriedades físicas e químicas, como condutividade elétrica e reatividade. O nanotubo de carbono consiste de folhas de grafite que envolvem um cilindro, originando um material com grande área superficial, estabilidade térmica e química e resistência mecânica elevada (FECHINE, 2020).

O Ponto quântico de carbono possui dimensão zero, diâmetro inferior a 10 nm e excelentes propriedades como baixa toxicidade, biocompatibilidade, boa solubilidade e alta luminescência. Já o nanodiamante possui hibridização sp^3 e diversos grupos funcionais em sua superfície (BAIG et al., 2021), esse nanomaterial se caracteriza pela alta fotoestabilidade e biocompatibilidade (FECHINE, 2020).

O grafeno também é um nanomaterial muito procurado devido a suas propriedades, ele é bidimensional, possui elevada área superficial e boa estabilidade química (FECHINE, 2020).

3.2 Grafeno

O grafeno é uma forma alotrópica do carbono que vem sendo estudado há mais de 60 anos, mas só teve os seus planos isolados em 2004 por um grupo de cientistas liderado pelo professor Geim na Universidade de Manchester, na Inglaterra (BORDIGNON, 2018). Esse material é bidimensional e sua estrutura é formada por átomos de carbono com hibridização sp^2 que se organizam formando uma rede de anéis hexagonais (FECHINE, 2020).

O grafeno é obtido da estrutura de grafite e pode ser sintetizado de diversas formas, sendo as principais delas: esfoliação mecânica, que geralmente é feita com o auxílio de um cantilever ou um moinho de bolas; deposição física de vapor que costuma utilizar um substrato de carbeto de silício para cultivar filmes de grafeno; deposição química de vapor em que o grafeno é sintetizado em superfícies metálicas catalíticas na presença de hidrocarbonetos gasosos e esfoliação em fase líquida, que utiliza um solvente para obtenção do grafeno (ZHAO et al., 2021).

Quando o objetivo é obter óxido de grafeno, os processos mais utilizados são a redução química, que ocorre devido a reação com o grupo funcional que contém oxigênio e a redução térmica, que é caracterizada pela fissão de ligação que ocorre devido a energia térmica (ZHAO et al., 2021).

O interesse pelo grafeno ocorre devido a suas propriedades, esse material apresenta elevada condutividade térmica e módulo de elasticidade (BORDIGNON, 2018), além disso, o grafeno possui alta resistência mecânica e condutividade elétrica, se comparado com os demais materiais conhecidos. Já os compósitos e derivados da nanoestrutura de grafeno podem funcionar como inibidores de corrosão e podem possuir boa biocompatibilidade e transparência (FECHINE, 2020).

O grafeno possui alta estabilidade química, e fraca interação com solventes como os lubrificantes, por isso existem técnicas para que a dispersão do soluto seja facilitada, isso pode ser feito por meio de modificações físicas, químicas ou regulação estrutural (ZHAO et al., 2021).

Já as propriedades tribológicas do grafeno estão relacionadas com o método de sintetização, já que, esses processos influenciam em parâmetros como a distância entre as

nanofolhas e a área superficial. Se esses parâmetros são elevados, a força de Van der Waals entre as nanofolhas é diminuída, o que melhora as propriedades tribológicas (ZHAO et al., 2021).

3.3 Aplicações gerais e tribológicas do grafeno

A forma como o grafeno é sintetizado influencia na sua qualidade, preço e aplicações, como apresentado na Figura 3.3 (ZHAO et al., 2021).



Figura 3.3 - Relação entre a qualidade do processo e o custo do grafeno.

Preço para produção em larga escala

Fonte: Adaptada (ZHAO et al., 2021).

O grafeno obtido por esfoliação mecânica apresenta alta qualidade e preço, se comparado aos demais métodos de obtenção e pode ser utilizado para pesquisas e prototipagem. Por meio do processo de deposição química de vapor, o grafeno possui boa qualidade e baixo preço, sendo utilizado para revestimentos, eletrônica, em camadas condutoras transparentes e em aplicações biológicas. Já o grafeno oriundo da esfoliação em fase líquida apresenta o menor preço e qualidade se comparado aos demais processos, desta forma ele pode ser utilizado em revestimentos, camadas condutoras transparentes, armazenamento de energia e aplicações biológicas. Além disso, o grafeno

por meio de montagem molecular pode ser utilizado em nanoeletrônicos e em eletrônicos e transistores, por meio de substratos de carbeto de silício (ZHAO et al., 2021).

O grafeno é muito utilizado na indústria eletrônica devido a suas propriedades elétricas, mecânicas e químicas. O grafeno na forma de óxido possui aplicações medicinais, que inclui o efeito terapêutico no tratamento contra o câncer, biossensores para detecção de DNA, proteínas e neurotransmissores (FECHINE, 2020).

Outra aplicação do grafeno é como lubrificante sólido ou aditivo em lubrificantes fluídos, além do tamanho nanométrico, a estrutura fina lamelar e a força de ligação fraca entre as folhas fazem com que o escorregamento de planos seja facilitado, o que diminui o contato entre as superfícies do sistema tribológico (BORDIGNON, 2018).

3.3.1 Lubrificante a base de grafeno

O lubrificante a base de grafeno apresenta maior potencial anti desgaste em superfícies de contato se comparado com outros lubrificantes convencionais. Além disso, um grande diferencial desse produto é a redução da emissão de cinzas sulfatadas, fósforo e enxofre que é muito comum em produtos tradicionais, isso faz com que o lubrificante a base de grafeno contribua para diminuir os danos sofridos pelo meio ambiente (ZHAO et al., 2021).

Para que uma lubrificação seja eficaz, ela geralmente obedece a alguns mecanismos. O primeiro deles é a formação de tribofilme que ocorre devido às dimensões do grafeno, que permitem que esse nanomaterial entre na interface de atrito e seja adsorvido, formando um filme protetor que reduz o contato entre os componentes do sistema. O tribofilme faz com que a superfície seja quase inerte e diminui a adesão e a resistência ao cisalhamento quando o sistema está sujeito a atrito (ZHAO et al., 2021).

O segundo mecanismo é a transformação microestrutural que pode ocorrer durante o atrito devido ao calor e a altas tensões. Quando o grafeno é submetido a essas condições ele tende a se sobrepor, possibilitando a evolução da grafitização e formando um filme estável que é benéfico para o efeito de lubrificação (ZHAO et al., 2021).

Outro mecanismo importante é o deslizamento intercalar que ocorre devido às forças de ligação de Van der Waals entre as folhas de grafeno que são consideradas fracas. Um parâmetro importante para esse mecanismo é a distância entre as camadas, que quando aumentada, diminui o atrito existente, o que facilita o deslizamento. Dessa forma, as camadas que apresentam facilidade de deslizamento possuem melhores propriedades tribológicas para

lubrificação do que as camadas que apresentam barreiras como maior atrito (ZHAO et al., 2021).

Já o mecanismo de efeito sinérgico ocorre quando o grafeno é combinado com outros elementos e, por meio das suas propriedades tribológicas, contribui para a melhora da lubrificação do sistema (ZHAO et al., 2021).

3.3.2 Produtos concorrentes

Alguns lubrificantes utilizam o óxido de grafeno como aditivo em óleo visando melhorar suas propriedades tribológicas. YU, Bo et al. (2022) testaram essas propriedades para o óxido de grafeno alquilado que foi preparado por meio da mistura do óxido com octadecilamina que foi dispersa em óleo em diferentes concentrações que variam de 0 a 0,125 mg/mL com intervalo de 0,025 mg/mL (YU, Bo et al., 2022).

Esses corpos de provas foram testadas em um tribômetro por meio de um ensaio esfera sobre disco para obtenção da taxa de desgaste, por meio da profundidade de desgaste após experimento, e do coeficiente de atrito. Por meio da Figura 3.4 é possível perceber que a menor taxa de desgaste é observada em concentração de 0,075 mg/mL de ODA-RGO (YU, Bo et al., 2022).



