

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE MATERIAIS DE FRICÇÃO COM FIBRA NATURAL E
CERÂMICA

por

Guilherme Moacir Catusso

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Catusso, Guilherme Moacir
ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE MATERIAIS DE FRICÇÃO COM
FIBRA NATURAL E CERÂMICA / Guilherme Moacir Catusso.
-- 2022.
24 f.
Orientador: Patric Daniel Neis.

Coorientador: Gustavo da Silva Gehlen.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Tribologia. 2. Materiais de fricção. 3. Fibra
natural. 4. Cerâmica. I. Neis, Patric Daniel, orient.
II. Gehlen, Gustavo da Silva, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Guilherme Moacir Catusso

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE MATERIAIS DE FRICÇÃO COM FIBRA NATURAL E
CERÂMICA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Patric Daniel Neis

Coorientador: Engenheiro Gustavo da Silva Gehlen

Comissão de Avaliação:

Prof. Patric Daniel Neis

Prof. Liu Yesukai de Barros

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, setembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, Janete e Moacir, pelo suporte, apoio e amor incondicional doados durante toda a minha trajetória.

Agradeço à minha irmã, Amanda Catusso, por sempre acreditar em mim e me incentivar a lutar pelos meus objetivos.

Agradeço aos meus amigos (GRZS), por todo o suporte e companheirismo durante os momentos difíceis, em especial ao Arthur Corso pelo apoio constante e também por auxiliar na tradução do resumo.

Agradeço a toda a equipe do LATRIB, por viabilizar a realização desse estudo e pelo apoio fornecido durante os ensaios.

Agradeço ao engenheiro Gustavo da Silva Gehlen, pelo suporte, paciência e assessoria durante todas as etapas desse trabalho.

Agradeço ao professor Patric Neis, por toda a mentoria, auxílio e orientação ao longo da jornada acadêmica.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

ANÁLISE TRIBOLÓGICA DE MATERIAIS DE FRICÇÃO COM FIBRA NATURAL E CERÂMICA

Catusso, Guilherme Moacir

guilhermecatusso@gmail.com

Resumo. *Devido à preocupação com o impacto no meio ambiente, alguns materiais poluentes utilizados na composição das pastilhas de freio têm sido banidos ou restringidos. Consequentemente, a procura pela fabricação de materiais de fricção com menor impacto ambiental se tornou constante. Sendo assim, o presente trabalho consiste em avaliar o desempenho tribológico de amostras de pastilha de freio comercial e amostras formuladas com fibra natural/cerâmica submetidas a um procedimento normatizado. Durante as etapas com elevadas temperaturas e pressões, a formulação com mais fibra natural apresentou o melhor desempenho do coeficiente de atrito e os menores níveis de desgaste quando comparada com as formulações com fibra natural e cerâmica. A amostra com maior quantidade de fibra natural apresentou a melhor resistência em elevadas temperaturas, em razão da habilidade de formar mais platôs de contato na superfície. Durante as etapas com maiores velocidades e pressões, as amostras com fibra natural apresentaram resultados satisfatórios. Em temperaturas altas (500 °C), as amostras com fibra natural apresentaram uma considerável sensibilidade à variação de pressão. De um modo geral, a adição de fibra natural não prejudicou o desempenho dos materiais e conclui-se que a combinação de fibra natural e cerâmica pode ser uma alternativa ao cobre/asbesto.*

Palavras-chave: *materiais de fricção, fibra natural, cerâmica, cobre, asbesto*

Tribological analysis of friction materials with natural and ceramic fiber

Abstract. *Due to concern about the impact on the environment, some polluting materials used in the composition of brake pads have been banned or restricted. Consequently, the search for the manufacture of friction materials with less environmental impact has become constant. Therefore, the present work consists of evaluating the tribological performance of samples of commercial brake pads and samples formulated with natural/ceramic fiber submitted to a standardized procedure. During the steps with high temperatures and pressures, the formulation with more natural fiber presented the best performance of the friction coefficient and the lowest levels of wear when compared to the formulations with natural and ceramic fiber. The sample with the highest amount of natural fiber showed the best resistance at high temperatures, due to the ability to form more contact plateaus on the surface. During the steps with higher speeds and pressures, the samples with natural fiber showed satisfactory results. At high temperatures (500 °C), samples with natural fiber showed considerable sensitivity to pressure variation. In general, the addition of natural fiber did not affect the performance of the materials and it is concluded that the combination of natural fiber and ceramic can be an alternative to copper/asbestos.*

Keywords: *friction materials, natural fiber, ceramic, copper, asbestos*

NOMENCLATURA

Símbolos

μ Coeficiente de atrito

Abreviaturas e acrônimos

LATRIB Laboratório de Tribologia

MF Materiais de fricção

LM *Low metallic*

SM *Semi metallic*

NAO *Non-asbestos organic*

CoF Coeficiente de atrito

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	2
2.1. Atrito e Tribologia	2
2.2. Sistemas de frenagem	3
2.3. Materiais de fricção	3
2.4. Cobre, Asbesto, Fibra natural e Cerâmica	4
2.5. Normas e procedimentos experimentais	5
3. METODOLOGIA	5
3.1. Amostras utilizadas durante os ensaios	5
3.2. Equipamentos de ensaio	6
3.3. Procedimento de ensaio	7
4. RESULTADOS	9
4.1. Desgaste	9
4.2. Performance μ	9
4.3. Sensibilidade à velocidade e pressão	10
4.4. Resistência ao <i>fade</i>	11
4.5. Percentual de <i>recovery</i>	13
4.6. Sensibilidade à temperatura e pressão (<i>TPS</i>)	13
5. CONCLUSÃO	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE A	17

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de frenagem, através do atrito entre a pastilha e o disco freio, convertem a energia cinética do automóvel em energia térmica e vibracional. Elementos lubrificantes, aglutinantes, fibras, e compostos abrasivos são comumente utilizados na fabricação de pastilhas de freio (SINGARAVELU et al., 2019). Os materiais de fricção (MF) devem possuir características como boa resistência ao desgaste, coeficiente de atrito estável, baixo ruído e vibração em diversas faixas de temperatura, pressão e velocidade. Conforme descrito por Kim et al. (2001), materiais de fricção compostos por um único ingrediente não são capazes de atingir tais requisitos. Sendo assim, fabricantes buscam desenvolver compósitos multifásicos para constituir os MF. Geralmente, os MF são formados por 10-15 ingredientes diferentes (SINGH et al., 2020). Com o objetivo de obter MF com níveis satisfatórios de desempenho, os tipos e quantidades de elementos base são constantemente testados em ensaios de deslizamento (KIM et al., 2001). Grande parte do conhecimento da área é obtido através de empirismo, ou seja, tentativa e erro (YUN et al., 2010).

