

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

ALEXANDRE MACEDO

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO EM PASTILHAS DE
FREIO DE CORTADORES DE GRAMA ELÉTRICOS

JARAGUÁ DO SUL

DEZEMBRO de 2022

ALEXANDRE MACEDO

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO EM PASTILHAS DE
FREIO DE CORTADORES DE GRAMA ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Alexandre Galiotto, Dr

JARAGUÁ DO SUL

DEZEMBRO de 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Macedo, Alexandre

Estudo comparativo do desempenho tribológico em pastilhas
de freio de cortadores de grama elétricos / Alexandre
Macedo ; orientação de Alexandre Galiotto. Jaraguá
do Sul, SC, 2022.

57 p.

Monografia de Especialização - Instituto Federal de
Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. Tecnologia
em Fabricação Mecânica. .

Inclui Referências.

1. Coeficiente de atrito. 2. Pastilha de freio.
3. Tribologia. I. Galiotto, Alexandre. II. Instituto Federal
de Santa Catarina. . III. Título.

ALEXANDRE MACEDO

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO TRIBOLÓGICO EM PASTILHAS DE
FREIO DE CORTADORES DE GRAMA ELÉTRICOS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

Jaraguá do Sul, 08 de dezembro de 2022.

Prof. Alexandre Galiotto, Dr.
Orientador
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU

Prof. Almir Turazi, Dr.
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU

Prof. Joel Stryhalski, Dr.
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU

Dedico este trabalho a minha esposa, por todo apoio, suporte e incentivo, principalmente nos períodos de maior esforço, que me exigiram frequentes ausências do convívio com nossa família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, detentor de toda sabedoria.

A minha esposa e filhos, que serviram de inspiração proporcionando todo esforço dedicado nesses anos de estudos.

Ao meu professor orientador Dr. Alexandre Galiotto, pela pronta disponibilidade e por todo aprendizado compartilhado nesse trabalho.

Aos meus colegas de trabalho Edemar Klein e Samir Grifante pelas orientações e materiais disponibilizados para realização deste trabalho.

Ao meu amigo André Felipe Vogel pela ajuda nas traduções.

Ao professor Msc. Giovani Conrado Carlini pela ajuda no laboratório de usinagem.

E a todos os professores através dos quais tive a honrada oportunidade de ser instruído, contribuindo muito para minha formação.

Muito obrigado!

Se você quer chegar onde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.

(Bill Gates)

RESUMO

Com o aumento das exigências relacionadas à segurança, sejam em máquinas, ou em equipamentos de pequeno porte como eletrodomésticos, têm se buscado desenvolver mecanismos de desarme e/ou frenagem cada vez mais eficientes. Em caso de emergência, quanto antes o equipamento for desligado ou tiver seu movimento cessado, maiores são as chances de evitar acidentes. Em muitos sistemas de frenagens, são utilizadas pastilhas de freio constituídas de materiais compósitos. Esse tipo de pastilha é amplamente utilizada pois, ao alterar seus constituintes, é possível aumentar a eficiência de frenagem sem alterar suas características dimensionais. Desta forma, pode-se utilizar a mesma pastilha de freio em vários modelos do mesmo equipamento. O grande desafio, é desenvolver fórmulas que alcancem o coeficiente de atrito necessário para cada aplicação. O presente trabalho tem como objetivo avaliar as características tribológicas em 4 pastilhas de freio com formulações diferentes, com intuito de identificar qual destas possui o maior coeficiente de atrito. Os ensaios foram realizados em tribômetro de pino-sobre-disco para avaliação do coeficiente de atrito e desgaste (através de cálculo de volume de material removido). Como as formulações das pastilhas tratam-se de segredo industrial, os ensaios de dureza, avaliação dimensional e a Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foram realizados com objetivo de auxiliar na análise dos resultados. Os resultados indicam que o maior valor médio de coeficiente de atrito entre as pastilhas de freio e a esferas de aço foram da pastilha 3 (F3), e o par tribológico (pastilha de freio e esfera de aço), da formulação 2 (F2), tiveram o menor valor de desgaste.

Palavras-Chave: Coeficiente de atrito. Pastilha de freio. Tribologia.

ABSTRACT

With the increase in safety-related requirements, whether in machines or small types of equipment such as household appliances, efforts have been made to develop more efficient tripping and/ or braking mechanisms. In an emergency, the sooner the equipment is turned off or stops moving, the greater the chances of avoiding accidents. Many braking systems use brake pads made out of composite materials. This type of pad is widely used. After all, changing its constituents makes it possible to increase braking efficiency without altering its dimensional features. Therefore, the same brake pad can be used in several models of the same equipment. The main challenge is to develop formulas that reach the necessary friction coefficient for each application. The present research aims to evaluate the tribological characteristics of 4 brake pads with different formulas to identify which one has the highest friction coefficient. The tests were carried out in a pin-on-disk tribometer to evaluate the coefficient of friction and wear factor (by calculating the volume of material removed). Given that the formulas are not available to the public, the hardness tests, dimensional evaluation, and Scanning Electron Microscopy Analysis (SEM), were carried out to assist in the analysis of the results. The results indicate that the highest average value of the coefficient of friction between the brake pads and the steel balls was from pad 3 (F3), and the tribological pair (brake pad and steel ball) from formulation 2 (F2) had the lowest wear value.

Keywords: Coefficient of friction. Brake pad. Tribology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forças atuantes em um bloco representado o atrito estático.....	17
Figura 2 - Forças atuantes em um bloco representado o atrito cinético.....	17
Figura 3 - Freio de cinta.....	20
Figura 4 - Freio a disco.....	20
Figura 5 - Freio a tambor.....	21
Figura 6 - Freio eletromagnético.....	21
Figura 7 - Pastilhas de freio.....	27
Figura 8 - Prensa térmica para embutimento e Politriz para lixamento e polimento...28	
Figura 9 - Microdurômetro.....	29
Figura 10 - Tribômetro do IFSC.....	30
Figura 11 - Exemplo de gráfico de coeficiente de atrito.....	31
Figura 12 - Fixação do corpo de prova.....	32
Figura 13 - Peça da máquina onde a pastilha é acoplada.....	32
Figura 14 - Etapas de fabricação do dispositivo e conjunto montado.....	33
Figura 15 - Diâmetro da pista.....	34
Figura 16 - Balança de precisão.....	35
Figura 17 - Conjunto montado.....	35
Figura 18 - Baro-termo-higrômetro.....	38
Figura 19 - Fibras aglomeradas na estrutura da pastilha F1.....	45
Figura 20 - Fibras aglomeradas e espaços vazios.....	46
Figura 21 - Estrutura lamelar (grafite).....	46
Figura 22 - Fibra de vidro.....	47
Figura 23 - Materiais de composição química diferentes.....	47
Figura 24 - Análise EDS pastilha F1.....	48
Figura 25 - Fibras aglomeradas na estrutura da pastilha F2.....	48
Figura 26 - Fibras orgânicas e borracha.....	49
Figura 27 - Comp. morfologia lamelar (silicato de magnésio), e fibras orgânicas.....	49
Figura 28 - Compostos inorgânicos (óxidos e silicatos) na estrutura da pastilha F2...50	
Figura 29 - Análise EDS pastilha F2.....	50
Figura 30 - Compostos inorgânicos (óxidos e silicatos) na estrutura da pastilha F3...51	
Figura 31 - Morfologia lamelar (silicato de magnésio) na pastilha F3.....	51
Figura 32 - Análise EDS pastilha F3.....	52
Figura 33 - Pontos brancos (óxidos e silicatos).....	52
Figura 34 - Morfologia lamelar (silicato de magnésio) na pastilha F4.....	53
Figura 35 - Compostos inorgânicos (óxidos e silicatos) na pastilha F4.....	53
Figura 36 - Morfologia lamelar (silicato de magnésio) na pastilha F4.....	54
Figura 37 - Análise EDS pastilha F4.....	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Coeficiente de atrito médio da pastilha F1.....	37
Gráfico 2 – Coeficiente de atrito médio da pastilha F2.....	37
Gráfico 3 – Coeficiente de atrito médio da pastilha F3.....	37
Gráfico 4 – Coeficiente de atrito médio da pastilha F4.....	37
Gráfico 5 – Comparativo de coeficiente de atrito entre as pastilhas.....	38
Gráfico 6 – Desgaste das pastilhas.....	39
Gráfico 7 – Densidade das pastilhas.....	39
Gráfico 8 – Desgaste das esferas.....	40
Gráfico 9 – Espessura das pastilhas.....	41
Gráfico 10 – Diâmetro externo das pastilhas.....	42
Gráfico 11 – Diâmetro interno das pastilhas.....	42
Gráfico 12 – Dureza das pastilhas.....	43
Gráfico 13 – Dureza das esferas.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

IEC - International Electrotechnical Commission

ASTM - American Society for Testing Materials

V – Volt

mm – Milímetros

m/s – Metros por segundo

Km/h – Quilômetros por hora

m/s² - Metros por segundo ao quadrado

mm³ - Milímetros cúbicos

g – Gramas

g/cm³ - Gramas por centímetros cúbicos

m – Metros

D – Diâmetro

V – Voltas

N – Newton

°C – Graus Celsius

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

EDE - Espectroscopia por dispersão de energia

RPM – Rotações por minuto

HV – Dureza Vickers

µm – Micrômetro

C – Carbono

O – Oxigênio

Si – Silício

Al – Alumínio

Ca – Cálcio

Fe – Ferro

Mg – Magnésio

K – Potássio

Ba – Bário

Na – Sódio

S – Enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivos.....	14
1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivo específico.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Tribologia.....	16
2.2 Atrito.....	16
2.3 Coeficiente de atrito.....	17
2.4 Desgaste.....	19
2.5 Sistemas de freio.....	19
2.6 Pastilhas de freio e materiais de atrito.....	21
2.7 Estudos relacionados ao tema.....	24
3 DESENVOLVIMENTO.....	27
3.1 Materiais.....	27
3.1.1 Pastilhas de freio.....	30
3.2 Métodos.....	28
3.2.1 Ensaio de microdureza nas esferas.....	28
3.2.2 Ensaio dimensional das pastilhas.....	29
3.2.3 Ensaio Shore D.....	29
3.2.4 Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura.....	29
3.2.5 Ensaio pino-sobre-disco.....	30
3.2.5.1 Dispositivo para ensaio.....	31
3.2.5.2 Parâmetros do ensaio.....	33
3.2.5.3 Preparação das amostras.....	34
4 Análise e discussão dos resultados.....	37
4.1 Coeficiente de atrito.....	37
4.2 Desgaste.....	38
4.3 Ensaio dimensional.....	41
4.4 Dureza.....	43
4.5 Análise de microscopia eletrônica de varredura.....	45
4.5.1 Pastilha F1.....	45
4.5.2 Pastilha F2.....	48
4.5.3 Pastilha F3.....	51
4.5.4 Pastilha F4.....	52
5 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

Em 29 de dezembro de 2009, o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, lançou a portaria número 371 (INMETRO, 2009). Esta portaria estabelece os critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade de Aparelhos Eletrodomésticos e Similares, com foco nos requisitos de segurança, visando prevenir acidentes de consumo e proteger os consumidores em relação aos riscos elétricos, mecânicos, térmicos, fogo e radiação dos aparelhos. Esta portaria afirma que aparelhos eletrodomésticos e similares, cuja tensão nominal não seja superior a 250 V para aparelhos monofásicos, e 480 V para outros aparelhos, devem atender aos requisitos da norma ABNT NBR NM 60335-1 ou IEC 60335-1 – Requisitos Gerais, e das normas de requisitos particulares da série ABNT NBR NM 60335-2-X ou IEC 60335-2-X.

Das normas citadas acima, a norma IEC 60335-2-77 (IEC, 2002), por sua vez, trata da segurança de cortadores de grama elétricos, projetados principalmente para uso doméstico ou para fins semelhantes, com tensão nominal não superior a 250 V monofásicos.

A referida norma é abrangente, e especifica pontos importantes que devem ser considerados na construção do aparelho supracitado. Dentro do tópico 20.103 onde especifica os requisitos para cortadores rotativos, no subtópico 20.103.2.1 diz: “*Em aparelhos com largura de corte de até 600 mm inclusive, os meios de corte devem parar de sua velocidade máxima de rotação dentro de 3 segundos após o operador soltar os controles*” (IEC, 2002). Ou seja, as máquinas de cortar grama para uso doméstico que possuam os elementos cortantes (as facas como são geralmente denominadas), onde o comprimento total entre as extremidades for de 600mm, ao ser desligada, deve ter um sistema de frenagem que faça com que as facas parem de girar em até 3 segundos.

Com base nessa determinação, os fabricantes de cortadores de grama elétricos começaram o processo de inclusão ou revisão dos sistemas de freio dessas máquinas, para que atendessem aos requisitos da norma IEC 60335-2-77 (IEC, 2002).

Dentro da série de potências comercializadas no mercado, as dificuldades de adequação foram nas máquinas de maior potência que, combinados com as maiores facas, possuem o maior valor de inércia, o que dificulta a frenagem do

sistema dentro do valor estipulado pela norma (3 segundos). Nos ensaios previamente realizados com as pastilhas já existentes, em determinada máquina foi possível frear a faca no tempo estipulado, porém o mesmo resultado não foi atingido quando foi substituído a máquina por outra com a mesma especificação (mesma potência e com o mesmo sistema de freio). Em outros casos, no início dos ensaios foi conseguido atender ao especificado, porém depois de algumas repetições, o mesmo sistema não conseguiu manter o desempenho inicial, não conseguindo frear as facas no tempo especificado.