Figura 3.4 - Resultado da taxa de desgaste/10⁻⁶mm * N⁻¹ m⁻¹ do disco em função da concentração de ODA-RGO.

Fonte: Adaptada (YU, Bo et al., 2022).

Os valores do coeficiente de atrito em função do tempo de deslizamento também foram demonstrados na Figura 3.5. Portanto é possível afirmar que o aumento da concentração de ODA-RGO tende a diminuir o coeficiente de atrito inicial, além de diminuir o tempo necessário para que ocorra a estabilização do atrito (YU, Bo et al., 2022).



Figura 3.5 - Resultado do coeficiente de atrito em função do tempo de deslizamento.

Fonte: Adaptada (YU, Bo et al., 2022).

Além do óxido de grafeno como aditivo, existem no mercado outros lubrificantes que são considerados concorrentes do lubrificante à base de grafeno. PACHECO (2021) testou o atrito e o desgaste por meio do ensaio pino sobre disco em aço 1045 em diferentes cargas e em diferentes condições de lubrificação. O sistema foi ensaiado a seco e lubrificado com o óleo sintético Selenia 5w40, com solução de óleo 5w40 e condicionador de metais da marca Militec-1 e com solução de óleo 5w40 e Militec-1 após tratamento térmico superficial (PACHECO, 2021).



Figura 3.6 - Comparativo da perda de massa para ensaio a seco e lubrificado de diferentes formas com carga de 10 N.

Fonte: Adaptada (PACHECO, 2021).

Após o ensaio com carga normal de 10 N, a perda de massa, que quantifica o desgaste, foi ilustrada na Figura 3.6, mostrando que o teste a seco origina maior desgaste e que o óleo puro é mais eficiente do que os sistemas que possuem a solução de óleo e Militec-1 (PACHECO, 2021).

O coeficiente de atrito de todos os sistemas testados também foi obtido em função do tempo e é mostrado na Figura 3.7 que comprova a necessidade de se utilizar a lubrificação, já que o teste a seco apresentou maiores coeficientes de atrito. Dentre os sistemas lubrificados, os valores do coeficiente de atrito foram semelhantes, porém, o Militec com tratamento térmico se mostrou prejudicial (PACHECO, 2021).

Figura 3.7 - Comparativo do coeficiente de atrito para ensaio a seco e lubrificado de diferentes formas com carga de 10 N.



Fonte: Adaptada (PACHECO, 2021).

3.4 Aço ABNT 1045

Os aços são ligas ferrosas que possuem teor de carbono que varia em alto, médio e baixo e influência nas propriedades mecânicas deste material. Além disso, outra classificação importante engloba o aço carbono, que possui apenas elementos residuais diferentes de ferro e carbono, e o aço liga, que possui elementos de liga em sua composição (CALLISTER, 2020).

O aço 1045 possui em sua composição silício, magnésio, fósforo e enxofre e um teor de carbono que varia de 0,43% a 0,50%, por isso é considerado um aço médio carbono. Como propriedades, destaca-se a resistência mecânica entre 570 e 700 MPa, dureza Brinell entre 170 e 210 HB, módulo de elasticidade entre 190 e 210 GPa, resistência à tração de 585 MPa e coeficiente de Poisson entre 0,27 e 0,3 (PACHECO, 2021).

3.5 Rugosidade superficial de contato

A rugosidade pode ser caracterizada como as asperezas existentes em uma superfície. Rabinowicz (1995) demonstrou por meio de experimento que em superfícies com baixo valor de rugosidade superficial, o coeficiente de atrito é elevado devido ao aumento da área real de contato, como mostrado na região I da Figura 3.8. Na região II o atrito é mínimo e quase constante. Já na região III a maior rugosidade faz com que o atrito aumente devido ao contato entre as asperezas (REIS et al., 2017).



Figura 3.8 - Comparativo do coeficiente de atrito em função da rugosidade superficial.

Fonte: Adaptada (REIS et al., 2017).

Além do coeficiente de atrito, a rugosidade pode afetar o desgaste, REIS et al. (2017) analisaram a influência da rugosidade superficial sobre o desgaste por meio de um ensaio pino sobre disco utilizando metal duro e aço ABNT 4340 e concluíram que a menor taxa de desgaste ocorreu no disco de maior rugosidade (REIS et al., 2017). A rugosidade também atua como dificultadora da adesão de camadas de revestimento em substratos (REZENDE, 2010). No entanto, em alguns sistemas de contato, os vales da rugosidade podem ser necessários para acúmulo de lubrificante (REIS et al., 2017).

Para que a rugosidade seja calculada, é necessário conhecer os comprimentos para sua avaliação. Na Figura 3.9 é possível observar o comprimento total (lt), o comprimento de amostragem (le), o comprimento útil (lm) e os comprimentos das extremidades (lv e ln) (REZENDE, 2010).







A rugosidade possui parâmetros dimensionais, dentre os principais estão:

- Desvio aritmético médio da rugosidade (*R_a*): média aritmética entre as alturas dos picos e dos vales em relação à linha média.
- Altura média entre pico e vale (R_z) : Parâmetro mais sensível do que Ra, que é obtido por meio da média das rugosidades parciais dos cinco comprimentos de amostragem
- Rugosidade máxima (*R_{max}*): definida como a maior diferença entre um pico e um vale das rugosidades parciais.
- Desvio médio quadrático da rugosidade (R_q) : utilizado para demonstrar o desvio padrão da rugosidade, evidenciando os perfis que se diferenciam muito da média.
- Rugosidade total (*R_t*): Diferença de altura entre o maior pico e o maior vale do comprimento útil. (ABNT, 2002).

Os parâmetros de altura máxima do pico (R_p) , altura média do pico (R_{pm}) , altura máxima do vale (R_v) e altura média do vale (R_{vm}) também são importantes para os cálculos (REZENDE, 2010).

Para medir a rugosidade superficial, o rugosímetro é um dos equipamentos mais utilizados. Esse aparelho é composto por um apalpador que desloca pela superfície e transfere os sinais da agulha apalpadora para o amplificador, que amplia esses sinais e calcula de acordo com o parâmetro de rugosidade previamente definido. A superfície em corte é obtida por meio de um registrador devido a transformação do movimento da agulha em impulsos elétricos que são representados graficamente (PROFESSOR).

3.6 Perfilometria por contato

A perfilometria por contato é uma técnica utilizada para caracterização superficial. O equipamento utilizado neste ensaio é o perfilômetro, que tem os seus componentes ilustrados na Figura 3.10 (REZENDE, 2010).





Fonte: (REZENDE, 2010).

A técnica consiste em uma ponta fina que se desloca ao longo de uma superfície com velocidade constante, a movimentação vertical dessa ponta para fazer contato com picos e vales de diferentes alturas é convertido em sinal elétrico que é amplificado e transformado em sinal digital. A rugosidade então pode ser apresentada no formato de um gráfico ou numericamente (REZENDE, 2010).

Apesar de muito utilizada, a perfilometria por contato não é recomendada para superfícies muito macias que possam ser danificadas pela pequena força exercida pela ponta. Além disso, a geometria dos vales pode impedir um contato eficiente da ponta com toda a superfície, o que pode gerar erros nos resultados obtidos (REZENDE, 2010). A perfilometria também é utilizada para estimar a perda volumétrica e, consequentemente, quantificar de maneira indireta o desgaste. Isso se torna possível por meio de um software computacional que compara os perfis gerados por perfilometria (MEIRELES et al., 2014).

3.7 Atrito a seco e atrito fluido

O Atrito é uma força de interação entre superfícies que se opõe ao movimento e é proporcional à força normal do sistema. O atrito pode ser classificado em atrito a seco e atrito fluido. O atrito a seco ocorre no contato entre duas superfícies sólidas, ele depende da área de contato aparente e da velocidade de deslizamento entre as superfícies.