Devido ao impacto negativo no meio ambiente, diversos materiais poluentes comumente utilizados na composição dos MF têm sido banidos ou restringidos por recentes legislações norte americanas e europeias. Alguns exemplos desses componentes e/ou elementos são: cobre, estanho, chumbo e trissulfeto de antimônio (YUN et al., 2010). Um dos componentes responsáveis pela estabilidade física, mecânica e tribológica das propriedades das pastilhas de freio são as fibras. A utilização da fibra de asbesto na composição dos MF foi responsável pelo início do desenvolvimento dos materiais de fricção de freio (SINGH et al., 2020). Dentre os diversos componentes utilizados nos MF, as fibras são responsáveis por boa parte do desempenho e características do atrito durante a frenagem. Os materiais mais utilizados são fibras metálicas, fibra cerâmica, fibra de acrílico/vidro e a fibra de aramida (KIM et al., 2001). Devido às restrições referentes ao asbesto e mais recentemente ao cobre, o uso de fibras naturais se tornou extremamente atraente em razão do baixo custo, reduzido impacto ambiental e propriedades mecânicas relativamente adequadas (YUN et al., 2010).

Alguns estudos recentes sugerem que, devido às vantagens e características acima listadas, os MF fabricados com a adição de fibra natural poderão ser uma alternativa menos onerosa e mais sustentável quando comparados aos MF formulados com fibras tradicionais, sejam elas sintéticas ou metálicas (SINGH et al., 2020). Ma et al. (2013) avaliaram a performance de materiais de fricção fabricados com diferentes percentuais de fibra de bambu. Os MF feitos com a adição da referida fibra orgânica apresentaram um aumento no coeficiente de atrito quando comparado com os MF sem fibra de bambu. Porém, para composições com porcentagem maiores da fibra natural, o coeficiente de atrito decaiu com o aumento da temperatura. Além disso, para composições com menor porcentagem da fibra orgânica, os resultados indicaram menores taxas de desgaste, ruído e coeficiente de atrito estável. Xin et al. (2007) estudaram o desempenho tribológico de MF formulados com fibra de sisal. Nesse estudo, foi constatado que, quando comparado com fibra de asbesto/mineral, as pastilhas de sisal apresentam um coeficiente de atrito adequado em determinadas temperaturas, indicando a fibra de sisal como potencial substituta do asbesto. Em um estudo recente, Kumar et al. (2022) avaliaram pastilhas de freio compostas por fibra natural de Napier (*Pennisetum purpureum*). Em seus testes, foi verificado que os MF exibiram boas propriedades mecânicas. Também foi constatado que pastilhas com 5% da fibra de Napier obtiveram o melhor desempenho em frenagens sob altas temperaturas, enquanto que os MF contendo elevado percentual da fibra natural (20% de Napier) apresentaram melhor desempenho em temperaturas mais baixas. Gehlen et al. (2022) verificaram, em um estudo sobre MF formulados com diferentes porcentagens de casca de arroz (0%, 6% e 12%), que o aumento da quantidade de casca de arroz proporciona uma maior resistência ao desgaste em médias temperaturas (300 °C). Nesse estudo,

também foi constatado que em elevadas temperaturas de frenagem (550 °C), maiores quantidades de composto orgânico (12% de casca de arroz) tendem a prejudicar o desempenho tribológico, ocasionando uma menor resistência ao efeito de *fade* (redução do atrito em temperaturas elevadas). Entretanto, amostras com quantidades intermediárias de casca de arroz (6%) apresentaram uma resistência ao *fade* ligeiramente melhor e um desgaste menor.

Apesar dos estudos citados (XIN et al., 2007; MA et al., 2013; SINGH et al., 2020; KUMAR et al., 2022; GEHLEN et al., 2022) indicarem o potencial de aplicação das fibras naturais na formulação dos MF, todos eles relataram dois pontos negativos em altas temperaturas (acima de 300 °C): a diminuição no nível do coeficiente de atrito e o elevado desgaste das amostras. De acordo com o que é explicado por Nirmal et al. (2015), esses fatores negativos podem estar relacionados com a composição da fibra natural. Em geral, as fibras orgânicas são compostas por diferentes porcentagens de celulose, pectina, hemicelulose e lignina, que possuem uma temperatura de início de degradação térmica baixa (200 °C). Conforme explicado por Aranganathan et al. (2016), pelo fato de apresentarem baixa densidade e elevada resistência a níveis altos de temperatura, os cerâmicos são comumente utilizados na composição dos MF. Öztürk et al. (2013) estudaram os efeitos tribológicos de diferentes tipos de fibras (lã de rocha, cerâmica, fibra de vidro e lã de aço). Quando comparadas, a amostra com fibra cerâmica apresentou o menor nível de desgaste. Nesse estudo, para as formulações com cerâmica, também foi constatado um aumento no nível do coeficiente de atrito em altas temperaturas (acima de 300 °C). Nesse contexto, os cerâmicos podem ser explorados como alternativa para contrabalancear o baixo desempenho tribológico apresentado pela fibra natural em elevadas temperaturas.

O presente trabalho tem como objetivo realizar a análise tribológica entre uma amostra de pastilha de freio comercial (amostra de referência, sem fibras naturais) e amostras formuladas com fibra natural/cerâmica. Para isso, o estudo foi realizado através de ensaios do tipo pino-sobre-disco no tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB). As amostras e o tribômetro foram dimensionados para reproduzir condições reais de frenagem veiculares. Os ensaios realizados foram baseados no procedimento padronizado AK Master (SAE J2522).