Devido a estas inconstâncias, o sistema de freio da referida máquina passou por um processo de reavaliação, e as propostas de alterações iniciaram pelas pastilhas de freio. Como estas são produzidas em materiais compósitos (que é a união de dois ou mais materiais com o objetivo de se obter um produto com características ótimas de cada componente da formulação), e o fato de possuírem sua geometria já definida e condicionada ao sistema, o fato de alterar a formulação, não altera sua geometria e conseqüentemente é mantido o escopo do projeto.

O fabricante das pastilhas então propôs alterações na formulação da pastilha atual, sendo produzidas outras três formulações alternativas e disponibilizadas para serem avaliadas.

Existe a possibilidade de alteração de outros parâmetros ou componentes do sistema de frenagem projetado para a determinada máquina, mas devido à complexidade do sistema, optou-se por iniciar os estudos pelas pastilhas de freio.

Assim, o presente trabalho, traz uma avaliação tribológica realizada nas pastilhas de freio que compõem o sistema de frenagem de máquinas de cortar grama indicando qual possui o maior coeficiente de atrito.

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

- Comparar coeficientes de atrito e o desgaste em pastilhas de freio de cortadores de grama elétricos com diferentes composições.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar as dimensões das pastilhas comparando o especificado com o produzido.
- Identificar os constituintes e sua distribuição no interior das pastilhas com a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV),
- Medir a dureza das pastilhas e das esferas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tribologia

A definição de tribologia segundo o dicionário é o *“estudo da interação entre superfícies em movimento relativo e das aplicações associadas, tais como lubrificação, desgaste e atrito, bem como suas implicações na biomecânica e no projeto de peças móveis de máquinas”* (MICHAELIS, 2022). A origem do termo é grega, derivante da palavra Τριβο (tribos), que significa esfregar, e sua tradução literal seria *“ciência da fricção”*.

A tribologia está ligada diretamente com a história do ser humano, segundo Bushan (2013, p.1) *“registros mostram o uso de rodas de 3500 AC, o que ilustra a preocupação de nossos ancestrais com a redução do atrito no movimento de translação”*. E está presente no nosso cotidiano sem que muitas vezes nos damos conta. O ato de barbear exemplifica isso, onde o creme de barbear serve de lubrificante para diminuir o atrito entre a lâmina e a pele proporcionando assim, menor desconforto ao deslizar o barbeador.

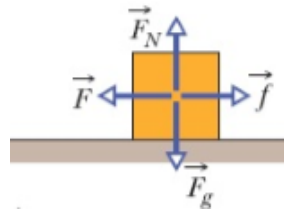
2.2 Atrito

O atrito é um fenômeno inevitável, está condicionado na maioria das ações que acontecem no nosso dia a dia.

Livramento (2017 apud ABINOWICZ 1995), descreve o atrito como *“resistência ao movimento que existe quando um corpo se move tangencialmente em relação a uma superfície de contato, ou quando há uma tentativa de se produzir movimento”*. Ou seja, sem o atrito, ações como caminhar, escrever ou andar de bicicleta seriam impossíveis de acontecer.

Conforme Halliday (2016), existem dois tipos de atrito, o estático e o cinético. As ilustrações abaixo ajudam a explicar esses tipos de atrito. Na Figura 1, estão representadas as forças atuantes no bloco. A força gravitacional “ F_g ” está sendo equilibrada pela força normal “ F_N ”, e a força “ F ” que tende a puxar o bloco para esquerda, está sendo equilibrada pela força de atrito “ f ”. Como todas as forças estão em equilíbrio, o bloco permanece imóvel e a força “ f ” é chamada de força de atrito estático.

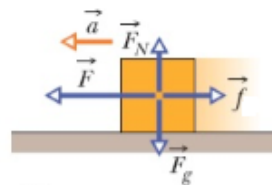
Figura 1 – Forças atuantes em um bloco representando o atrito estático



Fonte: HALLIDAY (2016)

Na Figura 2, as mesmas forças estão representadas, porém, a força “F” tem sua intensidade aumentada a ponto de mover o bloco para esquerda, com isso, a força “f” passa a ser a força de atrito cinético.

Figura 2 – Forças atuantes em um bloco representando o atrito cinético



Fonte: HALLIDAY (2016)

A intensidade da força de atrito cinético que age sobre o objeto em movimento, é menor que a intensidade máxima da força de atrito estático, que age sobre o objeto em repouso. Assim, para que o objeto se mova em velocidade constante, provavelmente você terá que diminuir a intensidade da força aplicada depois que o objeto começa a se mover. (HALLIDAY, 2016)

2.3 Coeficiente de Atrito

O atrito tem sua grandeza representada através do coeficiente de atrito, que é a relação entre força de atrito e força normal, que conforme Bayer (2004, p. 10), é representado pela Equação 1 abaixo:

$$\mu = \frac{F}{F_N} \quad (1)$$

Onde:

μ = coeficiente de atrito

F = força de atrito

F_N = força normal

Três propriedades estão ligadas à força de atrito.

Quando todas as forças estão em equilíbrio, e o corpo não se move paralelamente sobre a superfície, temos o coeficiente de atrito estático (μ_e).

Quando uma determinada força externa é aplicada no corpo, surge a força de atrito estático (F_e), que possui um valor máximo ($F_{emáx}$). Quando a força externa ultrapassa o $F_{emáx}$, o corpo se move, com isso, a força máxima de atrito é proporcional à força normal (F_N), e também ao coeficiente de atrito estático (μ_e). Segundo Tipler (2013, 20 p. 127), esta relação é representada pela Equação 2 abaixo:

$$F_{emáx} = \mu_e * F_N \quad (2)$$

Onde:

$F_{emáx}$ = força de atrito estático

μ_e = coeficiente de atrito estático

F_N = força normal

Com o corpo em movimento a força de atrito reduz e surge a força de atrito cinético ou dinâmico (F_c), e começa também a ter o coeficiente de atrito cinético ou dinâmico (μ_c). A velocidade constante do movimento depende da aplicação de uma força de magnitude igual e oposta à força de atrito cinético, causada pela superfície em repouso. Ou seja, F_c é proporcional à força normal, F_n , exercida por uma superfície sobre outra. Tipler (2013, p. 127), descreve essa relação com a equação 3 abaixo:

$$F_c = \mu_c * F_N \quad (3)$$

Onde:

F_c = força de atrito cinético

μ_c = coeficiente de atrito cinético

F_N = força normal

Hallyday (2016), explica que os coeficientes de atrito (μ_e e μ_c), são adimensionais e precisam ser definidos por meio de experimentos. Como os valores estão ligados às propriedades dos dois materiais que estão em contato, a descrição dos resultados costuma ser seguidos pela preposição “entre”. Ex.: O valor do coeficiente de atrito entre o pino e o disco é de 0,5.

2.4 Desgaste

Uma definição atual para desgaste conforme Teixeira (211 apud CRNKOVIC, 2004) é a “remoção não necessária de material por ação química ou mecânica”.

Conforme Eyre (1976), os tipos de desgaste são classificados conforme abaixo:

- Desgaste por abrasão: É o desgaste por retirada de material, causado por saliências duras ou partículas duras.
- Desgaste por deslizamento: É o tipo de desgaste que acontece por transferência de material de uma superfície para outra.
- Desgaste por erosão: É quando ocorre a perda de material de uma superfície sólida, devido ao movimento de impacto.
- Desgaste químico: É o desgaste causado por reações químicas ou eletroquímicas.
- Desgaste por fadiga: É quando ocorre a remoção de material da superfície, proveniente da variação cíclica da carga.

2.5 Sistemas de freio

Freios são dispositivos que foram desenvolvidos para permitir o controle do movimento de rotação da roda de um veículo, de uma máquina ou equipamento, de modo a retardar ou mesmo interromper esse movimento e também impedir que o movimento seja reiniciado. (DIULGHEROGLO, PEDRO A. 2010 p. 11).

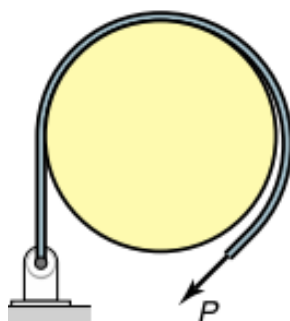
A roda veio para ajudar e facilitar a vida do homem, porém, logo inicia-se o problema de interromper o movimento. Assim, os primeiros sistemas de frenagem eram rudimentares, com sistemas de alavanca com pivotagem, montado a uma sapata de madeira na outra extremidade junto à roda,

proporcionando assim o ato de frenagem. (DIULGHEROGLO, PEDRO A. 2010).

Ao longo dos anos, foram criados novos sistemas que possibilitam melhor desempenho no ato de frear e/ou reduzir a velocidade de automóveis ou de elementos girantes em máquinas. Abaixo uma descrição breve de alguns sistemas atuais.

Freio de cinta: conforme Figura 3, nestes freios o tambor que se pretende frear é envolvido por uma cinta que, normalmente tem uma das extremidades fixa, e a outra extremidade está sujeita à aplicação da força de frenagem (MIMOSO, 2011 p.15).

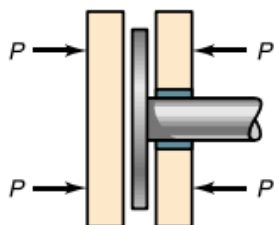
Figura 3 – Freio de cinta



Fonte: (ALMEIDA, 2022)

Freio a disco: conforme Figura 4, a frenagem é feita pelo contato das pastilhas de freio com o disco, que por sua vez provoca a desaceleração das rodas.

Figura 4 – Freio a disco



Fonte: (ALMEIDA, 2022)

Freio a tambor: Substitui os discos por tambores ou “panelas” de freio acoplados ao interior da roda. A Figura 5 mostra que, apesar de ser parecido

com o freio a disco, seu acionamento em veículos leves é feito por meio de alavancagem, com o fluido hidráulico movimentando os calipers e as sapatas contra a parede interna do tambor.

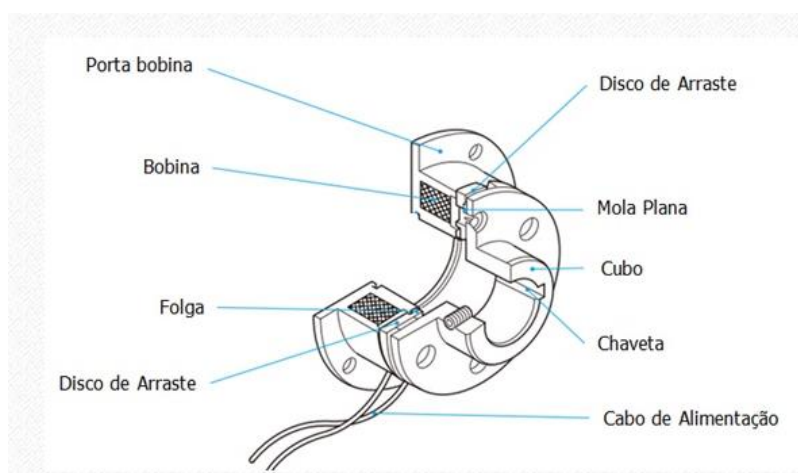
Figura 5 – Freio a tambor



Fonte: (ALMEIDA, 2022)

Freio eletromagnético: A bobina do freio eletromagnético forma junto com o bloco de aço o eletroímã que quando energizado, gera um campo magnético que atrai o disco flutuante com mais força que a mola de compressão, puxando-o com maior intensidade e abrindo um pequeno espaço para que todos os componentes girem livremente. A Figura 6 mostra os detalhes deste sistema de freio.

Figura 6 – Freio eletromagnético



Fonte: (TECKNO-FREIO, 2022)

2.6 Pastilhas de freio e materiais de atrito

Materiais de atrito em pastilhas de freio, são combinações complexas,

envolvendo diferentes matérias primas e na grande maioria, são mantidas em segredo industrial (CANALI, 2002, p. 6)

A reprodução de um determinado material de atrito sem o conhecimento prévio da sua fórmula e processo de fabricação é pouco provável pois, mesmo que se possa determinar o percentual de determinados componentes químicos presentes no material, não se pode determinar com segurança as matérias primas que o compõe, sem descobrir o processo de fabricação a que foram submetidas e que tipos de reações e combinações químicas ocorreram. (CANALI, 2002, p. 6)

A composição básica das pastilhas de freios, conforme Limpert, (1992 p. 68), devem conter os seguintes componentes: Fibras, material de preenchimento, ligantes e modificadores de atrito. A função e respectiva importância desses componentes na formulação das pastilhas foi descrita por Lombriller (2002, p. 29).

a) Fibras: responsável pela austeridade da pastilha, também é responsável pela estabilidade térmica em casos de alta temperatura. Algumas fibras utilizadas hoje são fibra acrílica, fibra de carbono, limalha de latão, lã de cobre, lã de rocha, entre outras.

b) Material de preenchimento: São minerais que tem como objetivo preencher os espaços aumentando assim a vida útil da pastilha. Esses minerais podem ser:

Sulfato de bário – mineral de baixo custo, mas que possui alta densidade específica. Aumenta o desgaste e a densidade, porém reduz o atrito. É inerte e tem alta estabilidade térmica.