O coeficiente de atrito é definido como a razão entre a força tangencial necessária para mover um corpo e a força normal e, no atrito a seco, pode ser classificado como coeficiente de atrito estático, que atua quando o material está em repouso, e coeficiente de atrito cinético, que se relaciona com o movimento. Embora o coeficiente de atrito seja tabelado para diversos materiais, ele não é uma propriedade intrínseca, ou seja, ele varia de acordo com as condições experimentais de cada sistema (LUDEMA, 1996).

Já o atrito fluido consiste na força de cisalhamento existente entre as camadas de um fluido e está presente, por exemplo, quando um sistema tribológico apresenta lubrificante entre as superfícies (SANTOS et al., 2020).

3.8 Mecanismos de desgaste

O desgaste é o objeto de estudo da tribologia, sendo de extrema importância o conhecimento dos mecanismos que atuam quando duas ou mais superfícies deslizam uma contra a outra. O desgaste adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo são os mais comuns quando se trata de deslizamento (PACHECO, 2021).

O desgaste adesivo ocorre quando uma ligação adesiva é formada entre as superfícies em contato dificultando o deslizamento entre elas e causando deformação plástica, trincas e perda de material (PACHECO, 2021). A ocorrência de adesão é dificultada na presença de lubrificante e depende das propriedades mecânicas do material, como limite de escoamento e dureza. Além disso, a adesão é mais frequente em estruturas cúbicas de face centrada, seguida por cúbicas de corpo centrado e hexagonal compacta (MORILLO, 2015).

O desgaste abrasivo ocorre devido a presença de partículas duras que causam a perda de material ou a movimentação do mesmo. Essas partículas podem ser contaminações ou parte de algum dos materiais presentes no sistema tribológico, elas podem estar livres ou presas na superfície do contracorpo (REZENDE, 2010).

O desgaste abrasivo pode ocorrer de diversas formas, como mostrado na Figura 3.11 que ilustra a abrasão em dois e três corpos sólidos por deslizamento. No entanto, esse mecanismo também ocorre quando fluidos possuem partículas sólidas que atuam em uma superfície gerando danos, neste caso o desgaste abrasivo é denominado erosão (REZENDE, 2010).

Figura 3.11 - Tipos de desgaste abrasivo.



(a) Abrasão de dois corpos



(b) Abrasão de três corpos

......

(c) Erosão

Fonte: (REZENDE, 2010).

Quando a partícula dura possui dimensões micrométricas, o mecanismo de desgaste passa a ser conhecido como microabrasão (ARAÚJO et al., 2007).

3.9 Ensaios tribológicos

Os ensaios tribológicos podem ser realizados para diversas aplicações, dentre elas destaca-se: testar eficiência ou funcionalidade, determinar mecanismos tribológicos, design de tribossistemas, influência de variáveis e vida útil de um material. Além disso, os principais objetivos de um ensaio tribológico são o estudo do desgaste e do atrito por meio de quantificação da taxa de desgaste e do coeficiente de atrito (FERREIRA, 2019).

A escolha do ensaio ideal depende do material a ser ensaiado e das aplicações, por isso nos ensaios de deslizamento diversas geometrias podem ser utilizadas, como mostrado na Figura 3.12 que ilustra a geometria pino sobre face plana do disco (Figura 3.12(a)), pino pressionado contra o aro do disco (Figura 3.12(b)), pino sobre placa plana (Figura 3.12(c)) e discos rotativos pressionados no aro (Figura 3.12(d)) e na face plana (Figura 3.12(e)) (HUTCHINGS, 2017).





Fonte: (HUTCHINGS, 2017).

Dentre as geometrias utilizadas para o ensaio de desgaste em tribômetro, uma das mais comuns é a pino sobre disco que é mostrada na Figura 3.10a. Neste ensaio o contra corpo é um pino que se mantém fixo e o corpo de prova é um disco rotativo (FERREIRA, 2019).

O ensaio pode ser realizado com ou sem lubrificação, a força normal aplicada é predefinida e seus parâmetros, como rotação e distância percorrida são controlados por um software acoplado ao equipamento que também é responsável pela aquisição de dados para estudo do desgaste e do atrito (REZENDE, 2010).

3.10 Microscopia

A técnica de microscopia ótica consiste em iluminar a superfície que se deseja observar com luz visível ou luz ultravioleta, o que alcança uma ampliação de até 2000 vezes (DEDAVID et al., 2007).

As técnicas de microscopia podem ser utilizadas para caracterização das trilhas de desgaste em ensaios tribológicos. Em conjunto com a análise superficial é possível identificar os mecanismos de desgaste, a formação do tribofilme, a ocorrência de encruamento e a presença de óxidos e outros elementos que podem influenciar o desgaste e o atrito (FERREIRA, 2019).

4. METODOLOGIA



Figura 4.1 - Fluxograma dos processos de metodologia.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.1 Planejamento experimental

Por meio do software estatístico Minitab foi possível planejar o experimento utilizando a ferramenta DOE. Foram utilizados dois fatores, sendo o primeiro a presença, ou não de lubrificação e o segundo, que consiste na variação da carga normal entre 5 N, 10 N E 25 N.

Os ensaios foram realizados duas vezes em cada configuração para o aumento da confiabilidade, por isso foram necessários 12 corpos de prova para definição do coeficiente de atrito e da perda de volume. Todas as variáveis e configurações dos ensaios são apresentadas na Tabela 1, que foi preenchida com os resultados encontrados.

Corpo de prova	Lubrificação	Carga (N)
10	Sem Lubrificação	5
11	Sem Lubrificação	10
2	Com Lubrificação	10
5	Sem Lubrificação	10
8	Com Lubrificação	10
7	Com Lubrificação	5
9	Com Lubrificação	25
1	Com Lubrificação	5
12	Sem Lubrificação	25
4	Sem Lubrificação	5
3	Com Lubrificação	25
6	Sem Lubrificação	25

Tabela 1	- Planejamento	experimental

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.2 Preparação dos corpos de prova

Para os ensaios tribológicos, foi necessária a preparação de 12 corpos de prova de aço ABNT 1045 no formato de discos, já os pinos utilizados tinham o formato de esfera com diâmetro de 6 milímetros de aço SAE 52100. A composição química dos dois materiais utilizados é mostrada na Tabela 2.

Aço	Composição química (% em peso)							
	С	Mn	Р	s	Si	Ni	Cr	Mo
SAE 1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,030	0,050	-	-	-	-
SAE 52100	0,98-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,15-0,35	-	1,30-1,60	-

Tabela 2 - Composição química dos aços 1045 e 52100.

Fonte: Adaptada (GERDAU, 2020).

Os corpos de prova em formato de disco possuem 19 mm de diâmetro e foram faceadas no Torno mecânico Nardini – modelo TT150 AS até que a altura das peças chegasse a 15 mm, em seguida as peças foram retificadas na Retífica plana tangencial da marca Timemaster e tiveram a rugosidade (Ra) de 0,687 μ m obtida por meio da média aritmética dos resultados encontrados em triplicata com o auxílio de um rugosímetro.

4.3 Análise metalográfica

Uma amostra do material utilizado para a confecção dos discos foi embutida a quente no equipamento PRE 30Mi da Arotec, utilizando baquelite. Depois de embutida, a amostra foi lixada em três diferentes meshs e polida utilizando pasta de diamante e panos metalográficos de 9, 3 e 1 micrometro.

Em seguida, a peça foi submetida a ataque químico na capela com Nital 3% e foi observada por meio do microscópio óptico Kontrol modelo IM 713 para obtenção da morfologia e da microestrutura do material.

4.4 Ensaio de desgaste

O ensaio de desgaste pino sobre disco foi realizado em um tribômetro Microtest modelo MT/60/NI do laboratório de tribologia da UFMG e pode ser visto na Figura 4.2. O ensaio foi realizado com os seguintes parâmetros: 400 rotações por minuto (r.p.m), 220 m de distância

percorrida, raio da trilha de desgaste de 5,5 mm, 16 minutos de duração e aproximadamente 6.395 revoluções. Além disso, cada configuração foi testada com e sem lubrificação.