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Atrito e Tribologia

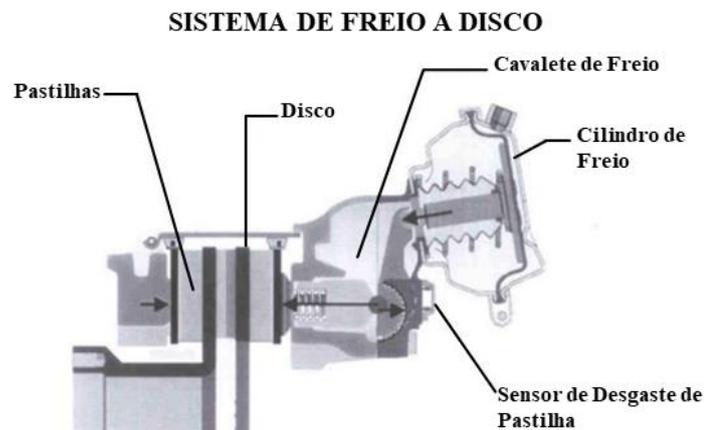
Conforme definido por Dowson, 1998, tribologia é a ciência e o estudo da interação de superfícies em movimento relativo. A origem da palavra é baseada na palavra grega “tribos”, que significa fricção. A tribologia abrange o estudo do atrito, desgaste, lubrificação e lubrificantes. Butt et al., 2003, afirmam que o atrito é a força entre superfícies em contato que apresentam resistência durante o movimento relativo. O desgaste pode ser definido como a perda progressiva de massa de um determinado corpo quando em contato com outro sólido, líquido ou gás.

De acordo com HUTCHINGS (2016), os primeiros estudos do conceito de atrito, lubrificação e desgaste (tribologia) foram reproduzidos e registrados por Leonardo da Vinci (1452-1519). Posteriormente, em 1699, Guillaume Amontón enunciou as duas “leis” fundamentais do atrito: a força de atrito independe da área de contato e a força de atrito é proporcional a carga normal aplicada. Atualmente, o atrito é caracterizado como atrito estático e atrito dinâmico. Quando há dois corpos em repouso, deve-se superar o atrito estático para que o movimento inicie. Já o atrito dinâmico (cinético) é a força mecânica entre duas superfícies que estão em movimento relativo (Butt, 2013).

2.2. Sistemas de frenagem

Sistemas de freio são desenvolvidos e projetados com a finalidade de diminuir ou preservar uma determinada velocidade e manter um veículo parado (LIMPERT, 2011). Para isso, o sistema converte energia cinética em energia térmica (principalmente) através da força de atrito entre o componente estático (lona ou pastilha) e o componente rotativo (tambor ou disco) (ERIKSSON, et al., 2002). Durante a frenagem em sistemas de freio a disco, um sistema hidráulico (ou pneumático) aplica uma pressão nas pastilhas que é convertida em uma força normal ao plano do disco. Essa força gera o atrito responsável pela redução da velocidade (Brezolin, 2007). O sistema é exemplificado pela Figura 1.

Figura 1 – Sistema de freio a disco pneumático [Brezolin, 2007].



2.3. Materiais de fricção

De acordo com Singh et al. (2020), os materiais de fricção utilizados em pastilhas de freio podem conter até 15 ingredientes diferentes. Conforme descrito por Eriksson (2002), a utilização desses ingredientes tem como objetivo constituir um material de fricção que apresente um coeficiente de atrito relativamente elevado e estável, taxa de desgaste baixa, com reduzido nível de ruído e vibração. Os principais elementos de um material de fricção podem ser categorizados como:

- Fibras estruturais: esses materiais são responsáveis pela resistência mecânica e integridade estrutural dos MF. Os mais utilizados são de origem metálica, mineral, sintética ou natural.
- Preenchimento/cargas: esses ingredientes não interferem no desempenho tribológico e são utilizados para reduzir o custo de produção e facilitar a fabricação. Diferentes minerais como barita e vermiculita/mica são frequentemente empregados na fabricação dos MF.
- Modificadores de atrito: o intuito desses materiais é assegurar a estabilidade do atrito e controlar as taxas de desgaste do par tribológico. Os lubrificantes sólidos (grafite) são responsáveis, principalmente em elevadas temperaturas, por diminuir e equilibrar o coeficiente de atrito. As partículas atritantes (como alumina ou sílica) são utilizadas para elevar o coeficiente de atrito.
- Aglutinantes: esses ingredientes promovem a unificação entre os demais componentes e garantem uma matriz termicamente estável. Pelo fato de possuir uma alta temperatura de degradação, a resina fenólica é comumente utilizada.

De acordo com Wei et al. (2019), as pastilhas de freio comerciais podem ser classificadas, conforme os ingredientes contidos nelas, da seguinte forma:

- *Low metallic* (LM): essas pastilhas contêm quantidades intermediárias de fibras metálicas. Elas apresentam um elevado coeficiente de atrito, bom desempenho em elevadas temperaturas e alta taxa de desgaste.
- *Semi metallic* (SM): apresentam em sua formulação uma quantidade predominante de fibras metálicas. Essas pastilhas têm uma taxa de desgaste baixa, mas geram ruídos.
- *Non-asbestos organic* (NAO): são pastilhas com composição majoritariamente orgânica (fibra mineral). Ou seja, sua formulação não possui amianto ou fibras metálicas ferrosas. Elas apresentam uma baixa taxa de desgaste, pouco ruído e desempenho moderado em altas temperaturas.