Carbonato de cálcio – Necessário pouca quantidade, pois tem baixa densidade. Pouco resistente ao calor.

Dióxido de silício – é abrasivo podendo aumentar o atrito em 5%.

Ligantes ou aglutinantes: A principal função é manter a união dos componentes da pastilha. As principais resinas são:

Resinas crisol – São duras e quebradiças, porém resiste melhor ao calor.

Resina novolak – Necessário um segundo componente para completar a cura.

Resinas de óleo modificado (linhaça, rícino ou soja) – contribuem para a flexibilidade e melhoram o atrito.

Resinas de óleo da casca da castanha de caju – melhoram a eficiência e proporcionam uma frenagem mais silenciosa.

Resinas fenólicas modificadas por elastômeros – contribuem com a flexibilidade e com o coeficiente de atrito.

Resinas fenólicas modificadas por óxidos metálicos – aumentam a resistência ao calor e reduzem o tempo de cura.

Resinas fenólicas modificadas por ácido bórico – aumentam a resistência ao calor e limitam o desgaste.

c) Modificadores de atrito: Usualmente são elastômeros, que propiciam propriedades mecânicas e resistência ao desgaste, também são agentes de cura e afetam a uniformidade do atrito. Com intuito de melhorar o atrito, alguns abrasivos são adicionados. Os elastômeros mais utilizados são:

Borracha de estireno butadieno – utilizada concomitantemente com resinas fenólicas. Oferece rigidez e força adicional.

Borracha de acrilonitrila butadieno – Utilizada pura ou concomitante com resinas fenólicas. Melhora a resistência ao calor que outras borrachas. Auxilia na eficiência e na compressão contra a superfície oposta.

Alguns abrasivos que são adicionados:

Óxido de alumínio anidro – Conhecida como alumina, é um material duro e bastante abrasivo. Tem boa estabilidade em altas temperaturas.

Óxido de cromo – Aumenta o atrito. Pouco utilizado devido ao elevado custo.

Óxido de zinco – Tem leve efeito lubrificante e apresenta boa resistência ao desgaste.

Hidróxido de cálcio – Conhecido como cal. Boa dureza e quando utilizado concomitantemente com palha de aço e partículas de ferro, ajuda no combate a oxidação. Ajuda na estabilidade térmica de algumas resinas, reduz a dilatação e absorve gases no processo de cura, reduzindo as laminações necessárias.

Óxido de cobre – melhora o atrito, porém, pode danificar a superfície do disco.

Óxido de ferro – Melhora o nível de atrito e proporciona estabilidade térmica. Utilizados também para alterar a cor.

Óxido de ferro vermelho – leve abrasivo, utilizado como agente polidor.

Óxido de ferro preto – utilizado na fórmula de semi-metálico melhora o

atrito a frio.

Óxido de magnésio – Melhora a estabilidade térmica. Quando utilizado no estado fundido, melhora o nível de atrito.

Lascas de latão – Melhora a condutividade térmica, ajuda a propagar o calor gerado na superfície contribuindo para vida útil da pastilha.

Pó de cobre – melhora a eficiência da pastilha, mas quando utilizado em grandes quantidades, provoca desgaste.

2.7 Estudos relacionados ao tema

Barros (2018), realizou um estudo avaliando a influência do cobre no desempenho de pastilhas de freio. Em seu trabalho, foi avaliado o comportamento tribológico em três formulações.

Formulação 1 – material sem a presença de cobre na formulação.

Formulação 2 – Material com 10% de cobre em sua formulação.

Formulação 3 – Material com 30% de cobre em sua formulação.

Os parâmetros do ensaio foram:

Velocidade de deslizamento inicial e final de 8,05 m/s e 4,02 m/s respectivamente, com tempo de 6 segundos. Esses valores simulam uma caminhonete desacelerando de 80 para 40 km/h.

Força nominal de 500 N que representa o valor típico da pressão empregada em sistema de freio a disco automotivo. Com 500 repetições, que possibilitam o desgaste necessário para a realização da técnica escolhida. O único parâmetro que alterou entre os ensaios foi a temperatura do disco, que variou entre 100, 200 e 300°C. Cada configuração foi ensaiada 3 vezes, totalizando 27 ensaios.

Na conclusão dos ensaios, dentre os fatos observados, 2 pontos destacam-se:

A pastilha com ausência de cobre apresentou valores de coeficiente de atrito mais elevados do que as pastilhas que continham este componente nas suas formulações. A pastilha com 10% de cobre, nas três temperaturas testadas, apresentou maior desgaste comparando com as demais pastilhas.

Roman (2021), avaliou o comportamento de desgaste introduzindo fibra

de aço na composição de lonas de freio. Foram fabricados dois lotes de lonas de freio, adicionando 25% de fibra de aço em um dos lotes. Os parâmetros do ensaio seguiram a norma ISO 26866, que diz que o ensaio deve ser realizado em duas etapas.

500 frenagens nas temperaturas de 120°C e 180°C.

250 frenagens nas temperaturas de 230°C, 290°C e 340°C.

A velocidade inicial foi de 60 Km/h, e a pressão de frenagem utilizada foi aquela necessária para atingir uma desaceleração de 3 m/s² durante a frenagem. Na conclusão, destaca-se o fato de que com a adição de fibra de aço na composição do material, houve uma redução significativa na taxa de desgaste, especialmente a partir de 230°C.

Jova (1999), desenvolveu 11 diferentes formulações com fibra de PANOX®, polpa de aramida, resina fenólica, carga mineral e diferentes percentuais de aditivos, com a finalidade de obter um compósito com características próximas ao produzido comercialmente, para serem usados em guarnições de freios automotivos.

Foram feitos os ensaios de: Densidade relativa dos compósitos, resistência ao cisalhamento, dureza, determinação do coeficiente de atrito, ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura e Calorimetria Diferencial de Varredura.

Após conclusão e avaliação dos ensaios, os principais pontos constatados são:

Compósitos reforçados com fibras de PANOX® e polpa de aramida apresentaram bom desempenho de atrito. No ensaio de microscopia eletrônica de varredura, os compósitos reforçados com polpa de aramida apresentam uma distribuição mais uniforme que os reforçados com PANOX®. Todos os compósitos apresentaram altos valores de resistência ao cisalhamento. Os compósitos aditivados com alumina apresentam maiores valores de dureza. Os compósitos com 80% de barita na formulação, não constituem uma boa proposta, devido ao aumento no desgaste das peças e conseqüentemente menor tempo de vida útil.

A alumina e a barita fazem aumentar os valores do coeficiente de atrito e o desgaste no material. Os compósitos aditivados com alumina e grafite, apresentam bom desempenho de atrito aumentando a vida útil do material. Os

compósitos apresentaram valores estáveis de coeficiente de atrito e, em consequência, um comportamento uniforme da temperatura.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Materiais

3.1.1 – Pastilhas de freio.

Na formulação das pastilhas, tanto da já existente como nas novas que foram desenvolvidas para este estudo, contém os seguintes componentes:

Fibra celual, fibra de vidro, fibra cerâmica, lã de rocha, lã de vidro e limalha de latão, barita, caulim ventilado, resina fenólica, borracha nitrílica, óxido de alumínio, alumina calcinada, kewlan, pó de caju, grafite, vermiculita e pó de borracha.

As pastilhas são constituídas dos mesmos componentes, porém, a quantidade de cada componente utilizado em cada formulação não foi informada pelo fabricante, pois trata-se de segredo industrial. O processo produtivo foi descrito parcialmente pelo fabricante, as informações recebidas tratam apenas da prensagem dos componentes. Segue descrição deste processo: *“Prensagem a quente na temperatura de 150 graus Celsius, em prensa com carga de 180 toneladas. Com 5 ciclos de degasagem e 5 minutos tempo final.”*

As amostras doravante serão denominadas de F1, F2, F3 e F4. A vogal “F” significa formulação, e os numerais servem para distinguir umas das outras. A pastilha F1 é a já existente, e as demais foram fabricadas utilizando as novas formulações. As pastilhas são apresentadas abaixo na Figura 7.

Figura 7 – Pastilhas de freio



Fonte: Próprio autor (2022)

3.2 Métodos

3.2.1 – Ensaio de microdureza nas esferas.

Para a função do pino, foram utilizadas esferas comerciais com 10 mm de diâmetro, em aço temperado 4140. O ensaio de microdureza se faz necessário para avaliar se as esferas estão atendendo a especificação da norma ASTM G99-5 (ASTM, 2004).

A preparação metalográfica das esferas, (embutimento, lixamento e polimento), foi realizada no laboratório de ensaio de materiais do IFSC. A Figura 8 mostra os equipamentos utilizados nesse processo.

Figura 8 – Prensa térmica para embutimento e Politriz para lixamento e polimento



Fonte: Próprio autor (2022)

O ensaio foi realizado no Microdurômetro (Figura 9), alocado no laboratório de ensaios do IFSC.

Figura 9 – Microdurômetro



Fonte: Próprio autor (2022)

3.2.2 – Ensaio dimensional das pastilhas.

Para realização do ensaio dimensional, foram definidos os seguintes pontos de medição: Na espessura a medição foi realizada em 5 pontos da pastilha, e para os diâmetros internos e externos, foi definido 3 pontos de medição. O ensaio foi realizado com micrômetro para medição da espessura e paquímetro para os diâmetros. Ambos aparelhos digitais.

3.2.3 – Dureza Shore D

O ensaio de dureza Shore D foi realizado em laboratório privado, sendo disponibilizado apenas ao relatório final, onde diz que o ensaio de dureza foi realizado em 5 regiões diferentes das pastilhas.

3.2.4 - Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Assim como o ensaio de dureza Shore D, a análise MEV foi realizada em laboratório privado, tendo acesso apenas ao relatório. Para a realização deste ensaio, o relatório diz que as amostras foram tracionadas em uma máquina universal de ensaios, e a região da fratura foi analisada.

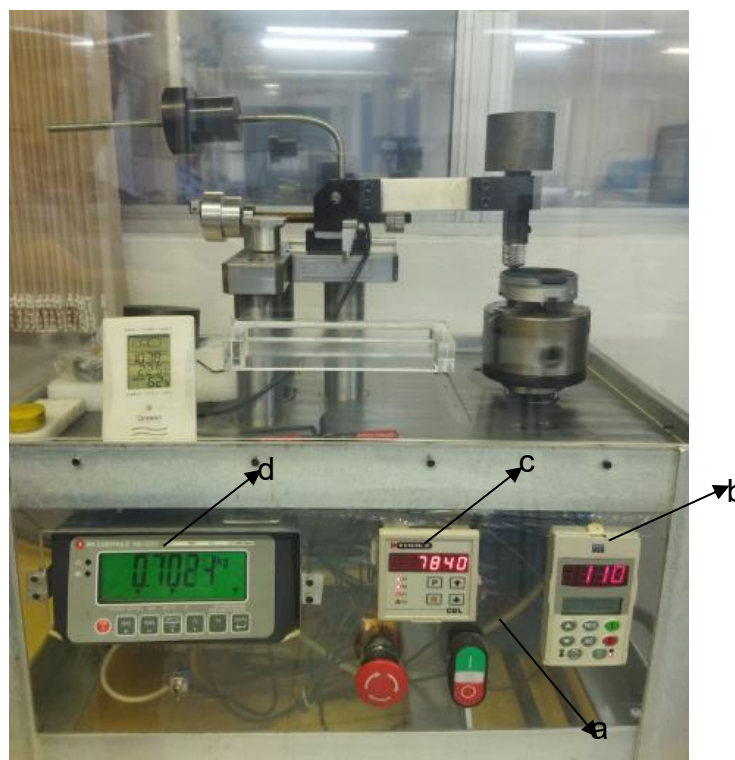
3.2.5 – Ensaio pino-sobre-disco

Através deste ensaio, é possível extrair os valores de coeficiente de atrito e de desgaste das pastilhas.

A metodologia deste ensaio é descrita pela norma ASTM G99-5 (ASTM, 2004), que cita pontos importantes que devem ser considerados no ensaio, como a forma de preparação das amostras, equações para cálculos de perda de massa, entre outros.

Os ensaios foram realizados no tribômetro (Figura 10), desenvolvido no IFSC de Jaraguá do Sul, Campus Rau. Este tribômetro é equipado com um motor de indução (a), inversor de frequência (b), contador de voltas (c), e com uma célula de carga com indicador digital (d).

Figura 10 – Tribômetro do IFSC

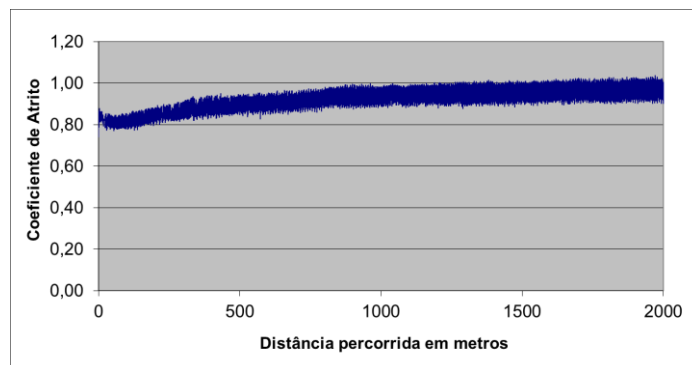


Fonte: Próprio autor (2022)

Os dados do coeficiente de atrito são adquiridos da seguinte forma: O sinal da célula de carga é tratado por um condicionador de sinais, que possui um mostrador digital e saída tipo RS232. A taxa de coleta é de 9,95 leituras por segundo. Os dados são enviados ao software RS 232 Data Logger freeware

versão 2.7, posteriormente são exportados em formato de texto, e inseridos em uma planilha eletrônica para geração dos gráficos de coeficiente de atrito. Na Figura 11 abaixo, um exemplo de gráfico extraído de um dos ensaios realizados.