Figura 4.2 - Tribômetro Microtest modelo MT/60/NI.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os dados foram obtidos por meio do software MT4002 10.0, e assim foi possível analisar o coeficiente de atrito e o desgaste.

4.5 Ensaio de perfilometria

O ensaio de perfilometria foi realizado para quantificar o volume perdido de massa dos corpos de prova em formato de disco depois do ensaio de desgaste. O equipamento utilizado foi o perfilômetro 3D HOMMELWERKE modelo T8000, que pode ser observado na Figura 4.3, seguindo os parâmetros:

- Apalpador TKU 300, amplitude de 600 µm;
- Ponta com ângulo de 90° e raio de 5 μm, código 230475;
- 100 medições e 20000 mm de distância percorrida;
- Trajeto de apalpação de 5,00 mm;
- Distância entre os pontos de medição de 1,00 µm;
- Velocidade de apalpação de 0,50 mm/s.



Figura 4.3- Perfilômetro 3D HOMMELWERKE modelo T8000.

Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

A perfilometria foi realizada nos corpos de prova ensaiados a seco com carga normal de 5 N, 10 N e 25 N e no corpo de prova lubrificado submetido a carga normal de 25 N.

4.6 Microscopia Óptica

Os corpos de prova ensaiados com carga normal de 25 N e 10 N a seco e 25 N lubrificado foram limpos com álcool isopropílico e submetidos à Microscopia Óptica por meio do microscópio óptico Kontrol modelo IM 713.

Essa técnica foi utilizada para análise da trilha de desgaste formada nos corpos de prova após ensaio no tribômetro, sendo necessária para a identificação dos mecanismos de desgaste existentes.

4.7 Discussão dos resultados

Após realização dos ensaios, os dados obtidos foram comparados entre si, o que possibilitou uma análise do desempenho do lubrificante a base de grafeno.
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos e encontra-se subdividida pelos procedimentos experimentais realizados, sendo eles a análise metalográfica, ensaio de desgaste, ensaio de perfilometria e microscopia óptica.

5.1 Análise Metalográfica

A Figura 5.1 apresenta uma microscopia óptica com duas ampliações da microestrutura do material utilizado para a confecção do corpo de prova. A ferrita é identificada devido a coloração mais clara, que indica um baixo teor de carbono, já a perlita pode ser reconhecida por meio da Figura 5.1(a), que evidencia a matriz de ferrita com lamelas de cementita, que apresentam coloração mais escura devido ao alto teor de carbono. Essa microestrutura é compatível com o esperado para o aço ABNT 1045.





Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.2 Ensaio de Desgaste

A Figura 5.2 apresenta o resultado do ensaio pino sobre disco realizado no tribômetro com carga normal de 5 N sem lubrificação.



Figura 5.2 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 5 N a seco; Figura b) – Réplica do ensaio com carga de 5 N a seco.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

É notável que o coeficiente de atrito do ensaio começou a ter um crescimento expressivo nos primeiros 40 metros deslizados, alcançando valor próximo de μ 0,29. Em seguida, decaiu para aproximadamente μ 0,18, retornando a crescer durante todo ensaio, alcançando patamares de μ 0,27.

Para que pudesse haver uma comparação com os demais ensaios realizados, a Software Excel foi utilizada para calcular média e desvio padrão dos valores de coeficiente de atrito e desgaste nos últimos 20 metros de distância, onde ainda existem dados de coeficiente de atrito e de desgaste, ou seja, na faixa de 148 a 168 metros. O coeficiente de atrito médio no ensaio mostrado na Figura 5.2(a) foi de μ 0,26±0,0053.

A curva de desgaste coletada no ensaio mostrada na Figura 5.2(a), apresenta um comportamento crescente, ou seja, durante todo ensaio provavelmente houve arrancamento de material, alcançando profundidade de aproximadamente 25 μ m, este comportamento reflete a teoria de desgaste, que é uma perda de material progressiva em função da distância deslizada. Para efeito comparativo também foi adotado calcular a média nos 20 metros finais, visto que existe uma oscilação dos valores que pode ser em função do efeito *stick slip* ou até mesmo vibrações no contato em função do desalinhamento do corpo de prova. O valor médio alcançado no desgaste entre as distâncias de 148 a 168 metros foi de 22,67±1,552 μ m.

As mesmas condições de testes foram replicadas e os dados podem ser analisados pelo gráfico da Figura 5.2(b) para efeito de análise da possível repetibilidade dos resultados, assim como no ensaio da Figura 5.2(a), a média dos coeficientes de atrito foi calculada com os

valores dos últimos 20 metros de ensaio, apresentando valor de μ 0,13±0,0092. Assim, não podemos atribuir com assertividade o valor do coeficiente de atrito nas condições ensaiadas, sendo que entre o ensaio e réplica houve uma disparidade de 100% nos resultados, é necessário investigar melhor.

Analisando a curva de desgaste da Figura 5.2(b). foi observado maiores oscilações e menor inclinação a partir das distâncias de 100 metros, isso pode ser atribuído a um efeito *stik slip* mais severo ou até mesmo um comportamento diferente na mecânica do contato comprovando a hipótese que é necessário maior investigação destas condições ensaiadas. O valor da profundidade de desgaste entre as distâncias de 148 a 168 metros foi de 10,50±1,210 μ m, que é 2,5 vezes menor em relação ao ensaio apresentado na Figura 5.2(a). Menor coeficiente de atrito foi observado no ensaio de réplica e que também apresentou menor profundidade de desgaste, corroborando com apresentado por YU, Bo et. al; (2022), menor coeficiente de atrito tende a ter menor taxa de desgaste.

A Figura 5.3 apresenta o resultado do ensaio pino sobre disco realizado no tribômetro com carga normal de 5 N com lubrificação.

Figura 5.3 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 5N lubrificado; Figura b) – Réplica do ensaio com carga de 5N lubrificado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

É possível perceber, de acordo com a curva do coeficiente de atrito, que os dados ficaram dispersos e não ocorreu uma estabilização, o que pode ser observado devido à existência de picos com valores de até μ 0,09, no entanto, a curva segue uma tendência

horizontal, por isso todos os valores até a distância de 204 m foram utilizados para o cálculo da média e desvio padrão de μ 0,07±0,009.

Analisando a curva de desgaste da Figura 5.3(a) percebe-se que por mais que os dados sejam dispersos, eles inicialmente apresentam uma tendência decrescente até aproximadamente 80 metros, o que pode significar que o filme lubrificante tenha atuado reduzindo o contato entre as superfícies sólidas e, consequentemente, retardando o início da perda por desgaste. A oscilação existente pode ter ocorrido devido a uma vibração no sistema ou, até mesmo, por um desalinhamento entre a planicidade do corpo de prova e o sensor.

Em seguida foi percebido o início do desgaste e a curva se tornou uma crescente até o fim do ensaio. A média de $5,21\pm1,93$ µm foi calculada utilizando os dados dos últimos 20 metros deslizados, ou seja, de 184 a 204 m. Analisando o desvio padrão é possível perceber que os valores de desgaste não são uniformes, com uma margem de erro de até 37%.

A Figura 5.3(b) apresenta os resultados da réplica do ensaio com carga de 5 N em meio lubrificado. Tanto na curva do coeficiente de atrito, quanto na curva do desgaste, é possível observar uma tendência horizontal com dados dispersos, o que se confirmou quando a média e o desvio padrão foram calculados utilizando todos os dados até a distância de 201 metros, encerrando a coleta de dados de desgaste.

A média do coeficiente de atrito foi de μ 0,03±0,009, ou seja, não houve repetibilidade dos resultados, já que a média dos valores encontrados apresentaram aproximadamente 133% de diferença, o que impossibilita uma conclusão do valor do coeficiente de atrito para os parâmetros analisados. A média do desgaste foi 2,71±1,26 µm, embora o valor do resultado do ensaio de desgaste da réplica possa coincidir com o do teste anterior, o desvio padrão corresponde a aproximadamente 50% do desgaste, o que demonstra a heterogeneidade dos dados, necessitando de mais ensaios para garantir uma determinada confiabilidade.