2.4. Cobre, Asbesto, Fibra natural e Cerâmica

O cobre é um modificador de atrito amplamente utilizado em pastilhas comerciais. Segundo Lee e Filip (2013), isso é explicado pelo fato de o cobre auxiliar na redução do efeito de *fade* (redução de atrito em temperaturas elevadas) e também melhorar a condução térmica. Em consequência disso, o cobre é utilizado na formulação das pastilhas de freio há décadas. Especialistas da indústria de freio, em conjunto com órgãos ambientais, estimam que o uso de cobre na composição das pastilhas tem aumentado nos últimos anos e isso está impactando o meio ambiente de forma negativa. Straffelini et al. (2015), demonstra que o uso de cobre em MF, devido à sua elevada toxicidade em seres humanos, tem sido constantemente debatido. Um estudo feito na Suécia estima que 3800 kg de cobre, proveniente das pastilhas de freio, foram emitidos em 2005. Essas partículas emitidas tendem a se depositar no solo e, posteriormente, serem transportadas pela chuva até rios e oceanos. Quando atingem o ambiente aquático, o cobre pode ocasionar um desequilíbrio na base da cadeia alimentar do ecossistema, afetando inclusive espécies específicas como o salmão-prateado (LEE; FILIP, 2013). Sendo assim, a legislação dos Estados Unidos exigiu que os MF apresentem menos de 5% de cobre em sua composição até 2021 e 0,5% até 2025 (STRAFFELINI et al., 2015). A constante necessidade da substituição do cobre em MF originou algumas pesquisas e patentes nessa área. Segundo a literatura, esses estudos examinaram diferentes alternativas como lubrificantes sólidos, fibra orgânica e outros metais. Entretanto, um número limitado de alternativas tem apresentado sucesso (MAHALE et al., 2019).

Conforme explicado por Singh et al. (2020), a utilização de fibra de asbesto teve um papel crucial e pioneiro no desenvolvimento dos materiais de fricção. Entretanto, é de conhecimento da literatura que o asbesto está diretamente relacionado com o desenvolvimento de diversos tipos de câncer e problemas respiratórios em seres humanos. Em consequência disso, o uso de asbesto foi proibido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (SINGH et al., 2020; KUMAR et al., 2022). Visando encontrar um substituto para o asbesto, diversos materiais foram e são testados por pesquisadores. Como alternativa, o material mais utilizado atualmente na formulação dos MF é a fibra de aramida (KUMAR et al., 2022). De acordo com Singh et al. (2020), estudos mostram que a aramida melhora as propriedades dos materiais de fricção. Apesar disso, o uso desse material não é tão apreciado devido ao seu alto custo, reciclagem complexa e consumo elevado de energia para sua fabricação.

Com a crescente preocupação ecológica e financeira referente ao uso desses materiais (cobre, asbesto e aramida), as fibras naturais, em função das suas boas propriedades, podem ser uma boa alternativa para substituí-los (YUN et al., 2010). Conforme explica Kumar et al. (2022), a fibra natural apresenta boas propriedades mecânicas e é utilizada na fabricação de peças de carro, capacetes e roupas a prova de balas. Apesar disso, as fibras naturais também apresentam algumas desvantagens como a elevada absorção da humidade, ocasionando na diminuição da adesão desta fibra na matriz polimérica. Entretanto, Singh et al. (2020) citam

alguns estudos que exploraram o uso de diferentes fibras naturais na formulação dos MF. Esses estudos, de forma geral, mostraram que essas fibras podem melhorar o desempenho tribológico dos materiais de fricção.

Conforme descrito por Casaril (2009), devido à elevada dureza, os materiais cerâmicos são utilizados na formulação das pastilhas de freio com o objetivo de elevar o coeficiente de atrito. Além disso, os cerâmicos também são amplamente empregados na composição dos MF na forma de fibra estrutural. De acordo com Aranganathan et al. (2016), isso é explicado pelo fato de as fibras cerâmicas possuírem uma boa resistência mecânica em elevadas temperaturas e baixa densidade. Kim et al. (2001) avaliaram materiais de fricção formulados com fibra de aramida e cerâmica. Nesse estudo, foi verificado que as fibras apresentaram elevados efeitos sinérgicos. Esses efeitos foram responsáveis por proporcionar um coeficiente de atrito estável e níveis de desgaste baixo. Isso foi atribuído à elevada resistência térmica da cerâmica e à capacidade da aramida de reter os ingredientes utilizados para preenchimento.

2.5. Normas e procedimentos experimentais

Em algumas situações de interação mecânica (componentes como engrenagens e rolamentos), é desejado que o contato entre as superfícies apresente um baixo coeficiente de atrito (CoF). No entanto, para os MF utilizados em pastilhas de freio é esperado que o CoF manifeste níveis mais elevados. Em ambos os casos, é requerido que os valores de CoF sejam estáveis e condizentes com a aplicação (FINDIK, 2014). Conforme Kchaou et al. (2019), o coeficiente de atrito entre a interface disco-pastilha é a propriedade tribológica mais importante para determinar o desempenho desse sistema. De acordo com Limpert (2011), em temperaturas altas (300 °C) os MF tendem a apresentar o fenômeno conhecido como *fade*. Durante esse evento, em decorrência da diminuição do coeficiente de atrito, ocorre a perda da eficiência de frenagem. Um outro fenômeno importante em ensaios com MF é a etapa de *recovery*. O *recovery* é uma etapa de ensaio de frenagem que visa analisar a recuperação do CoF em temperaturas menores (do que o *fade*), logo após a etapa de *fade* (NEIS, 2012).

Conforme demonstrado por Kchaou et al. (2019), existem diversos procedimentos normatizados que visam avaliar e comparar o desempenho entre diferentes materiais de fricção. Dentre essas normas, pode-se citar a SAE J2522, ECE R-90, FMVSS 135 e a ISO 26867. Esses procedimentos são extremamente importantes, pois eles garantem que os testes sejam padronizados e comparáveis. Dessa forma, as normas asseguram boas referências para estudos sobre a análise e comparação do desempenho de materiais de fricção. Conforme explicado por Neis (2012), grande parte dos testes de freio contemplam etapas usuais. De modo geral, esses procedimentos apresentam condições específicas de pressão, temperatura e velocidade.

3. METODOLOGIA

3.1. Amostras utilizadas durante os ensaios

Para o presente estudo, foram utilizados três corpos de prova de quatro formulações diferentes. Conforme mostrado pela Tabela 1, três delas (GF1, GF2 e GF3) compartilham o mesmo percentual de peso de sete ingredientes diferentes, variando apenas a quantidade de fibra natural/cerâmica. De acordo com a classificação feita anteriormente, devido à presença de lâ de aço, essas pastilhas podem ser classificadas como *Low metallic* (LM).