Figura 11 – Exemplo de gráfico de coeficiente de atrito



Fonte: Próprio autor (2022)

A norma ASTM G99-5 (ASTM, 2004) especifica que os valores de desgaste devem ser apresentados em forma de perda de volume e as grandezas em milímetros cúbicos, tanto para o disco (no caso a pastilha), como para o pino. Para isso, faz-se necessário utilizar a Equação 4 abaixo:

$$Perda\ de\ volume\ (mm^3) = \frac{Perda\ de\ massa\ (g)}{Densidade\ \left(\frac{g}{cm^3}\right)} \times 1000 \quad (4)$$

Para definição da densidade da pastilha e da esfera, foi utilizada a Equação 5 abaixo:

$$Densidade = \frac{massa\ (g)}{volume\ (mm^3)} \quad (5)$$

Para obtenção dos valores de volume, foi utilizado o software Solidworks, que calcula o volume através do modelamento 3d das amostras.

3.2.5.1 – Dispositivo para ensaio.

O tribômetro onde os ensaios foram realizados, é equipado com uma

placa de três castanhas para fixação do corpo de prova. Esta placa permite a fixação de corpo de prova com formato cilíndrico, composto de um material capaz de suportar esforços mecânicos conforme demonstrado na Figura 12 abaixo.

Figura 12 – Fixação do corpo de prova



Fonte: Neuber (2017)

Devido a geometria das pastilhas de freio, houve dificuldade de fixação destas na placa de três castanhas do tribômetro, sendo necessário a fabricação de um dispositivo para fixação das mesmas.

Para isso partiu-se de uma peça do próprio cortador de grama (Figura 13), onde a pastilha é acoplada.

Figura 13 – Peça da máquina onde a pastilha é acoplada



Fonte: Próprio autor (2022)

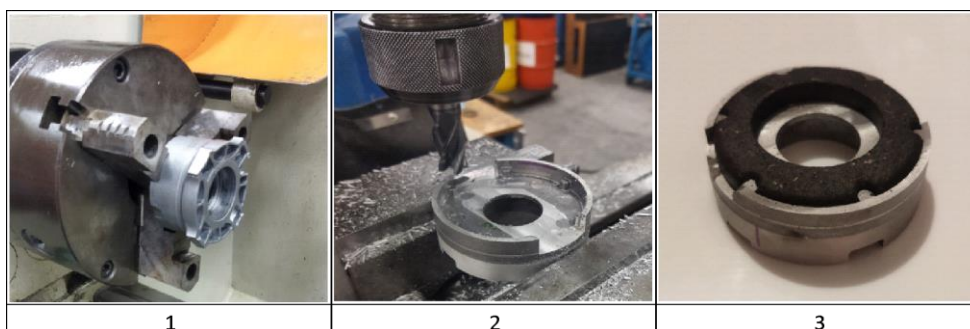
A Figura 14 ilustra as principais etapas de fabricação e o conjunto montado. A fabricação do dispositivo se deu nas seguintes etapas:

- Com uso de uma serra manual, foram removidas as hastes de fixação.
- Após a remoção das hastes, foi usinado o restante do material (figura

14.1), até remover toda estrutura das hastes.

- Em seguida, foi usinada a parede lateral do acoplamento (diminuição da altura), para que a face da pastilha de freio fique exposta sem perder o encaixe.
- Também foram abertas duas cavidades diametralmente opostas para auxiliar na retirada da pastilha do dispositivo (Figura 14.2). A Figura 14.3 apresenta o conjunto montado.

Figura 14 – Etapas da fabricação do dispositivo e conjunto montado



Fonte: Próprio autor (2022)

3.2.5.2 – Parâmetros do ensaio

Para o ensaio no tribômetro, foi definido a velocidade de deslizamento de 0,3 m/s, e a distância de deslizamento de 2000 m. Para determinação do número de voltas, foi utilizado a equação 6.

$$Voltas = \frac{L}{\pi * D} \quad (6)$$

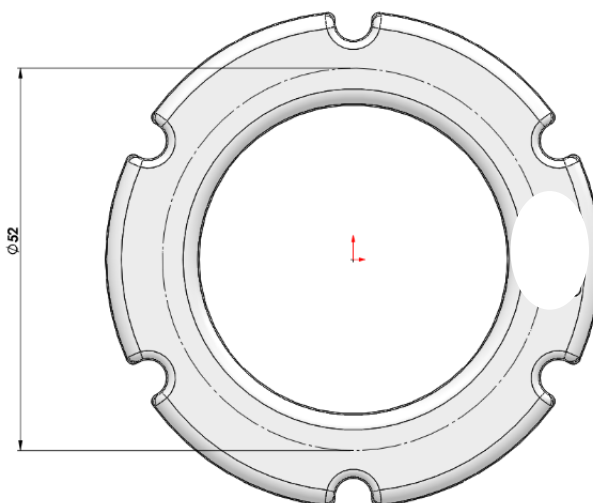
Na qual:

L = distância (2000 m).

D = Ø da pista (52 mm)

O diâmetro da pista é condicionado à geometria da pastilha, e foi utilizado a melhor área útil conforme Figura 15 abaixo.

Figura 15 – Diâmetro da pista



Fonte: Próprio autor (2022)

Com essas informações, foram feitas as conversões e cálculos matemáticos, chegando no valor de 12.242 voltas. Posteriormente, este valor foi inserido no contador de voltas do tribômetro.

Para definição da velocidade do ensaio, foi utilizado a Equação 7.

$$Velocidade\ angular = \frac{60}{(\pi * D) / V} \quad (7)$$

Na qual:

D = diâmetro da pista (52 mm)

V = Velocidade linear (300 mm/s)

De igual forma, realizando as devidas conversões e cálculos matemáticos, chegou-se ao valor de 110 rpm. Valor que posteriormente foi inserido no inversor de frequência para ajustar a velocidade do motor do tribômetro.

No tribômetro do IFSC há a possibilidade de usar dois valores de carga, 10 N e 20 N, que são os pesos padrões disponíveis. Para o ensaio em questão, foi utilizado o valor de 10 N.

3.2.5.3 - Preparação das amostras e ensaio no tribômetro

A preparação dos pares tribológicos foi feita conforme a norma ASTM G99-5 (ASTM, 2004). As pastilhas foram limpas com pincel e flanela, para remoção de impurezas, e as esferas, após serem inseridas no dispositivo, foram limpas com acetona.

Foi utilizado uma balança de precisão (Figura 16), para medir a massa das esferas e das pastilhas. Os valores eram registrados para posterior cálculo da perda de volume.

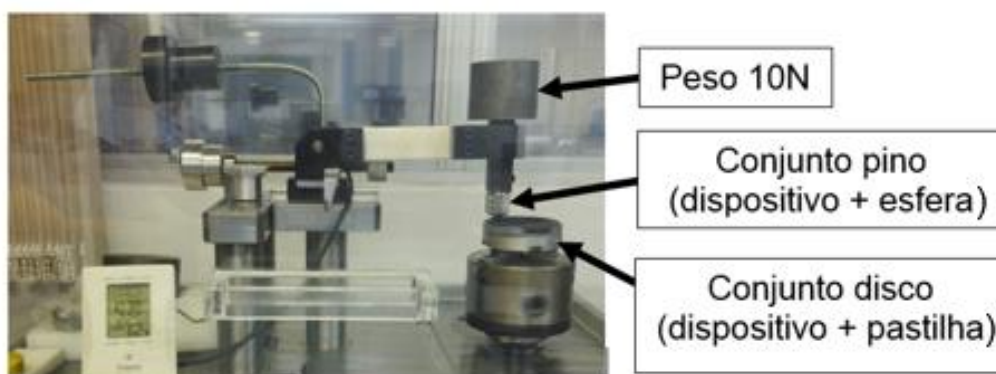
Figura 16 – Balança de precisão



Fonte: Próprio autor (2022)

Após a preparação dos pares tribológicos e registro das massas, os conjuntos eram acoplados ao tribômetro (Figura 17), para início dos ensaios.

Figura 17 – Conjunto montado



Fonte: Próprio autor (2022)

Durante os ensaios, a temperatura e a umidade do ar também foram registradas. Para isso foi utilizado o baro-termo-higrômetro (Figura 18), disponível no laboratório. Como a temperatura e a umidade do ambiente do laboratório são controlados, houve pouca variação nesses parâmetros, ficando a umidade média em 54,9% e a temperatura média foi de 23,3°C.

Figura 18 – Baro-termo-higrômetro



Fonte: Próprio autor (2022)

No final do ensaio, as pastilhas eram retiradas do dispositivo, e limpas com pincel e flanela, para remoção do material que era removido da pastilha durante o teste, este material é chamado de *debri*. De igual forma, as esferas também eram retiradas do dispositivo. Ambos eram novamente inseridos na balança de precisão para medição das massas.

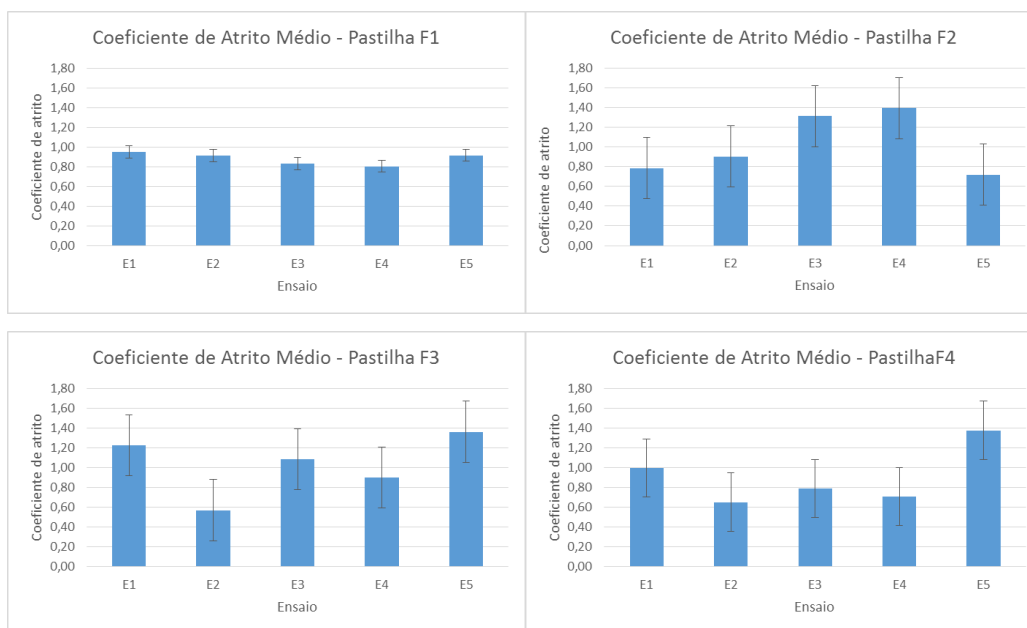
Para cada ensaio realizado foi utilizado um par tribológico, totalizando 20 pares de pastilhas + esferas.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Coeficiente de atrito

Nos Gráficos 1 a 4 abaixo, são apresentados os valores de coeficientes de atrito individual de cada pastilha para cada ensaio realizado.

Gráficos 1 a 4 – Coeficiente de atrito médio das pastilhas



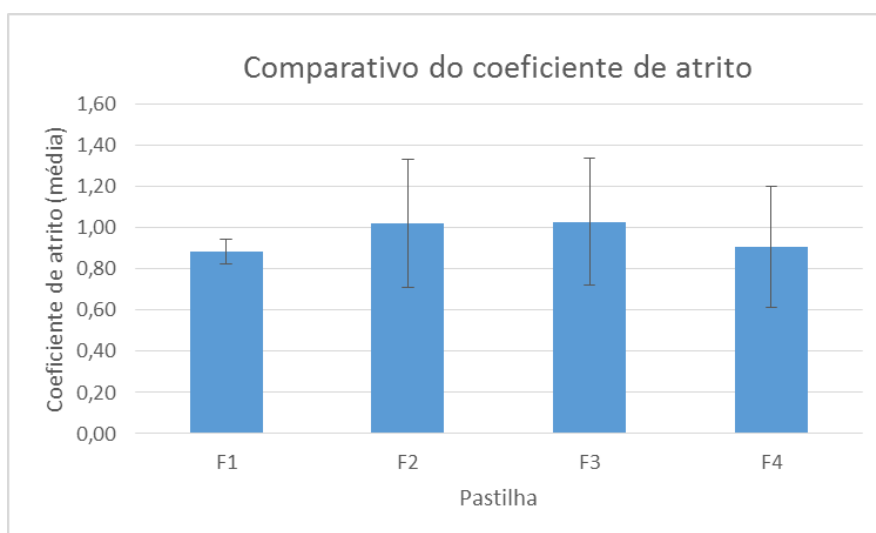
Fonte: Próprio autor (2022)

Um aspecto importante observado nestes resultados foi a variação nos valores de coeficiente de atrito entre as pastilhas com a mesma formulação. Na pastilha com a formulação F1, o maior coeficiente de atrito foi no ensaio E5, com valor de 0,95 e o menor foi no ensaio E4, com valor de 0,81. A variação entre o menor e o maior valor foi de 0,14. Seguindo a mesma análise para as demais pastilhas, a variação nas pastilhas com a formulação F2 foi de 0,67, para as pastilhas com a formulação F3 foi de 0,79 e para as pastilhas da formulação F4 foi de 0,73. Essa discrepância entre os valores mínimos e máximos, indicam problemas no processo produtivo das pastilhas. A má homogeneização dos componentes pode ocasionar acúmulo de materiais em pontos diferentes das pastilhas de um mesmo lote, o que ocasiona valores muito diferentes de coeficiente de atrito entre as pastilhas, mesmo sendo fabricadas no mesmo lote e com a mesma formulação.