A Figura 5.4 apresenta o resultado do ensaio pino sobre disco realizado no tribômetro com carga de 10 N sem lubrificação.



Figura 5.4 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 10N a seco; Figura b) – Réplica do ensaio com carga de 10N a seco.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Analisando o coeficiente de atrito, é possível perceber que inicialmente houve um pico que alcançou o valor máximo de μ 0,44, em seguida a curva se estabiliza na distância deslizada de 57m e coeficiente de atrito de μ 0,28. A partir desse ponto, todos os dados são utilizados para calcular a média de μ 0,32±0,016. Essa estabilização é essencial para as análises comparativas, pois demonstra com maior confiabilidade a relação entre o par tribológico.

Já a curva de desgaste, embora tenha a ocorrência de alguns picos que podem significar uma vibração no sistema, apresentou um comportamento crescente do início ao fim do teste, chegando a profundidade de desgaste de aproximadamente 27 μ m. A média de 24,62±1,187 μ m foi obtida por meio dos dados colhidos nos 20 últimos metros deslizados, ou seja, de 207 a 227 m.

As condições de teste foram replicadas e os resultados são apresentados na Figura 5.4(b). A curva do coeficiente de atrito é crescente até, aproximadamente, 83 m de distância deslizada e μ 0,30, quando se estabiliza. A partir desse momento todos os dados até 284 metros, quando se encerra a coleta de dados da curva de desgaste, foram utilizados para calcular a média de μ 0,31±0,0083. Neste ensaio houve repetibilidade, já que as médias do coeficiente de atrito coincidiram, além disso, ambas as curvas apresentaram estabilidade, o que aumenta a confiabilidade dos dados.

Na Figura 5.4(b) é possível perceber que a curva de desgaste apresentou comportamento crescente, por isso a média de $16,93\pm1,784$ µm foi calculada utilizando os dados dos 20 metros finais, ou seja, de 264 a 284 m. Para essa grandeza não houve repetibilidade, visto que o valor médio de desgaste do primeiro ensaio é 45% maior do que o valor médio de desgaste da réplica. Além disso, por meio da Figura 5.4(b) pode-se observar que a profundidade de desgaste foi de aproximadamente 20 µm, também inferior ao observado na Figura 5,4(a). Como os valores médios para o coeficiente de atrito coincidiram, era esperado que os valores de desgaste fossem mais próximos. Isso não ocorreu devido a dispersão dos dados em ambos ensaios, que pode ser causada pelas repetidas pausas e acelerações no movimento devido ao efeito stick-slip.

A Figura 5.5 apresenta o resultado do ensaio pino sobre disco realizado no tribômetro com carga de 10 N com lubrificação.

Figura 5.5 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 10N lubrificado; Figura b) – Réplica do ensaio com carga de 10N lubrificado.



Fonte: Elaborado pelo autor(2023).

Na Figura 5.5(a) é possível perceber que tanto a curva de coeficiente de atrito, quanto a curva de desgaste exibiram uma tendência horizontal repleta de oscilações. Para calcular a média em ambos os casos foram utilizados todos os dados até a distância final deslizada de 237 metros.

A média da curva do coeficiente de atrito foi de μ 0,016±0,0033, sendo o erro percentual aproximado de 21% para mais ou para menos, enquanto o maior pico ocorreu no

último momento do ensaio e seu valor foi de μ 0,025. Já a média da curva de desgaste foi de 5,71±2,11 μ m, ou seja, um erro percentual de aproximadamente 37% para mais ou para menos, além disso, o teste ocasionou uma profundidade de desgaste de aproximadamente 13 μ m.

As mesmas condições de teste foram replicadas e os resultados apresentados na Figura 5.5(b), onde pode-se observar nas curvas de coeficiente de atrito e desgaste a tendência horizontal e a oscilação dos dados. Portanto toda a distância deslizada, até 221 metros, foi utilizada para o cálculo das respectivas médias.

A média do coeficiente de atrito foi de μ 0,019±0,0040, ou seja, um erro percentual de 21% para mais ou para menos, neste caso os resultados apresentaram repetibilidade pois coincidiram, o pico de maior valor da curva foi de μ 0,028, também próximo do encontrado no primeiro teste. A média dos dados de desgaste foi de 5,13±1,72, erro percentual aproximado de 33% para mais ou para menos, a profundidade de desgaste chegou a aproximadamente 10 µm, portanto os resultados da réplica de desgaste também foram semelhantes aos encontrados no ensaio inicial com carga de 10 N e presença de lubrificação.

Embora a repetibilidade tenha ocorrido para a curva do coeficiente de atrito e para a curva do desgaste, os resultados não são confiáveis devido a existência de alta densidade de oscilações. Por meio dos erros percentuais foi possível confirmar o quão disperso foram os dados.



Figura 5.6 - Ensaio Pino Sobre disco – Ensaio com carga de 25N a seco.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 5.6 apresenta os resultados do ensaio com carga de 25 N sem a presença de lubrificação, as condições de teste deste ensaio foram replicadas, no entanto os dados obtidos não puderam ser analisados porque não foram coletados corretamente pelo equipamento utilizado, impossibilitando a comparação de resultados que geraria maior confiabilidade.

Analisando a curva do coeficiente de atrito, é possível perceber que nos primeiros 18 metros houve um pico com valor máximo de μ 0,48. Entre as distâncias de 18 e 63 metros o coeficiente de atrito teve uma leve ascensão, após esse intervalo outro pico foi observado, com valor máximo de coeficiente de atrito de μ 0,50, seguido por decaimento até μ 0,27, onde se iniciou uma estabilização que se estendeu de 114 m a 193 m. Por fim observou-se a ocorrência de um terceiro pico que chegou ao valor máximo de coeficiente de atrito de μ 0,46. A média do coeficiente de atrito foi calculada utilizando o intervalo de estabilização da curva, ou seja, de 114 m a 193 m, sendo o resultado de μ 0,29±0,013. A ocorrência de picos acentuados de tempos em tempos pode significar uma mudança nas condições de contato entre as superfícies sólidas causadas por um acúmulo de material desgastado na superfície.

A curva de desgaste apresentou um crescimento acentuado nos primeiros 10 metros chegando ao valor de 32 μ m, em seguida a curva se manteve crescente até o final do ensaio, porém com menor inclinação. A média de 49,42±2,896 μ m foi calculada utilizando os últimos 20 metros deslizados, ou seja, de 200 m a 220 m. Durante todo o ensaio houve arrancamento de material, chegando à profundidade aproximada de 55 μ m, o que comprova a teoria de que o desgaste é uma perda progressiva de material em função da distância deslizada.

A Figura 5.7 apresenta o resultado do ensaio pino sobre disco realizado no tribômetro com carga de 25 N com lubrificação.



Figura 5.7 - Ensaio Pino Sobre disco: Figura a) – Ensaio com carga de 25N lubrificado; Figura b) – Réplica do ensaio com carga de 25N lubrificado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Analisando a curva do coeficiente de atrito apresentada na Figura 5.7(a) é possível perceber um crescimento acentuado nos primeiros 11 metros alcançando o valor de μ 0,02. Em seguida a curva mantém uma tendência horizontal com a presença de oscilações e valor máximo de coeficiente de atrito próximo de μ 0,03. A média de μ 0,02±0,003 foi calculada utilizando todos os dados até a distância deslizada de 178 metros, onde o desgaste deixa de ser coletado.

A curva do desgaste também apresentou um comportamento oscilatório com tendência horizontal, a média de 1,9 \pm 1,41 µm foi calculada utilizando todos os dados coletados. O erro percentual de aproximadamente 74% para mais ou para menos é explicado pela alta incidência de picos com profundidade máxima de 7 µm, o que prejudica a confiabilidade do ensaio.