As amostras da formulação GF1 (em referência à *Grewia optiva fiber*) contêm 2,5% de fibra natural e 7,5% de cerâmica. A formulação GF2 é composta por 5% de fibra natural e 5% de cerâmica. E por fim, a GF3 contém 7,5% de fibra natural e 2,5% de cerâmica. Com o objetivo de realizar um estudo comparativo, também foram ensaiados três corpos de prova de MF tipicamente comercial (formulação desconhecida). A amostra comercial (COM) foi utilizada

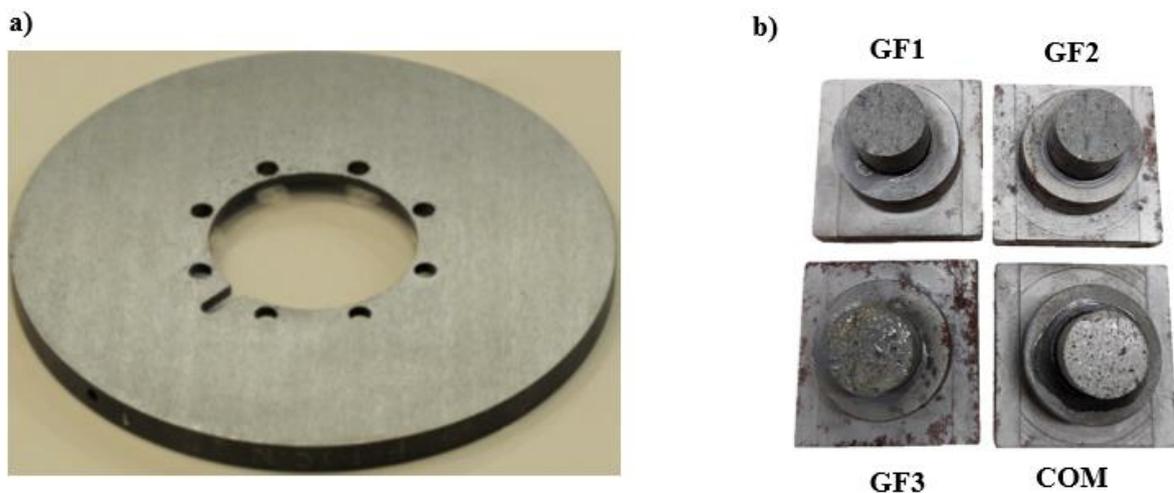
apenas como referência para a análise dos resultados. Dessa forma, a caracterização dos ingredientes contidos nela não são de interesse desse estudo.

Tabela 1– Formulação, em percentual de peso, das amostras utilizadas nos ensaios.

	Resina fenólica	Barita	Grafite	Vermiculita	Alumina	Lã de aço	Lã de rocha	Fibra natural	Cerâmica
GF1	10	50	6	5	3	6	10	2,5	7,5
GF2	10	50	6	5	3	6	10	5	5
GF3	10	50	6	5	3	6	10	7,5	2,5
COM	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Os corpos de prova utilizados no estudo foram fornecidos pelo LATRIB (Laboratório de Tribologia da UFRGS). Para possibilitar a realização dos ensaios, as amostras foram usinadas até atingir o diâmetro de 14 mm e fixadas em suportes metálicos. Para o componente rotativo, foi selecionado um disco similar aos que são comercialmente utilizados. O disco é fabricado em ferro fundido cinzento e possui as seguintes dimensões: espessura de 12 mm e diâmetro de 159 mm. Com o intuito de fazer a medição da temperatura dos ensaios, um termopar (tipo K) foi instalado no centro da trilha de atrito (região de contato entre as superfícies). O termopar foi posicionado a uma profundidade de 1,5 mm abaixo da superfície do disco. As amostras e o disco utilizado são exibidos na Figura 2.

Figura 2 – Corpos de prova utilizados: a) disco de ferro fundido cinzento [Adaptado de Barros, 2022], b) amostras dos materiais de fricção nos suportes metálicos.



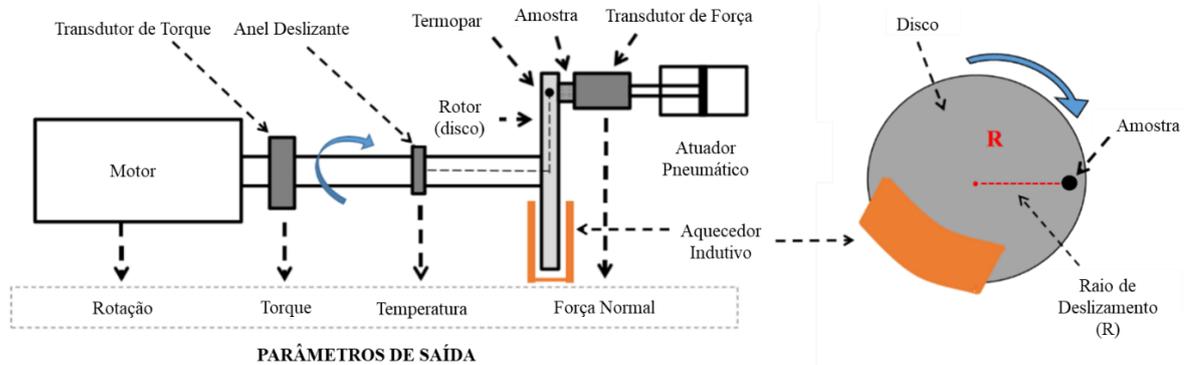
3.2. Equipamentos de ensaio

Para a realização dos ensaios de frenagem, o tribômetro do LATRIB (do tipo pino-sobre-disco) foi utilizado. Conforme descrito por Neis (2012), esse equipamento é capaz de replicar a pressão de contato, velocidade de deslizamento e temperatura (condições operacionais) presentes nos sistemas de freio automotivo. De acordo com o que é mostrado pela Figura 3, com o objetivo de controlar a temperatura do disco durante os ensaios, um aquecedor indutivo é posicionado próximo à superfície do rotor. No tribômetro, o coeficiente de atrito (μ) é obtido por medição indireta, ou seja, é calculado conforme a Equação 1.

$$\mu = \frac{T}{R \times F_N} \quad (1)$$

Onde μ representa o coeficiente de atrito (adimensional), T o torque do eixo (Nm), R o raio de deslizamento (m) e F_N representa a força normal aplicada sobre o material de fricção (N).