Foi realizada a análise de variância ANOVA, com os valores de coeficiente de atrito obtidos nos ensaios. O resultado aponta que não há diferenças significativas entre o coeficiente de atrito das pastilhas, e que estatisticamente as pastilhas são iguais.

Porém, quando comparados os resultados das médias de coeficiente de atrito (Gráfico 5), os valores das pastilhas F2 e F3 foram maiores com 1,02 e 1,03 respectivamente, e das pastilhas F1 e F4 foram as menores com valores de 0,88 e 0,91.

Gráfico 5 – Comparativo de coeficiente de atrito entre as pastilhas

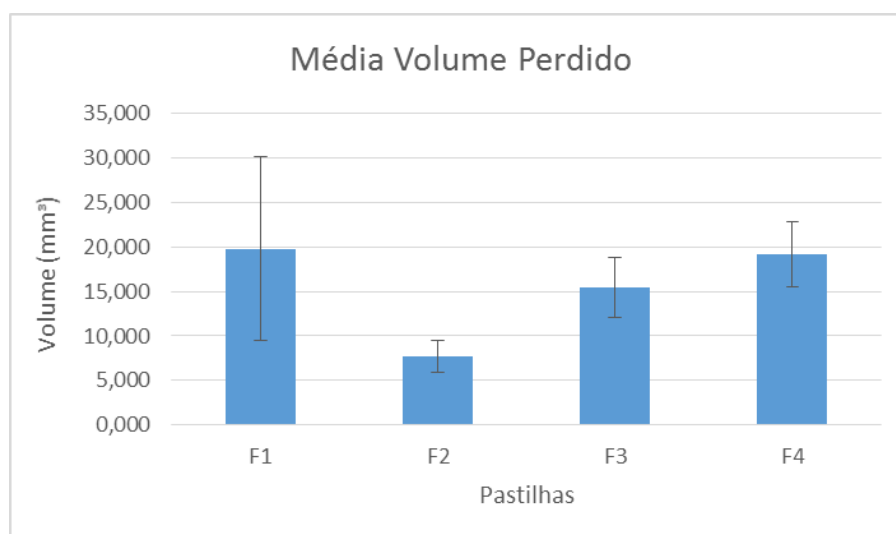


Fonte: Próprio autor (2022)

4.2 Desgaste

Os valores de desgaste foram calculados através da perda de massa, utilizando as equações 1 e 2 apresentadas anteriormente, e o resultado apresentado em forma de perda de volume conforme indicado na norma ASTM G99-5. Abaixo o Gráfico 6 que mostra a perda de volume das pastilhas.

Gráfico 6 – Desgaste nas pastilhas

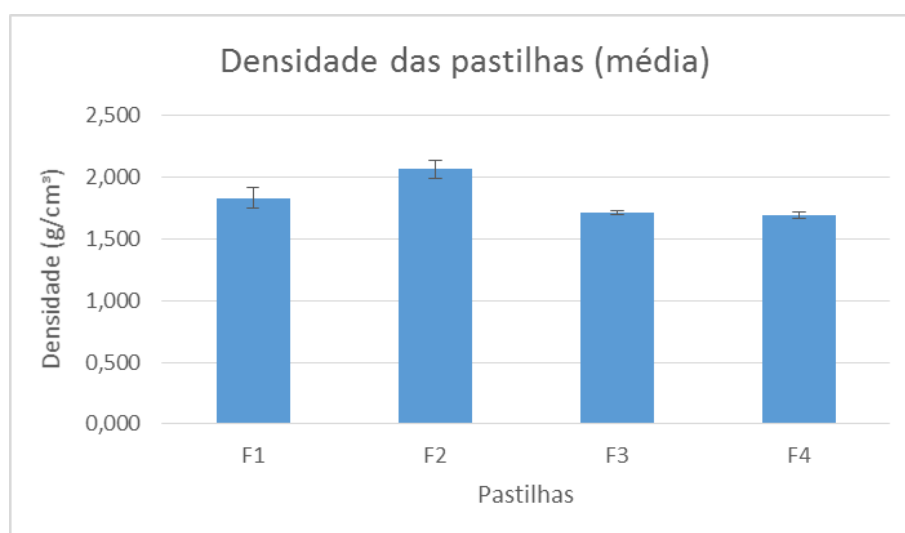


Fonte: Próprio autor (2022)

As pastilhas da formulação F1 foi a que apresentou maior desgaste com média de volume perdido de 19,767 mm³, seguido das pastilhas F4 e F3 com valores de 19,134 mm³ e 15,395 mm³ de volume perdido. A pastilha F2 foi a teve o menor desgaste, o valor médio de perda de volume desta pastilha foi de 7,706 mm³, valor muito abaixo das demais pastilhas.

Abaixo, no Gráfico 7, é mostrado os valores de densidade das pastilhas.

Gráfico 7 – Densidade das pastilhas



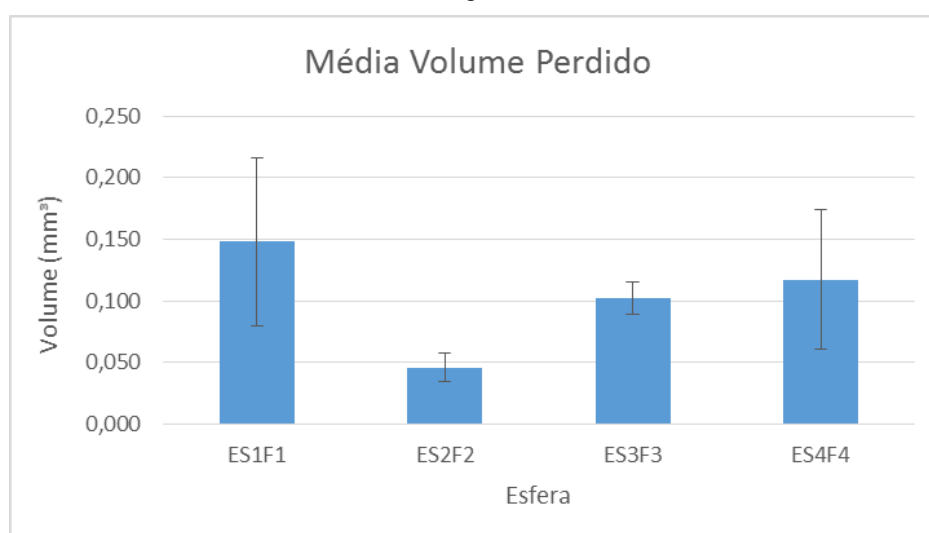
Fonte: Próprio autor (2022)

A pastilha F2 foi a que apresentou maior densidade com valor de 2,061

g/cm³. Seguindo na ordem da maior para menor densidade, a pastilha F1 possui densidade de 1,828 g/cm³, seguido pela pastilha F3 com densidade de 1,712 g/cm³, e por último, a pastilha F4 com densidade de 1,692 g/cm³. Como a composição das pastilhas fornecidas é segredo industrial, sendo apenas informado que foram utilizados a mesma composição, variando apenas a quantidade relativa de cada componente, pode-se inferir que nas pastilhas mais densas os componentes com maior massa específica estão presentes em maior porcentagem. Provavelmente óxido de alumínio ou alumina calcinada que, além de possuírem altos valores de densidade (3,14 a 4 g/cm³), ajudam a melhorar o atrito, conforme descrito por Lombriller (2002, p. 29). Esta hipótese vem de encontro com os valores de coeficiente de atrito, que nas pastilhas da formulação F2 estão entre os maiores.

Abaixo o Gráfico 8 mostra a perda de volume das esferas. A designação das esferas se dá pelas vogais *ES*, seguido pelo numeral que relaciona com a pastilha. Ou seja, ES1F1 é a esfera 1 utilizado nos ensaios da pastilha F1, e assim sucessivamente.

Gráfico 8 – Desgaste nas esferas



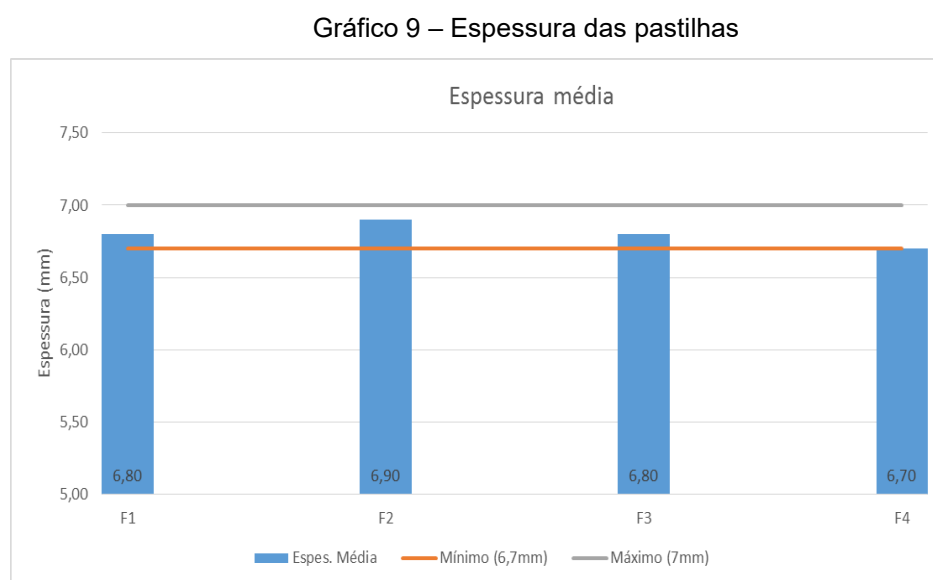
Fonte: Próprio autor (2022)

As esferas utilizadas nos ensaios das pastilhas F2 e F3 tiveram a menor perda de volume com valores de 0,046 mm³ para as esferas ES2F2 e 0,102 mm³ para as esferas ES3F3. As esferas utilizadas nos ensaios das pastilhas F1 e F4, tiveram os maiores valores de desgaste. Onde o desgaste das esferas ES4F4

foi de 0,117 mm³ e para as esferas ES1F1 foi de 0,148 mm³. Esta última, tendo o maior desgaste dentre as esferas utilizadas.

4.3 Ensaio dimensional.

O gráfico 9 abaixo, mostra os resultados da espessura onde o valor estipulado é de 7 mm com tolerância de 0/-0,3 mm.

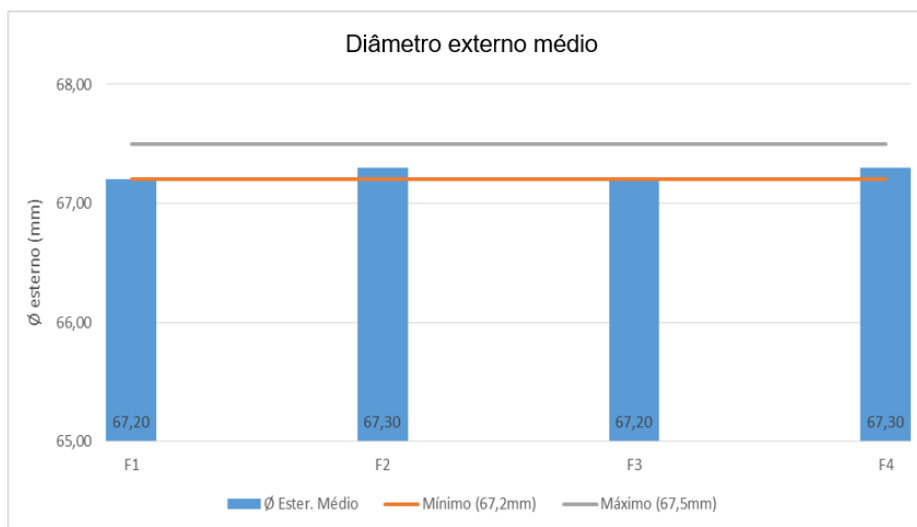


Fonte: Próprio autor (2022)

Destaque para a pastilha F2 que dos 25 pontos medidos ficou com a média mais próxima da nominal.

O Gráfico 10 abaixo mostra os valores de diâmetro externo. O valor definido é de 67,5 mm de diâmetro, com tolerância de 0/-0,3 mm.