A Figura 5.7(b) apresenta os resultados da réplica das mesmas condições de ensaio. É possível perceber que ambas as curvas possuem o mesmo comportamento oscilatório com tendência horizontal, portanto as médias foram calculadas por meio de todos os dados até a distância deslizada de 185 metros, quando a curva do desgaste deixa de ser coletada. O coeficiente de atrito foi de μ 0,009±0,002, embora o erro percentual tenha sido de aproximadamente 22% para mais ou para menos, não houve repetibilidade já que o ensaio inicial apresentou resultado 122% maior. O valor máximo de coeficiente de atrito também não coincidiu, já que o observado na Figura 5.7(b) foi de aproximadamente 0,013.

A média de desgaste foi de $2,39\pm1,55$ µm, ou seja, erro percentual de aproximadamente 65% para mais ou para menos, o que faz com que os resultados tenham coincidido, assim como a profundidade, que nas condições replicadas também foi de aproximadamente 7 µm. Tanto nas curvas de coeficiente de atrito, quanto nas de desgaste, houve alto índice de dispersão, que podem ter ocorrido devido a vibrações do sistema, o que prejudica a análise.

5.2.1 Comparação entre os ensaios realizados

Após a análise dos dados é possível perceber que as maiores médias de coeficiente de atrito foram obtidas nos ensaios a seco com as cargas de 10 N e 25 N conforme ilustrado no Quadro 1.

	Ensaio - Coeficiente de atrito (μ)	Réplica - Coeficiente de atrito (μ)
5N - Seco	0,26±0,0053	0,13±0,009
5N - Lub	0,07±0,009	0,03±0,009
10N - Seco	0,32±0,001	0,31±0,008
10N - Lub	0,16±0,033	0,19±0,004
25N - Seco	0,29±0,001	-
25N - Lub	0,02±0,003	0,009±0,002

Quadro 1 - Média do coeficiente de atrito

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os menores valores de coeficientes de atrito ocorreram nos testes com lubrificação e cargas de 25 N e 10 N. Esses resultados condizem com o esperado por ZHAO et al. (2021) poque o grafeno presente no lubrificante é um nanomaterial que pode ser adsorvido na interface de atrito, formando um tribofilme que reduz o contato entre as superfícies sólidas e diminui a adesão e a resistência ao cisalhamento.

Segundo os resultados apresentados, é sugestivo que os ensaios de coeficiente de atrito sejam realizados com condições prolongadas em relação a distância deslizada, visto que as curvas ensaiadas apresentaram tendência de elevação do coeficiente de atrito por não haver estabilização dentro das condições estudadas. Além disso, as curvas de coeficiente de atrito e a maioria das curvas de desgaste dos testes com lubrificação apresentaram oscilação significativa dos resultados, possivelmente ruídos da rede elétrica e algum sinal de vibração pode ter sido captados.

Os ensaios realizados a seco também apresentaram maior profundidade de desgaste, sendo a carga de 25 N a que mais arrancou material, seguida de 10 N e 5 N, conforme ilustrado no Quadro 2. Esse comportamento segui a tendência das teorias de desgaste, com o aumento da carga aumenta a fricção e consequentemente eleva o arrancamento de material.

	Ensaio - Desgaste (µm)	Réplica - Desgaste (μ)
5N - Seco	26,67±1,55	10,50±1,21
5N - Lub	5,21±1,93	2,71±1,26
10N - Seco	24,62±1,18	16,93±1,78
10N - Lub	5,71±2,11	5,13±1,72
25N - Seco	49,42±2,89	-
25N - Lub	1,90±1,41	2,39±1,55

Quadro 2 - Média da profundidade de desgaste

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As menores profundidades de desgaste foram observadas, respectivamente, nos corpos de prova lubrificados com carga de 25 N, 5 N e 10 N. A presença do lubrificante a base de grafeno como responsável pela diminuição do desgaste pode ser explicada por BORDIGNON (2018) que diz que a estrutura fina lamelar e a força de ligação fraca entre as folhas fazem com que o escorregamento de planos seja facilitado, o que diminui o contato entre as superfícies.

Pelos resultados analisados, é possível afirmar que o lubrificante a base de grafeno dentro das condições estudada, funciona como redutor de atrito e consequentemente promove redução da perda de material por desgaste.

5.3 Ensaio de perfilometria

O ensaio de perfilometria foi realizado com o objetivo de analisar a largura e a profundidade da trilha de desgaste, além de proporcionar variáveis para a compreensão da influência da rugosidade e para o cálculo do volume de material perdido.

A Figura 5.8 apresenta os resultados do corpo de prova ensaiado como réplica a seco com carga normal de 5 N.



Figura 5.8 - Perfil de ondulação da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de 5N sem lubrificação: Figura a) – Corte inferior; Figura b) x Corte mediano; Figura c) – Corte superior.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A largura (eixo x) e a profundidade (eixo z) da trilha de desgaste foram coletadas em três cortes como pode ser visto na Figura 5.8. No corte inferior, ilustrado na Figura 5.8(a), é possível perceber que a trilha de desgaste possui largura aproximada de 0,15 mm e profundidade de 4 μ m, na Figura 5.8(b) observa-se que para o corte mediano, a largura foi de 1,25 mm e a profundidade de aproximadamente 2,5 μ m. A Figura 5.8(c) apresenta o corte superior, em que a largura foi de 0,55 mm e a profundidade de 3,5 μ m. Dessa forma, a média da largura da trilha de desgaste foi de 0,65±0,56 mm, enquanto a profundidade foi de 3,33±0,764 μ m.

Comparando a profundidade de desgaste média obtida por perfilometria e pelo ensaio pino sobre disco, percebe-se uma diferença de mais de 200 %, o que pode ser explicado devido ao comportamento oscilatório das curvas de ambos os ensaios, no caso dos gráficos apresentadas pela Figura 5.8 essa dispersão prejudica a identificação da trilha de desgaste.

Por meio da perfilometria também foi possível conhecer a área desgastada em cada corte apresentado na Figura 5.8, com base na média desses valores o volume de material arrancado pôde ser calculado, totalizando 0,077±0,00065 mm³.

Por meio dos dados da tabela 3 foi possível calcular as rugosidades de Ra, Rt e Rsk que foram respectivamente, $0.51\pm0.060 \ \mu\text{m}$, $5.03\pm1.35 \ \mu\text{m}$ e $-0.15\pm0.15 \ \mu\text{m}$.

Tabela 3 – Parâmetros de Rugosidade de corpo de prova submetido a carga de 5N sem lubrificação.

Parâmetro de Rugosidade	Corte inferior	Corte mediano	Corte superior
Ra	0,482 µm	0,460 µm	0,573 µm
Rt	5,01 µm	3,69 µm	6,39 µm
Rsk	0,00716 µm	-0,293 µm	-0,178 µm

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 5.9 apresenta os resultados para o corpo de prova de 10 N ensaiado a seco. As larguras representadas por 1,2 e 3 são, respectivamente, 0,5 mm, 0,8 mm, e 0,55mm. A média desses valores é de 0,62 \pm 0,16 mm. A profundidade z da Figura 5.9(a) é de 8 μ m, enquanto da Figura 5.9(b) é de 6 μ m e da Figura 5.9(c) é de 7 μ m, a média desses valores foi de 7,0 \pm 1,0 μ m. O valor da profundidade de desgaste calculado com os dados do ensaio pino sobre disco foram aproximadamente 250% maior, não havendo repetibilidade de resultados.

O volume desgastado de $0,16\pm0,00012 \text{ mm}^3$ foi calculado com base na média das áreas obtidas para cada altura de corte. Além disso, a tabela 4 apresenta os parâmetros de rugosidade, as médias de Ra, Rt e Rsk foram, respectivamente, $0,65\pm0,033 \mu m$, $6,34\pm0,810 \mu m$ e $-0,36\pm0,25 \mu m$.