Figura 3 – Representação esquemática do tribômetro utilizado durante os ensaios [Adaptado de Gehlen et al., 2022].



3.3. Procedimento de ensaio

Com o objetivo de padronizar e controlar a condição inicial da superfície do disco, antes do início dos ensaios, a mesma foi lixada com lixas de diferentes granulometrias (80, 100, 240, 320, 500, 1200, 1500). Após essa etapa, com o objetivo de avaliar o desgaste, os corpos de prova são pesados e posicionados no atuador do tribômetro.

A metodologia dos ensaios tribológicos realizados foi fundamentada no procedimento normatizado AK Master (SAE J2522) para sistemas de freio a disco. Conforme disposto na Tabela 2, esse procedimento possui diversas etapas e é largamente utilizado na indústria para a caracterização de materiais de fricção (GEHLEN et al., 2022).

Tabela 2 – Etapas do procedimento adotado para os ensaios.

	Etapa	Nº Aplicações	Velocidade de frenagem [km/h]	Velocidade de deslizamento [m/s]	Temp. [°C]	Pressão de aplicação [kPa]	Pressão de contato [MPa]
Bloco 1	Caracterização a verde	30	80 - 30	7,5-2,81	100	3000	1,47
	Assentamento	64	80 - 30	7,5-2,81	100	1500-5100	0,74-2,51
	Valor característico	6	80 - 30	7,5-2,81	100	3000	1,47
	Sensibilidade à velocidade pressão	35	40-5/80-130/200-170	3,75-0,47/7,50-3,75/11,26-7,5/15-12,19/16,9-14	100	1000-8000	0,49-3,93
	Valor característico	6	80 -30	7,5-2,81	100	3000	1,47
	Frio	1	40-5	3,75-0,1	40	3000	1,47
	Valor característico	18	80-30	7,5-2,81	100	3000	1,47
Fade 1	Fade	15	100-5	9,38-0,5	100-550	16000(máx)	6,49
Recovery 1	Recovery	18	80-30	7,5-2,81	100	3000	1,47
TPS	Sensibilidade à temperatura/pressão	25	80-30	7,5-2,81	100-500	1000-8000	0,49-3,93
Recovery 2	Recovery	18	80-30	7,5-2,81	100	3000	1,47
Fade 2	Fade	15	100-5	9,38-0,5	100-550	16000(máx)	6,49
Recovery 3	Recovery	18	80-30	7,5-2,81	100	3000	1,47

Com o intuito de avaliar os resultados obtidos, foram definidos e calculados os parâmetros que buscam avaliar a performance dos materiais de fricção ensaiados. Os parâmetros utilizados para quantificar o desempenho tribológico neste estudo foram: nível de desgaste, Sensibilidade à velocidade e pressão do CoF (dentro do bloco 1), *Performance* μ , %Resistência ao *Fade*, Percentual de *Recovery* e Sensibilidade à temperatura e pressão do CoF (*TPS*).

Com o objetivo de avaliar o nível de desgaste das amostras, uma balança analítica com precisão de $\pm 0,1$ mg foi utilizada antes, durante e após os ensaios. Para avaliar o desgaste médio de cada formulação, foi realizado o cálculo da diferença de massa de cada amostra entre as principais etapas (Bloco 1, *Fade* 1, *Recovery* 1, *TPS*, *Recovery* 2, *Fade* 2 e *Recovery* 3). Os valores de desgaste médio foram normalizados em função da força normal e da distância de deslizamento. Além disso, com o intuito de realizar uma análise qualitativa da superfície das pastilhas, um microscópio óptico (Carl Zeiss, modelo Axio 19 Lab.A1, equipado com uma câmera digital CMOs) foi utilizado para capturar imagens (micrografias) das amostras.

O parâmetro *Performance* μ é calculado a partir do coeficiente de atrito médio das etapas (valor característico e *Recovery*) que apresentam velocidade de frenagem de 80-30 km/h, temperatura de 100 °C, pressão de aplicação de 3000 kPa. Esse parâmetro é responsável pela quantificação genérica do CoF das amostras e é utilizado para realizar o cálculo do %Resistência ao *Fade* e Percentual de *Recovery*.

O parâmetro %Resistência ao *Fade* é calculado conforme a Equação 2. As etapas de *fade* são constituídas por aplicações de frenagem com curta duração e temperaturas elevadas. O %Resistência ao *Fade* tem como objetivo avaliar o quanto o CoF do MF é sensível ao aumento da temperatura durante as frenagens (quanto maior o valor de %Resistência, melhor o desempenho tribológico).

$$\%Resistência\ ao\ Fade = 100 - \left(\frac{Performance\ \mu - Fade\ \mu}{Performance\ \mu} \times 100 \right) \quad (2)$$

Onde *Fade* μ representa o menor valor de coeficiente de atrito apresentado durante a etapa do *Fade*.

O parâmetro %*Recovery* é calculado conforme a Equação 3. Conforme exposto pela Tabela 2, as etapas de *Recovery* são realizadas após as aplicações com elevadas temperaturas (*Fade* e *TPS*) e têm como objetivo avaliar a capacidade dos MF de retomar o coeficiente de atrito ao valor nominal de referência (*Performance* μ). A relação calculada pela Equação 3 indica que quanto maior o valor do %*Recovery*, melhor é o desempenho tribológico da amostra.

$$\%Recovery = \frac{Recovery\ \mu}{Performance\ \mu} \times 100 \quad (3)$$

Onde *Recovery* μ representa o coeficiente de atrito médio durante a etapa de *Recovery*.