Gráfico 10 – Diâmetro externo das pastilhas

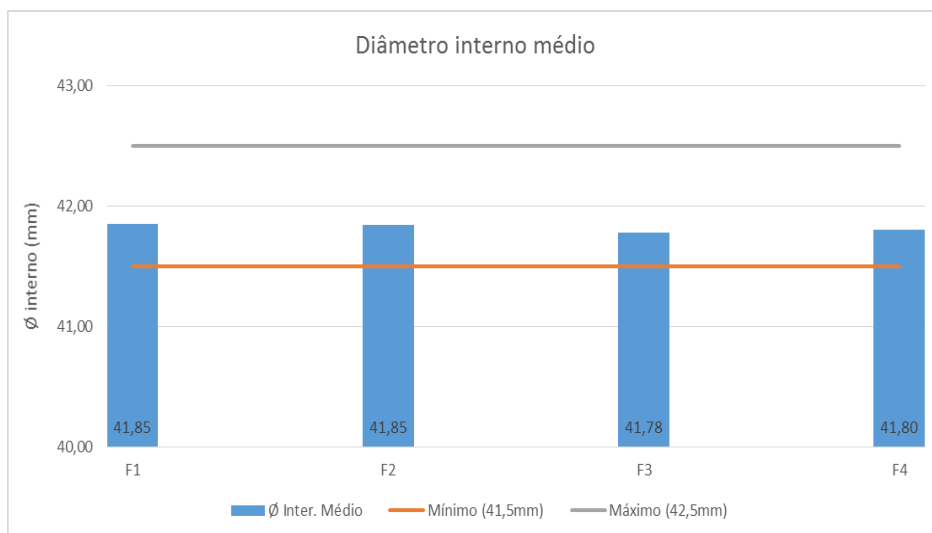


Fonte: Próprio autor (2022)

Novamente destaque para a pastilha F2, que juntamente com a F4, nos 15 pontos medidos, tem os valores médios mais próximos da nominal.

Abaixo no Gráfico 11, temos os valores do diâmetro interno, que tem seu valor nominal definido em 42 mm de diâmetro, com tolerância de +/- 0,5 mm.

Gráfico 11 – Diâmetro interno das pastilhas



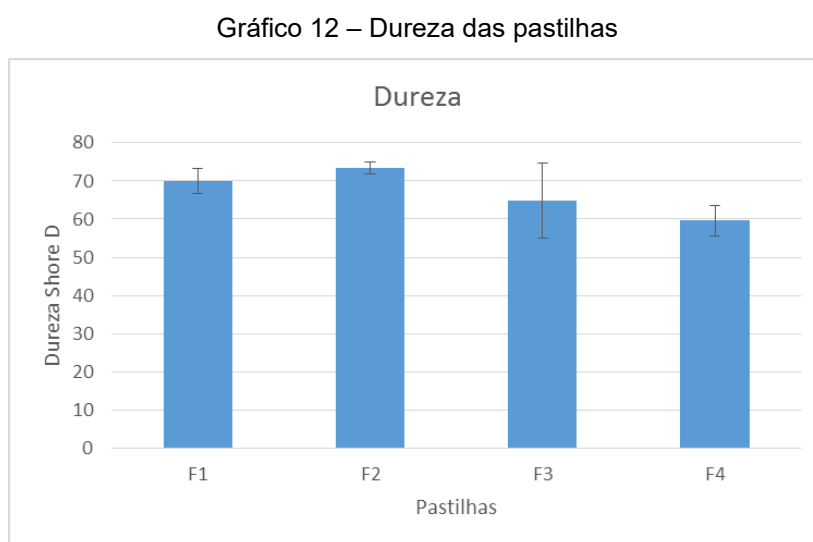
Fonte: Próprio autor (2022)

Para estes, as pastilhas F1 e F2, nos 15 pontos medidos, tiveram a média mais perto da nominal. As pastilhas, de forma geral, estão atendendo os valores de dimensionais especificados para o projeto. As regiões medidas, na média, estão dentro dos valores máximos e mínimos estabelecidos para o projeto, e

com isso, não há impacto negativo nos cálculos de volume.

4.4 Dureza

Abaixo o Gráfico 12 que mostra o comparativo com as médias dos cinco pontos avaliados nas pastilhas. A pastilha F2 apresentou maior dureza, com média de 73,4 Shore D.



Fonte: Próprio autor (2022)

Um aspecto importante verificado neste ensaio, foi a variação de dureza dentro da mesma pastilha. O quadro 1 abaixo traz as medições realizadas. Nota-se que a pastilha F2, além de ser a com maior dureza (média de 73,4 Shore D), também foi a que teve a menor variação entre as medições, $\pm 1,4$ Shore D, indicando uma melhor homogeneidade dos componentes. Já a pastilha F3 apresentou variação de $\pm 8,7$ Shore D, resultado que caracteriza má dispersão dos componentes.

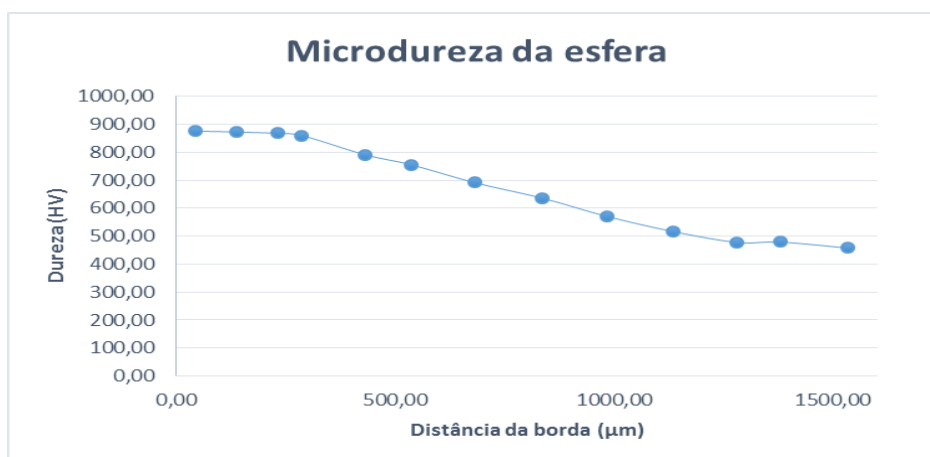
Quadro 1 – Dureza nos cinco pontos das pastilhas

Pastilha	Medição	Dureza	Média
F1	1	71	70 ± 3
	2	68	
	3	66	
	4	74	
	5	72	
F2	1	75	73 ± 1
	2	74	
	3	71	
	4	73	
	5	74	
F3	1	80	64 ± 9
	2	56	
	3	57	
	4	63	
	5	68	
F4	1	64	59 ± 4
	2	58	
	3	54	
	4	63	
	5	59	

Fonte: Adaptado do relatório do laboratório privado (2022)

No ensaio de microdureza das esferas, os resultados indicam que as esferas foram fabricadas com aço temperado 4140 e realizado tratamento térmico para endurecimento da superfície conforme se observa no Gráfico 13 abaixo. Na superfície das esferas a dureza é de 876,23 HV.

Gráfico 13 – Dureza das esferas



Fonte: Próprio autor (2022)

4.5 Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura.

A estrutura das pastilhas, de forma geral, na pastilha F1 as fibras aparecem sempre aglomeradas (má distribuição), e com muitas regiões com vazios. Nas pastilhas F2, F3 e F4, apresentam aspecto de maior refino e de melhor dispersão, porém, ainda é possível identificar regiões com fibras aglomeradas.

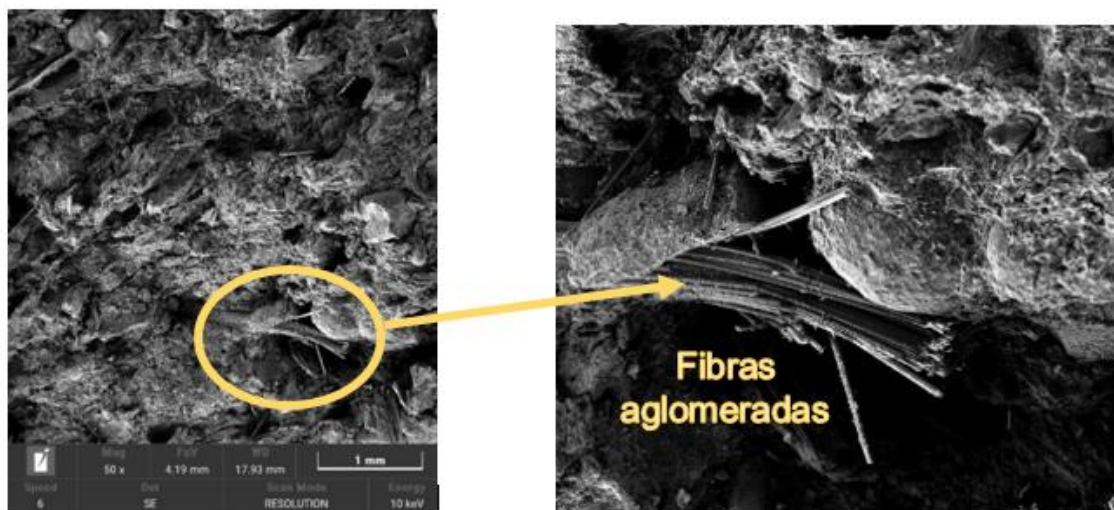
Abaixo segue a avaliação individual de cada pastilha.

4.5.1 Pastilha F1

Apresenta em sua composição fibras orgânicas e fibras de vidro, grafite, óxido de alumínio, de silício, de magnésio e de ferro. Também há presença de carbonatos e grafite. Foi identificado materiais com composição química diferente como borracha e partículas inorgânicas em pó como carbonatos.

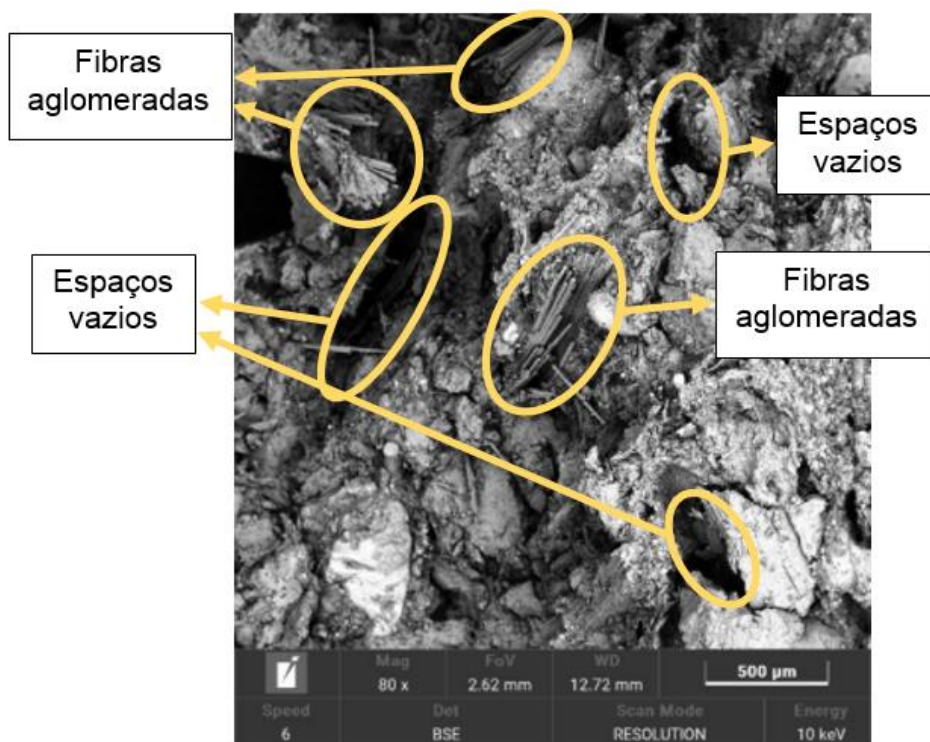
Nas Figuras 19 e 20 abaixo, é possível ver regiões com fibras aglomeradas e vazios na estrutura da pastilha.

Figura 19 – Fibras aglomeradas na estrutura da pastilha F1



Fonte: Adaptado do Relatório do laboratório privado (2022)

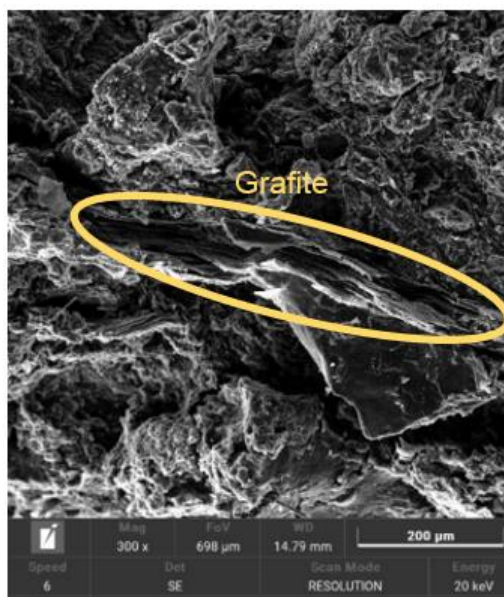
Figura 20 Fibras aglomeradas e espaços vazios.



Fonte: Adaptado do Relatório do laboratório privado (2022)

Na Figura 21 abaixo, é possível identificar materiais com estrutura lamelar, indicando existência de grafite.

Figura 21 – Estrutura lamelar (grafite)



Fonte: Adaptado do Relatório do laboratório privado (2022)

Na Figura 22, mostra a presença de fibra de vidro na estrutura da pastilha.