Figura 5.9 - Perfil de ondulação da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de 10N sem lubrificação: Figura a) – Corte inferior; Figura b) x Corte mediano; Figura c) – Corte superior.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Parâmatra da Dugasidada	Conto inforior	Conto modiono	Conto suporior	
Tabela 4 – Parâmetros de Rugosidade de corpo de prova submetido a carga de 10N sem lubrificação				

Parâmetro de Rugosidade	Corte inferior	Corte mediano	Corte superior
Ra	0,648 µm	0,622 µm	0,688 µm
Rt	7,20 µm	5,59 µm	6,24 µm
Rsk	-0,654 µm	-0,212 µm	-0,221 µm

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os dados da perfilometria do corpo de prova ensaiado com carga de 25 N a seco são mostrados na Figura 5.10. As larguras representadas por 1,3 e 5 são, respectivamente, 1,4 mm, 1,5 mm e 1,1 mm, portanto a média desses valores foi de 1,33 \pm 0,208 mm. Já a média das profundidades de desgaste foi de 25,83 \pm 3,819 µm, os valores considerados para esse cálculo

foram 22,5 μ m, 25 μ m e 30 μ m, demonstrados, respectivamente, por 2,4 e 6. Comparando com a profundidade de desgaste obtida no ensaio pino sobre disco, percebe-se que a diferença de valores é de aproximadamente 192%.

O volume desgastado de 1,92±0,002 mm³ foi calculado com base na média das áreas obtidas nos cortes inferior, mediano e superior.

Figura 5.10 - Perfil de ondulação da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de 25N sem lubrificação: Figura a) – Corte inferior; Figura b) x Corte mediano; Figura c) – Corte superior.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A tabela 5 apresenta os parâmetros de Rugosidade para cada corte da Figura 5.10, por meio desses valores foi possível calcular as seguintes médias, $Ra = 1,12\pm0,0945 \mu m$, $Rt = 12,47\pm0,6110 \mu m$ e Rsk = $0,52\pm0,15 \mu m$.

Parâmetro de Rugosidade	Corte inferior	Corte mediano	Corte superior
Ra	1,01 µm	1,15 µm	1,19 µm
Rt	11,8 µm	12,6 µm	13,0 µm
Rsk	0,669 µm	0,372 μm	0,509 µm

Tabela 5 – Parâmetros de Rugosidade de corpo de prova submetido a carga de 25N sem lubrificação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 5.11 apresenta os dados de perfil de ondulação referentes ao corpo de prova submetido a carga de 25 N com lubrificação.

Figura 5.11 - Perfil de ondulação da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de 25N com lubrificação: Figura a) – Corte inferior; Figura b) x Corte mediano; Figura c) – Corte superior.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A largura 1 da trilha, apresentada na Figura 5.11(a) é 0,5 mm, enquanto que a largura 3, da Figura 5.11(b) é de 1,25 mm e a largura 5, da Figura 5.11(c) é de 0,5 mm. A média

desses valores é de $0,75\pm0,43$ mm. As profundidades de desgaste são representadas pelos números 2,4 e 6 sendo, respectivamente, 3,2 µm, 3,3 µm e 3,0 µm, totalizando média de $3,17\pm0,153$ µm. Portanto, as profundidades de desgaste obtidas pelo ensaio pino sobre disco e pela perfilometria são coincidentes, o que aumenta a confiabilidade dos resultados.

Por meio das áreas de desgaste fornecidas pela perfilometria nas diferentes alturas de corte, foi possível calcular o volume de material perdido de $0,12\pm0,00083$ mm³. Além disso, os parâmetros de rugosidade apresentados na tabela 6 permitiram o cálculo da média de Ra, Rt e Rsk, que são, respectivamente, $0,54\pm0,038$ µm, $4,52\pm0,375$ µm e $0,074\pm0,34$ µm.

Tabela 6 – Parâmetros de Rugosidade de corpo de prova submetido a carga de 25N com lubrificação.

D ₂ 0.502	
κa 0,505 μm 0,552 μm	0,578 µm
Rt 4,19 μm 4,93 μm	4,45 µm
Rsk 0,181 μm 0,348 μm	-0,307 µm

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.3.1 Comparação entre os ensaios realizados

Após a análise dos dados, é possível perceber, por meio da tabela 7, que a trilha de desgaste com maior média de largura foi obtida no corpo de prova submetido a caga de 25 N a seco, seguido pelos ensaios a seco de 5 N e 10 N e pelo ensaio lubrificado de 25 N.

Tabela 7 – Média das larguras, profundidades de desgaste e volume de material perdido para cada condição ensaiada.

Condições ensaiadas	Largura	Profundidade de desgaste	Volume perdido
5N - Seco - Réplica	0,65±0,56 mm	3,33±0,764 μm	0,077±0,00065 mm ³
10N - Seco	0,62±0,16 mm	7,0±1,0 μm	0,16±0,00012 mm ³
25N - Seco	1,33±0,208 mm	25,83±3,819µm	1,92±0,002 mm ³
25N - Lub	0,75±0,43 mm	3,17±0,153	0,12±0,00083 mm ³

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Observando as médias da profundidade de desgaste da tabela 7 e a Figura 5.12, percebe-se que os maiores valores foram obtidos nos ensaios a seco com carga de 25 N, seguido por 10 N e 5 N, a menor média ocorreu no ensaio lubrificado com carga de 25 N. Por meio desses resultados conclui-se que o aumento da carga é responsável pelo aumento da profundidade de desgaste.

Além disso, a presença do lubrificante a base de grafeno é capaz de reduzir consideravelmente o desgaste, tendo em vista que o corpo de prova submetido a carga de 25N com a presença de lubrificante possuiu profundidade de desgaste aproximadamente 88% menor do que o ensaio com a mesma carga a seco.

Figura 5.12 - Vista tridimensional no Ensaio de Perfilometria: Figura a) – Corpo de prova submetido a carga de 5N sem lubrificação; Figura b) Corpo de prova submetido a carga de 10N sem lubrificação;
Figura c) Corpo de prova submetido a carga de 25N sem lubrificação; Figura d) Corpo de prova submetido a carga de 25N sem lubrificação; Figura d) Corpo de prova submetido a carga de 25N com lubrificação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Por meio da tabela 7 também é possível comparar as médias de volume de material perdido por desgaste. O ensaio a seco com carga de 25 N apresentou maior perda, seguido pelo teste de 10 N a seco, 25 N lubrificado e 5 N a seco, esse resultado reforça que o aumento da carga aumenta o desgaste, assim como a presença do lubrificante a base de grafeno contribui para a redução do mesmo. O teste com carga de 25 N lubrificado apresentou volume perdido de material aproximadamente 94% menor do que o ensaio com 25 N a seco.

A tabela 8 apresenta as médias dos parâmetros de rugosidade para uma análise comparativa, a Figura 5.13 demonstra que o apalpador do perfilômetro percorreu tanto a superfície desgastada quanto a superfície que não teve contato com o pino durante o ensaio no tribômetro, portanto os dados de rugosidade não descrevem exclusivamente a trilha de desgaste. Observando a rugosidade média Ra, pode se perceber que o maior valor encontrado foi para o ensaio a seco com 25 N, seguido pelo teste a seco com 10 N, lubrificado com 25 N e a seco com 5 N. Quando se analisa a rugosidade total Rt, ou seja, a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo, percebemos que os ensaios a seco com 25 N e 10 N seguem com os maiores valores de rugosidade, enquanto o teste a seco com 5 N e o lubrificado com 25 N permanecem com os valores mais baixos.





Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O parâmetro Rsk é capaz de analisar o formato a curva de distribuição das amplitudes das irregularidades, por meio disso pode-se perceber que os ensaios com carga de 5 N e 10 N a seco tendem a apresentar superfície com picos removidos, por outro lado, nos testes com 25 N a seco e lubrificado há a ocorrência de superfície com picos dominantes.

Comparando os dados percebe-se que valores elevados de rugosidade causam maior profundidade de desgaste e, consequentemente, maior volume de material perdido. Esses resultados contrapõem as conclusões de REIS et al (2017) que analisaram a influência da rugosidade superficial sobre o desgaste por meio de um ensaio pino sobre disco utilizando metal duro e aço SAE 4340 e concluíram que a menor taxa de desgaste ocorreu no disco de maior rugosidade.