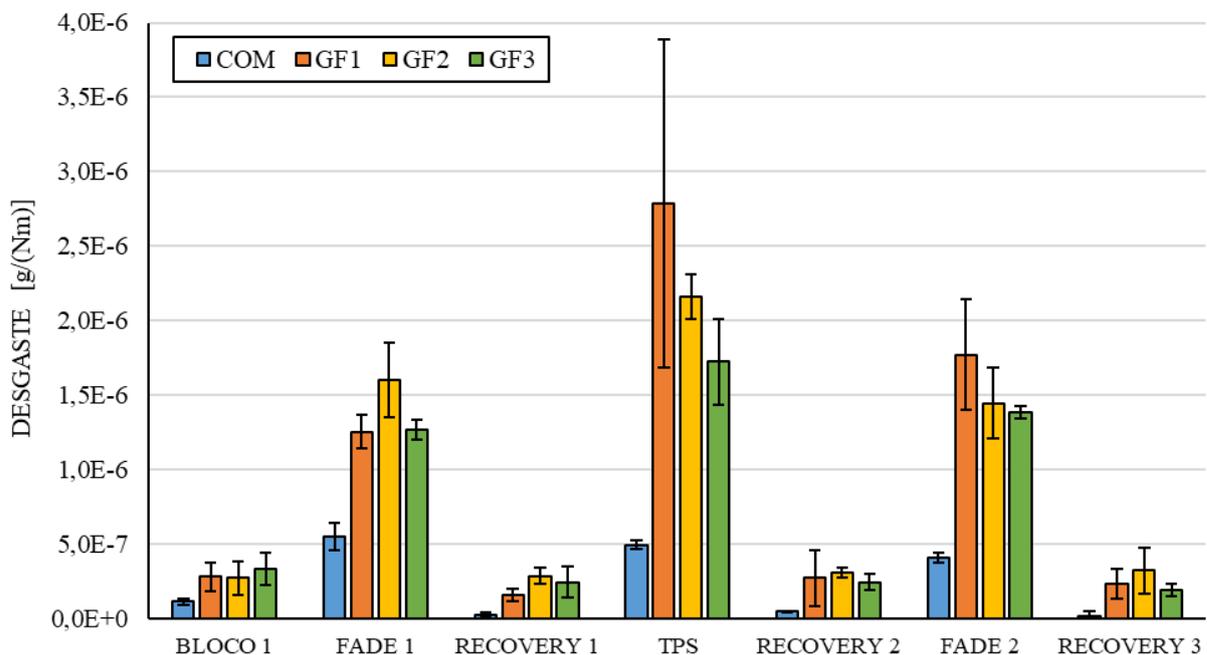
Os demais parâmetros (Sensibilidade à pressão/velocidade e temperatura do coeficiente de atrito) são obtidos através do valor médio do CoF medido pelo tribômetro durante as respectivas etapas listadas na Tabela 2. Os dados foram tratados e plotados em gráficos com o auxílio do *software Excel*. Além disso, com o objetivo de avaliar se as variações numéricas entre determinadas condições apresentaram diferenças significativas, foi utilizada a técnica de Análise de variância (ANOVA).

4. RESULTADOS

4.1. Desgaste

Os valores médios de desgaste apresentados pelas amostras durante todas as etapas dos ensaios (bloco 1, *fade*, *recovery* e *TPS* – sensibilidade à temperatura e pressão) são exibidos na Figura 4. As barras de erro presentes nesse e nos próximos gráficos representam a variação, em desvio padrão, entre todas as três aplicações de cada formulação. A amostra COM apresentou o menor desgaste em todas as etapas. Isso pode ser explicado pela mais complexa formulação da amostra comercial. Por outro lado, entre as amostras com fibra natural e cerâmica, é observado que a GF1 (7,5% de fibra cerâmica) apresentou os maiores níveis de desgaste durante as etapas com maior temperatura e pressão (*fades* e *TPS*). Durante essas etapas, as amostras são submetidas a elevadas temperaturas (até 550 °C) e diferentes pressões. Convém destacar que a amostra GF3 (7,5% de fibra natural) exibiu os menores níveis de desgaste médio durante as etapas com elevada temperatura. Sendo assim, com base no valor médio de desgaste normalizado, a adição de fibra natural na formulação das amostras pode estar relacionada com o aumento da resistência ao desgaste. Durante as demais aplicações (temperaturas abaixo de 200 °C, como em bloco 1 e *recovery*), as formulações contendo fibra natural e cerâmica apresentaram níveis similares de desgaste. Dessa forma, em baixas temperaturas, o aumento percentual de fibra natural não prejudicou e nem melhorou a resistência ao desgaste, ou seja, seu efeito foi neutro (desprezível).

Figura 4 – Desgaste médio normalizado das amostras submetidas ao ensaio AK Master.