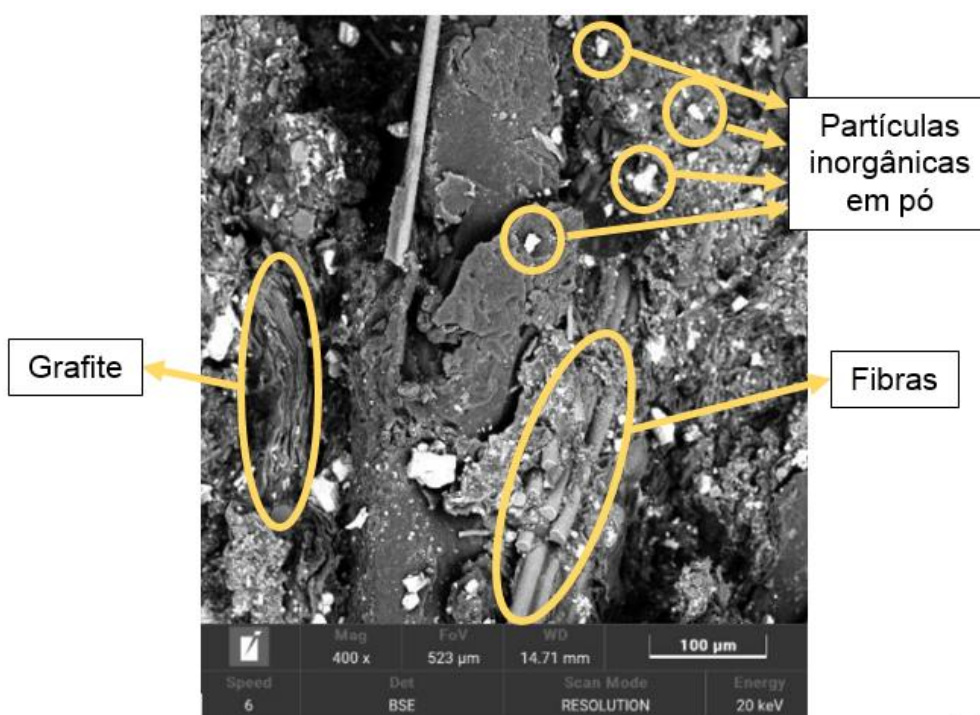
Figura 22 – Fibra de vidro



Fonte: Adaptado do Relatório do laboratório privado (2022)

Na figura 23 mostra os materiais com composição química diferente como fibras (aglomeradas), grafite e partículas inorgânicas em pó como carbonatos.

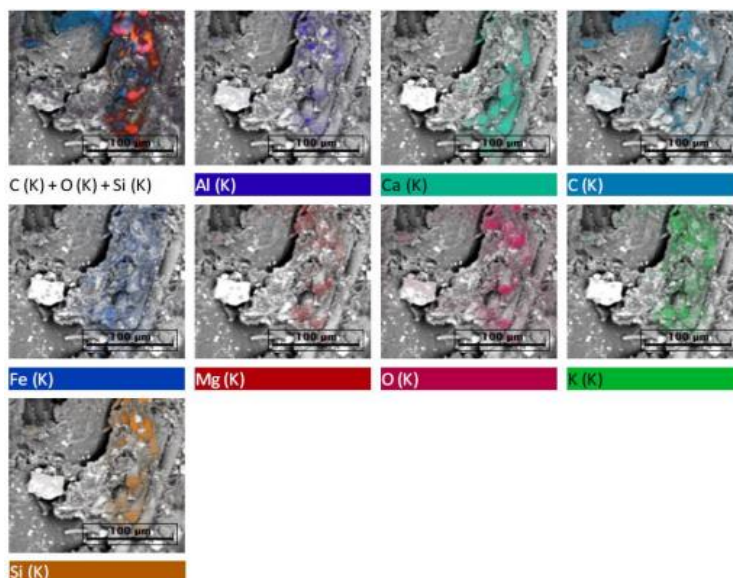
Figura 23 – Materiais de composição química diferentes



Fonte: Adaptado do Relatório do laboratório privado (2022)

Na Figura 24, mostra a análise de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) em determinada região da pastilha. Foi identificado que a sua maior parte é orgânica ou carbonácea, com a presença de óxidos de alumínio, de magnésio e de ferro, carbonatos, fibras orgânicas e de vidro.

Figura 24 – Análise EDS pastilha F1

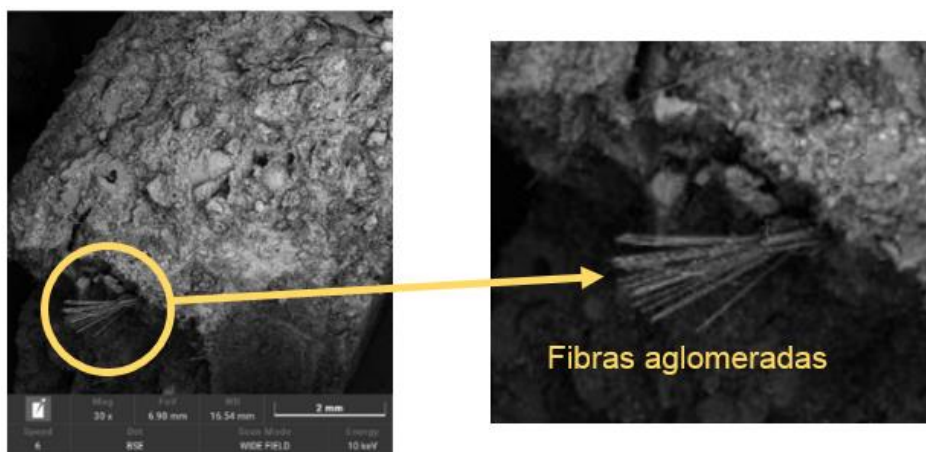


Fonte: Relatório laboratório privado (2022)

4.5.2 Pastilha F2

Na formulação 2 foi identificado a presença de fibras orgânicas, alumínio, bário, silicato de magnésio, oxigênio e silício, possivelmente provenientes de óxidos e silicatos. Há também a presença de enxofre, possivelmente advindo da composição das borrachas. Figura 25, mostra a presença de fibras aglomeradas.

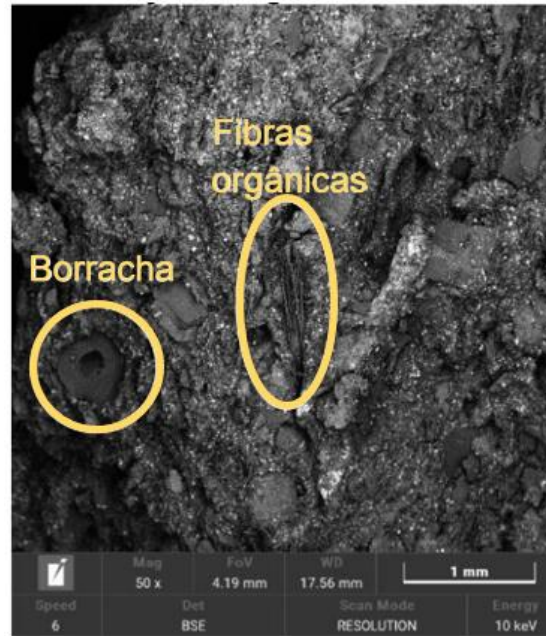
Figura 25 – Fibras aglomeradas na estrutura da pastilha F2



Fonte: Adaptado do relatório do laboratório privado (2022)

Abaixo, a figura 26 é possível identificar amostras de fibras orgânicas e de borracha.

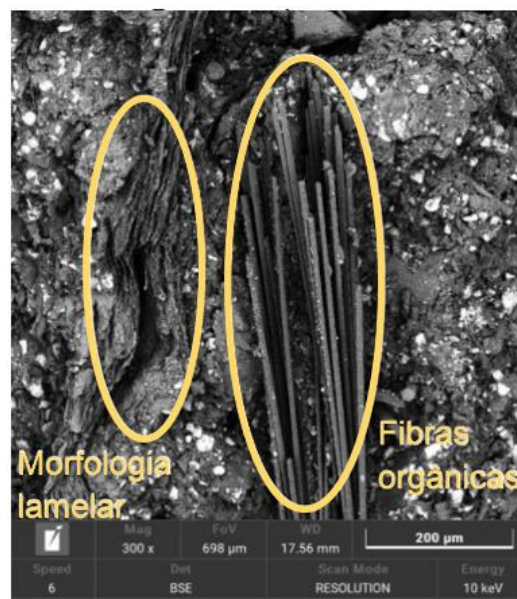
Figura 26 – Fibras orgânicas e borracha



Fonte: Adaptado do relatório do laboratório privado (2022)

A Figura 27 mostra a presença de componentes de morfologia lamelar identificados como silicato de magnésio e fibras orgânicas.

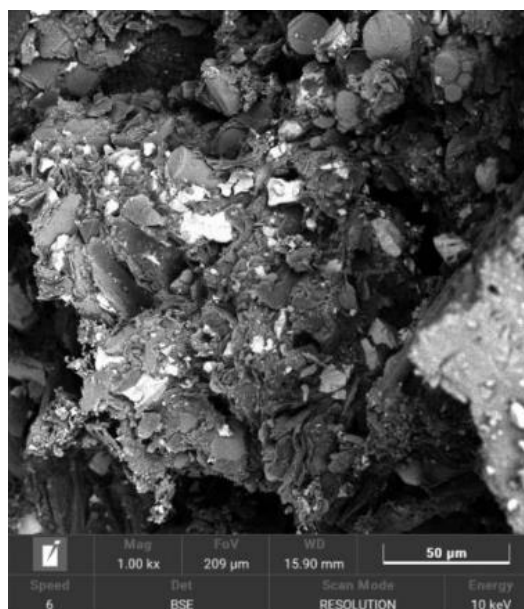
Figura 27 – Comp. de morfologia lamelar (silicato de magnésio), e fibras orgânicas



Fonte: Adaptado do relatório do laboratório privado (2022)

A Figura 28 abaixo, mostra pontos brancos identificados como compostos inorgânicos (óxidos e silicatos).

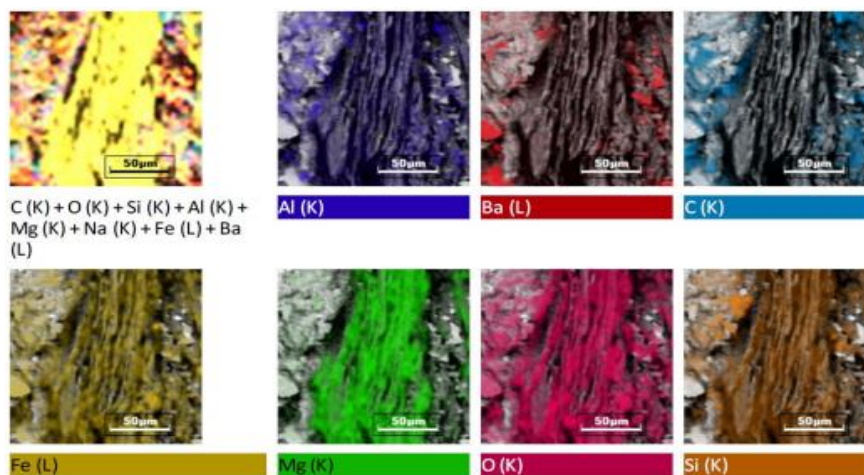
Figura 28 – Compostos inorgânicos (óxidos e silicatos), na estrutura da pastilha F2



Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

Na análise de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) da pastilha F2 (Figura 29), mostra que a sua maior parte é orgânica ou carbonácea, com a presença de alumínio, bário, magnésio, oxigênio e silício, provavelmente resultantes de óxidos de silicatos. Existe ainda a presença de enxofre, possivelmente resultante de borrachas.

Figura 29 – Análise EDS pastilha F2

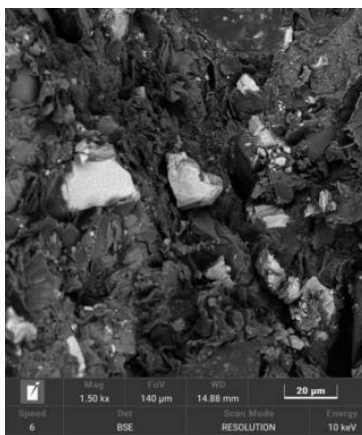


Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

4.5.3 Pastilha F3

A Formulação 3 foi identificada a presença dos elementos alumínio, oxigênio, sódio e silício, possivelmente provenientes de óxidos e silicatos. Na figura 30 abaixo, mostra pontos brancos identificados como compostos inorgânicos (óxidos e silicatos).