Condições ensaiadas	Ra	Rt	Rsk
5N - Seco - Réplica	0,51±0,060 μm	5,03±1,35 μm	-0,15±0,15 μm
10N - Seco	0,65±0,033 µm	6,34±0,810 μm	-0,36±0,25 μm
25N - Seco	1,12±0,0945 µm	12,47±0,6110 µm	0,52±0,15 μm
25N - Lub	0,54±0,038 μm	4,52±0,375 μm	0,074±0,34 μm

Tabela 8 – Médias dos Parâmetros de Rugosidade para cada condição ensaiada.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

5.4 Microscopia Óptica

Após ensaio pino sobre disco, os corpos de prova passaram por microscopia óptica para análise da trilha e identificação do mecanismo de desgaste envolvido.

A Figura 5.14 apresenta a microscopia da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga normal de 10 N sem lubrificação, observa-se a presença de deformação plástica e deslocamento de parte do material para as laterais do sulco formado, o que sugere o mecanismo de desgaste abrasivo e o modo de microsulcamento.

Figura 5.14 - Microscopia Óptica com ampliação de 100x da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de 10N sem lubrificação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A microscopia da Figura 5.15 apresenta a trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de 25 N a seco. Pode se perceber a existência de deformação plástica e a formação dos sulcos devido ao desgaste abrasivo sofrido, segundo REZENDE (2010), o mecanismo de abrasão ocorre devido a presença de partículas duras que causam a perda de material ou a movimentação do mesmo, no ensaio tribológico o pino de aço SAE 52100 foi a partícula dura responsável pelo desgaste. Também é possível observar a presença de material arrancado que pode ter encruado, favorecendo o mecanismo de desgaste de adesão devido à afinidade química entre os materiais.

Figura 5.15 - Microscopia Óptica com ampliação de 200x da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de 25N sem lubrificação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A Figura 5.16 apresenta a ampliação de 200x da microscopia da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga normal de 25 N com lubrificação. É possível perceber que houve desgaste por abrasão, no entanto, a presença do lubrificante a base de grafeno faz com que menos material seja arrancado, por isso não é observado a presença de acúmulo de detritos nas bordas da trilha.

Figura 5.16: Microscopia Óptica com ampliação de 200 x da trilha de desgaste do corpo de prova submetido a carga de 25N com lubrificação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Os três corpos de prova sofreram o mecanismo de desgaste de abrasão, o desgaste adesivo, descrito por PACHECO (2021) ocorre quando uma ligação adesiva é formada entre as superfícies em contato dificultando o deslizamento entre elas e causando deformação plástica, trincas e perda de material. Essa ligação pode ter ocorrido, principalmente no ensaio com carga normal de 25 N a seco, devido à maior quantidade de material arrancado.

6. CONCLUSÃO

Por meio do ensaio pino sobre disco foi possível concluir que a presença do lubrificante a base de grafeno foi responsável pela redução do coeficiente de atrito e, consequentemente da profundidade de desgaste em todas as situações testadas. No entanto ambas as curvas apresentaram alta dispersão devido a instabilidades do sensor utilizado no tribômetro. Nas amostras lubrificadas as oscilações foram maiores, isso pode ter sido pela presença da lubrificação, fazendo com que ocorra maior dificuldade de leitura do sensor ou até mesmo por ruídos gerados na rede elétrica.

Concluiu-se por meio da perfilometria de contato que a presença do lubrificante a base de grafeno no corpo de prova submetido a carga de 25 N reduziu a profundidade de desgaste em aproximadamente 88% e o volume de material perdido em aproximadamente 94%. Além disso, valores elevados de rugosidade causaram maiores profundidades de desgaste e volume de material perdido.

A microscopia óptica da trilha de desgaste permitiu identificar a abrasão e a adesão como os mecanismos de desgaste atuantes, no entanto o aumento da carga intensifica a formação de microssulcos e o acúmulo de material arrancado nas bordas das trilhas.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISSO 4287:2002. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.

ARAÚJO, Daniel Oliveira et al. Caracterização tribológica de alumínio anodizado. Parte 2: ensaios de microabrasão. **XIV Congresso nacional de estudantes de Engenharia Mecânica**, Uberlândia, 2007.

BAIG, Nadeem; KAMMAKAKAM, Irshad; FALATH, Wail. Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. **Materials Advances**, v. 2, n. 6, p. 1821-1871, 2021.

BORDIGNON, Ricardo Zanella. **Desempenho tribológico de grafeno funcionalizado como aditivo em óleo lubrificante de baixa viscosidade**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

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

DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovanna. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. EdiPUCRS, 2007.

DIEHL, Igor Luis; DONG, Juan; ROCHA, Alexandre da Silva. Propriedades do aço AISI 4140 nitretado a gás. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, 2017.

ELLWANGER, Diego. Análise de desempenho tribológico de lubrificantes automotivos em ensaios de escorregamento metal-metal. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

FECHINE, Pierre (org.). **Avanços no desenvolvimento de nanomateriais**. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2020. E-book.

FERREIRA, Raphael Oliveira. **Caracterização microestrutural de discos metálicos de aço AISI 4140 após ensaios tribológicos do tipo pino-disco, usando pinos de alumínio 6082-T6, cobre C10200 e latão C36000**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GERDAU. Tabela de Composição Química | Gerdau Aços Especiais. **GERDAU**, 2020. Disponível em: https://www2.gerdau.com.br/blog-acos-especiais/tabela-composicao-quimica. Acesso em: 22 jun. 2022.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Butterworth-Heinemann, 2017.

LUDEMA, K.C. Friction, wear, lubrification: a textbook in tribology, CRC Press, 257 p., 1996.

MATOS, Paulo Roberto Rodrigues de. Utilização de Óleos Vegetais como Bases Lubrificantes. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MEIRELES, Agnes Batista et al. **Métodos quantitativos para o estudo do desgaste dentário**. 2014. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MORILLO, Alfredo Hugo Valença. Análise de dados experimentais da literatura sobre desgaste adesivo em aços para rodas ferroviárias. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ferroviária e Metroviária) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

NETO, José Amaro da Silva. **Sobre propriedades físicas em anéis quânticos no grafeno**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

PACHECO, Allan Pereira. **Estudo do atrito e desgaste em diferentes condições de carga e lubrificação para um conjunto pino-disco de aço 1045**. 2021. Monografia (Bacharelado em Engenharia Automotiva) – Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

PROFESSOR FELIPE. Weebly, [s.d.]. Disponível em: http://www.proffelipe.weebly.com/uploads/2/4/6/5/24652726/rugosidade.pdf. Acesso em 20 mai. 2022.

REIS, Bárbara Cristina Mendanha et al. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL (Ra) SOBRE ASPECTOS TRIBOLÓGICOS: DESLIZAMENTO DE PINO DE METAL DURO (WC-Co) SOBRE AÇO ABNT 4340 SEGUNDO A NORMA ASTM G99-05. 9° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Joinville, 2017.

REZENDE, Joao Luiz Turchetti Lara. Análise tribológica de conjugados (CrAl) N depositados por PAPVD sobre ferramentas de metal duro com diferentes rugosidades superficiais. 2010. Tese de doutorado (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RODRIGUES, Alexandre Roger et al. Estado de superfície. [s.d]. Apresentação do pdf. Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4187111/mod_resource/content/2/Te%C3%B3rica% 201%20-%20Estado%20de%20Superficie.pdf. Acesso em 20 mai. 2022.

SANTOS, Graziele Bezerra et al. Pêndulo físico amortecido por atrito seco. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.

YU, Bo et al. Tribological properties of alkylated reduced graphene oxide as lubricant additive. **Tribology International**, v. 165, p. 107273, 2022.

ZHAO, Jun et al. Two-dimensional (2D) graphene nanosheets as advanced lubricant additives: A critical review and prospect. **Materials Today Communications**, v. 29, p. 102755, 2021.



ANEXOS

































1543 µm²

7.47 µmArea of the hole

Maximum depth












Extracted profile

.....

4.5 mm





























3

2.5

3.5

Â

4.5 mm