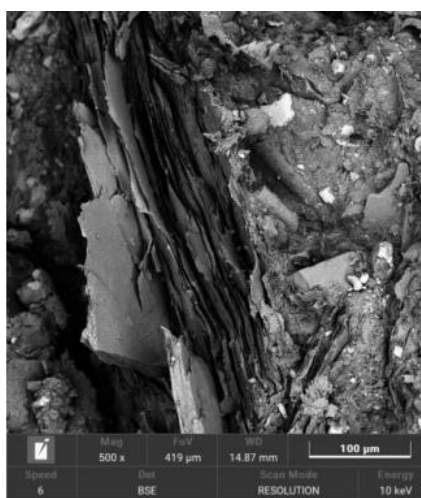
Figura 30 – Compostos inorgânicos (óxidos e silicatos), na estrutura da pastilha F3



Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

Na figura 31 abaixo, é possível ver regiões de morfologia lamelar (silicato de magnésio)

Figura 31 – Morfologia lamelar (silicato de magnésio) na pastilha F3

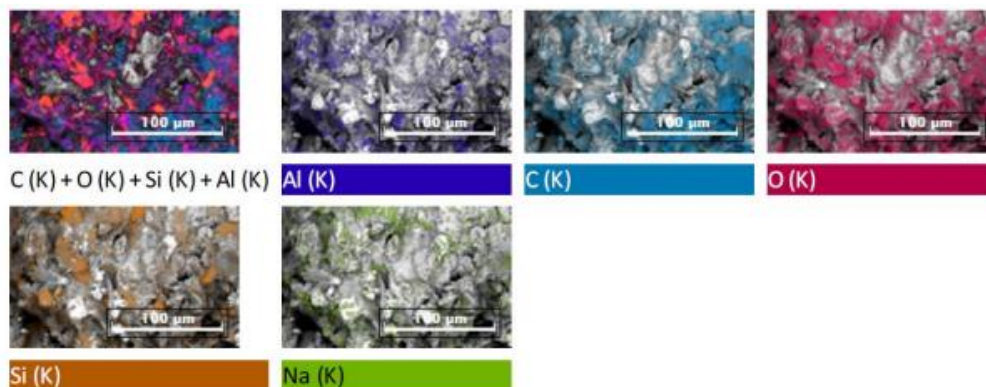


Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

Na análise de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) da pastilha

F3 (Figura 32), mostra que a sua maior parte é orgânica ou carbonácea, com a presença de alumínio, oxigênio, sódio e silício, provavelmente resultantes de óxidos de silicatos.

Figura 32 – Análise EDS pastilha F3



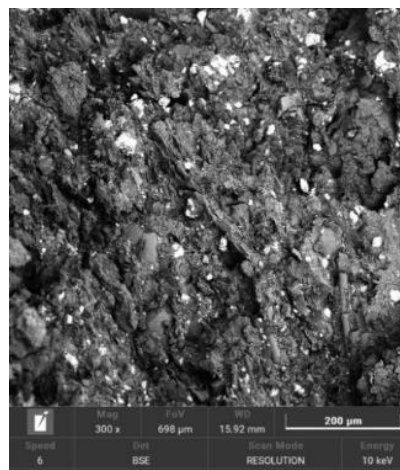
Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

4.5.4 Pastilha F4

A Formulação 4 foi identificado na sua composição os elementos alumínio, bário, oxigênio e silício, possivelmente provenientes de óxidos e silicatos, além de enxofre, possivelmente advindo da composição das borrachas. Também foi identificada a presença de fibras de vidro nessa amostra.

Na figura 33 abaixo, é possível observar a presença de pontos brancos identificados como compostos inorgânicos (óxidos e silicatos).

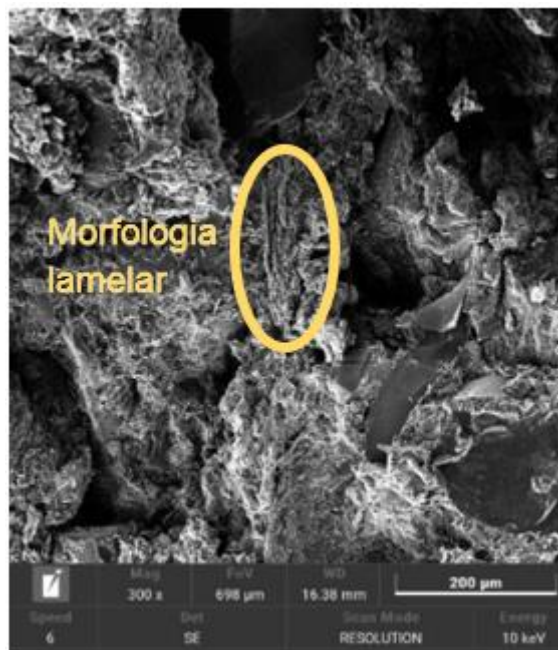
Figura 33 – Pontos brancos (óxidos e silicatos)



Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

Abaixo, na Figura 34, observa-se a presença de estruturas lamelares, identificadas como silicato de magnésio

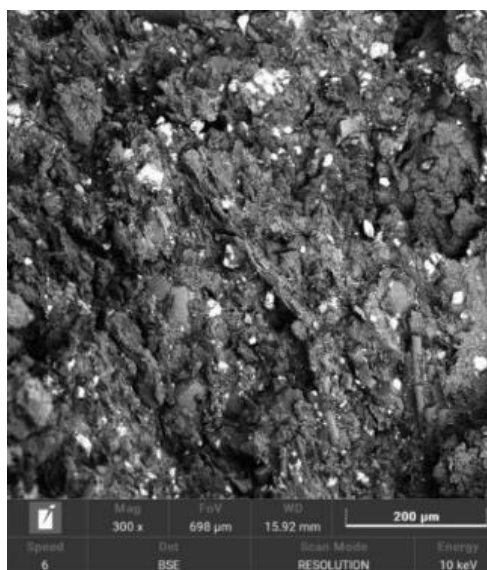
Figura 34 – Morfologia lamelar (silicato de magnésio) na pastilha F4



Fonte: Adaptado do relatório do laboratório privado (2022)

Presença de pontos brancos identificados como compostos inorgânicos (óxidos e silicatos), conforme mostra a Figura 35

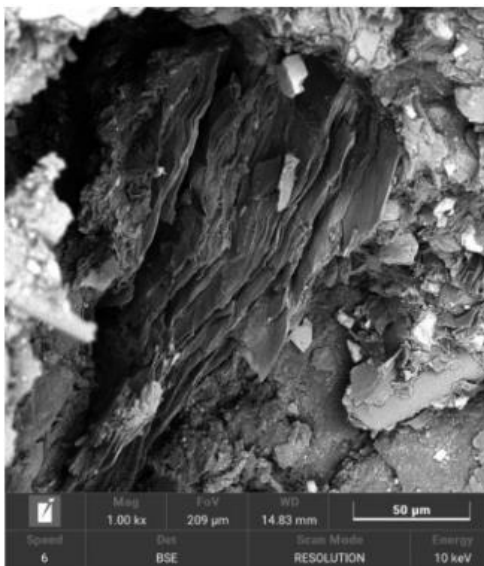
Figura 35 – Compostos inorgânicos (óxidos e silicatos) na estrutura da pastilha F4



Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

Abaixo na Figura 36, mostra a presença de material com morfologia lamelar identificada como silicato de magnésio.

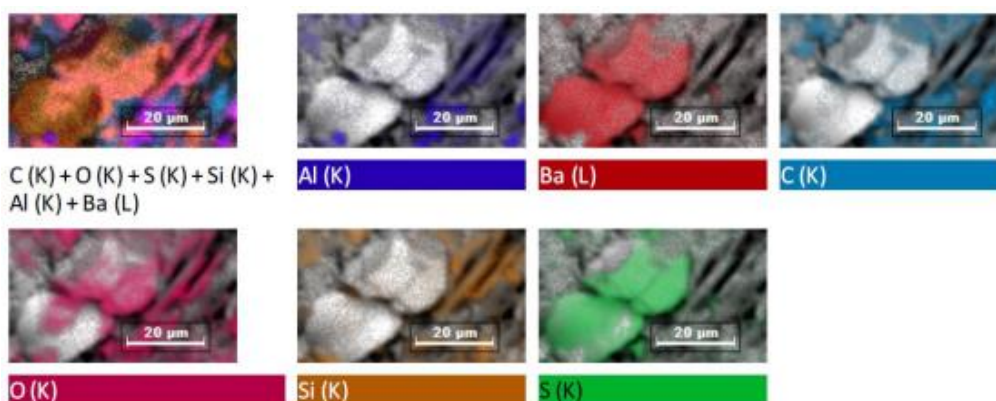
Figura 36 – Morfologia lamelar (silicato de magnésio) na pastilha F4



Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

Na análise de Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) da pastilha F4 (Figura 37), mostra que a sua maior parte é orgânica ou carbonácea, com a presença de alumínio, bário, oxigênio e silício, provavelmente resultantes de óxidos de silicatos. Existe ainda a presença de enxofre, possivelmente resultante de borrachas.

Figura 37 – Análise EDS pastilha F4



Fonte: Relatório do laboratório privado (2022)

5. CONCLUSÃO

Assim, os resultados indicam que os maiores valores de coeficiente de atrito entre as pastilhas de freio e a esferas de aço foram as formulações 2 e 3 (F2 e F3), com valores de 1,02 e 1,03 respectivamente. A pastilha 4 (F4), o valor foi de 0,91, e o menor valor foi o da formulação 1 (F1), com valor de 0,88. As pastilhas são estatisticamente iguais em função do desvio padrão. O par tribológico (pastilha de freio e esfera de aço), da formulação 2 (F2), teve o menor desgaste com perda de volume de 7,706 mm³ para a pastilha e 0,046 mm³ para a esfera. O par tribológico que apresentou maior desgaste foi da formulação 1 (F1), com perda de volume de 19,767 mm³ para a pastilha e 0,148 para a esfera. Pastilhas com maior densidade, possuem maior quantidade de elementos resistentes ao desgaste, apresentando o melhor resultado de desgaste.

As dispersões dos resultados para o mesmo grupo de pastilhas, e a análise MEV indicam que não há homogeneidade na mistura dos componentes na fabricação das pastilhas. No ensaio dimensional as pastilhas estão atendendo ao especificado, não impactando nos resultados de perda de volume. O grupo de pastilhas F2 apresentou o maior valor de dureza média – 73,4 Shore D. Além disso, teve também o menor desvio padrão.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se desenvolver novas pesquisas dos constituintes das pastilhas de freio realizando a variação dos componentes e identificar a influência desses constituintes no comportamento tribológico (coeficiente de atrito e desgaste).

REFERÊNCIAS

AGUILA, Zaida Jova. **Formulação De Compósitos Reforçados Com Fibras De Panox E Polpa De Aramida Utilizados Em Materiais De Fricção**. 1999. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

ALMEIDA, Julio César de. **Freios E Embreagens**. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM356/Prof_Jorge_Erthal/Aulas/11-Freios%20e%20Embreagens.pdf. Acesso em: 07 set. 2022.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **G99-5**: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. United States: West Conshohocken, 2004. 6 p.

BARROS, Liu Yesukai de. **Estudo Da Influência Do Cobre No Desempenho Tribológico De Pastilhas De Freio Automotivo**. 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

BAYER, Raymond G.. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**. 2. ed. Vestal: Marcel Dekker, Inc., 2004. 396 p.

BHUSHAN, Bharat. **Introduction To Tribology**. 2. ed. Columbus: A John Wiley & Sons, Ltd, 2013. 721 p.

CANALI, Ricardo José. **Determinação de propriedades físicas de diferentes materiais para discos e pastilhas de freio e relação destas propriedades com ruído**. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002

EYRE, T. S. **Wear characteristics of metals**. Tribology international, v. 9, n. 5, p. 203-212, 1976.

DIULGHEROGLO, PEDRO A. **Fundamentos De Freios E Seus Componentes**. Apostila de Curso. Março 2010.

HALLIDAY, David *et al*. **Fundamentos de física**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2016. 1068 p.

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60335-2**: Particular requirements for pedestrian controlled mains-operated lawnmowers. 2 ed. Geneva, 2002. 114 p.

INMETRO, Instituto nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial. **Requisitos de avaliação da conformidade para segurança de aparelhos eletrodomésticos e similares**. Portaria nº 371, de 29 de dezembro de 2009. Ministério do desenvolvimento, indústria e comércio exterior, Brasília, 2009

LIMPERT, Rudolf. **Brake Desing and Safety**. 2. ed. Warrendale: Sae Publications Groop, 1999. 529 p.

LIVRAMENTO, Bruno Soares do. **Bancada De Teste Para Análise Do Coeficiente De Atrito Entre Disco E Pastilhas De Freio**. 2017. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

LOMBRILLER, Silvia Faria. **Análise Térmica e Dinâmica do Sistema de Freio a Disco de Veículos Comerciais Pesados**. 2002. 196 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MIMOSO, Rui Miguel Pereira. **Momentos em Freios e em Embraiagens**. 2011. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

NEUBER, Ariadne. **Calibração E Aferição Da Reprodutibilidade Do Equipamento De Ensaio De Degaste Tipo Pino Sobre Disco Rotativo**. 2017. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina Câmpus Jaraguá do Sul – Rau, Jaraguá do Sul, 2017.

ROMAN, A.; GASPARIN, A. Comportamento de Desgaste de um Material de Atrito com a Adição de Fibra de Aço. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, v. 6, n. 4, p. 19-24, 31 ago. 2021.

TECKNO-FREIO. **Freio Eletromagnético**. Disponível em: <http://teckno-freio.weebly.com/blog/voce-realmente-sabe-como-funciona-um-freio-eletromagnetico>. Acesso em: 07 set. 2022.

TEIXEIRA, Kleber Donizetti. **Influência Da Velocidade De Deslizamento No Desgaste Do Par Tribológico Ferro Fundido Cinzento (MC 12 e MC 13) – Ferro Fundido Cinzento Centrifugado**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.

TIPLER, Paul Allen. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2013. 788 p.

TRIBOLOGIA. In: MICHAELIS, **Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos, 2022. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/palavra/MdLDL/tribologia/>. Acesso em: 09/05/2022.