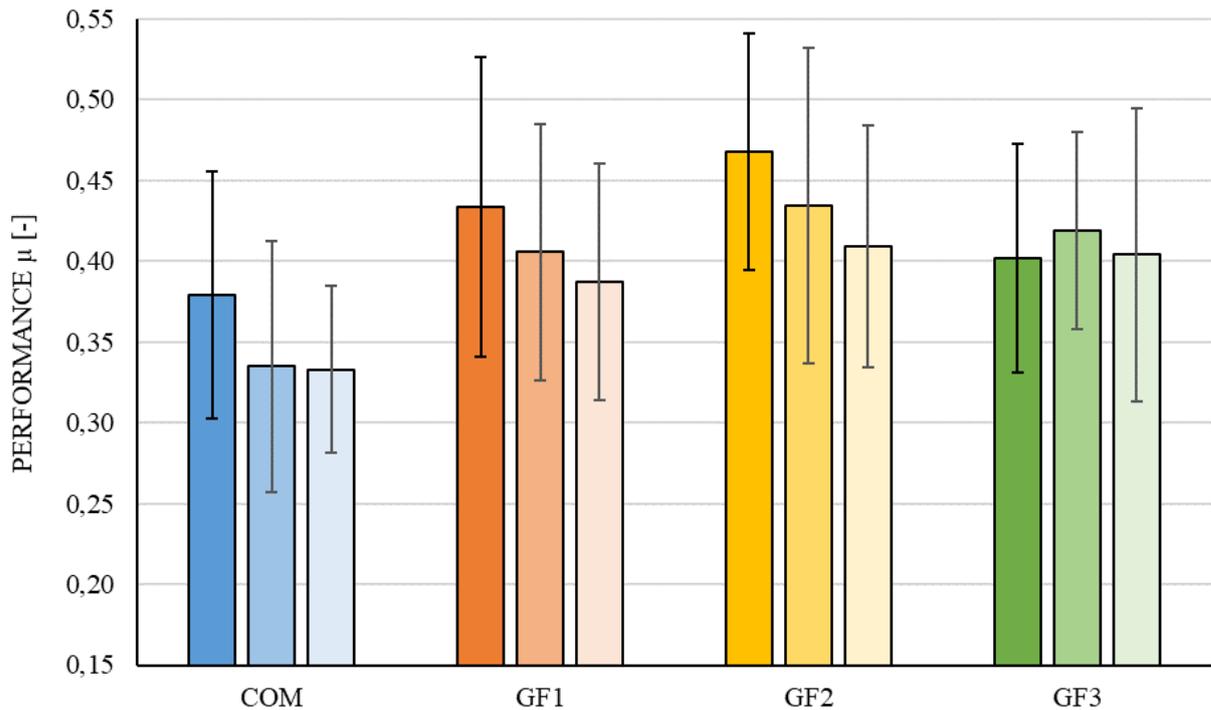


4.2. Performance μ

A Figura 5 apresenta os valores médios de *Performance μ* do coeficiente de atrito de todas as amostras ensaiadas. Conforme comentado anteriormente, esse parâmetro tem como objetivo estabelecer um valor genérico para o coeficiente de atrito e é obtido através da média dos valores de CoF das aplicações em que o material não é submetido a alta temperatura e pressão (etapas de Valor característico e *Recovery*). A amostra comercial exibiu os menores valores de *Performance μ* , apresentando um valor médio de 0,35. A amostra GF2 (5% de fibra natural e

5% de cerâmica) apresentou o maior valor médio de *Performance* μ (0,44). Em relação às amostras GF1 e GF3, é possível verificar que os valores médios de CoF foram aproximados (0,41). O fato de as amostras mostrarem um valor de *Performance* μ superior à amostra COM pode ser explicado pela presença da fibra cerâmica. Conforme explicado por Casaril (2009), os materiais cerâmicos apresentam elevada dureza e são utilizados na formulação dos MF com o intuito de elevar o coeficiente de atrito.

Figura 5 – Valores médios de *Performance* μ das etapas de Valor característico e Recovery.

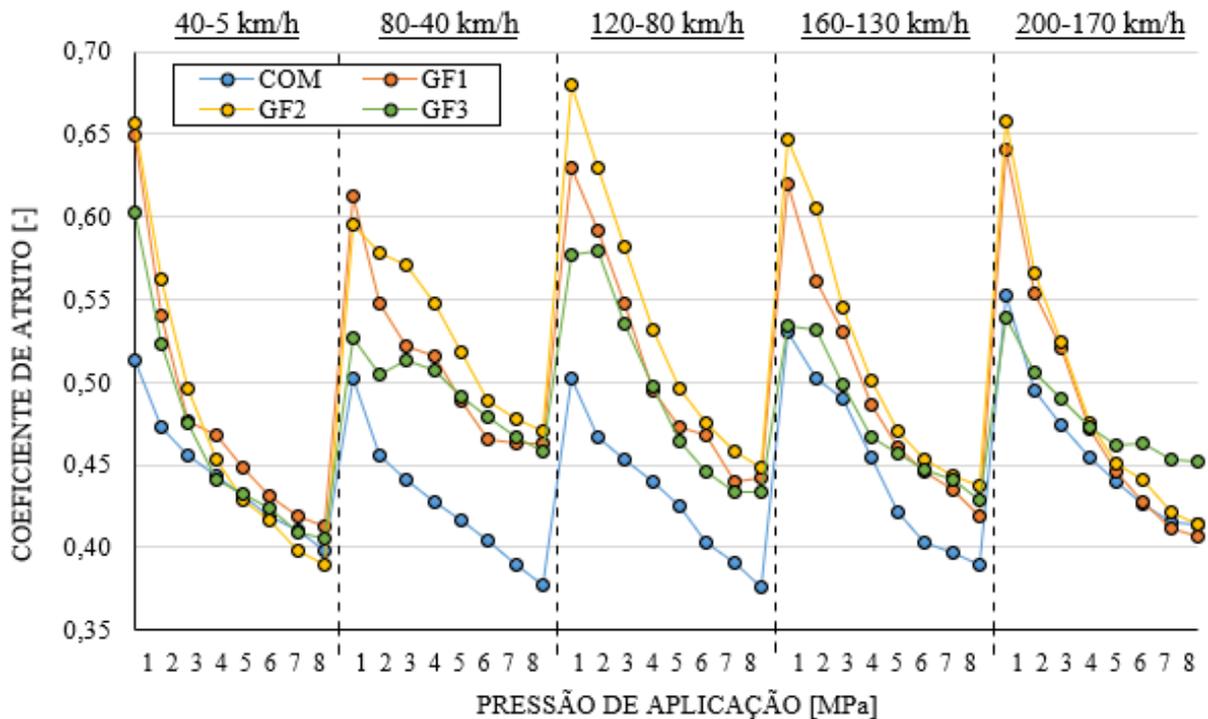


4.3. Sensibilidade à velocidade e pressão

A Figura 6 mostra o coeficiente de atrito (CoF) médio de cada amostra ensaiada em função de diferentes velocidades e pressões de contato (etapa de sensibilidade à velocidade e pressão). Pode-se observar que todas as formulações apresentaram uma diminuição no CoF médio com o aumento da pressão. Esse comportamento é esperado e também foi relatado por Wei et al. (2019). Conforme descrito por Kalel et al. (2021), o aumento da pressão pode gerar uma maior área de contato, ocasionando a diminuição localizada da pressão de contato nas asperezas dos MF. Com relação à estabilidade do CoF, conforme disposto na literatura (KIM et al., 2001; SINGARAVELU et al., 2019), é requerido que os materiais de fricção, quando submetidos a diferentes faixas de pressão e velocidade, apresentem valores de CoF estáveis. É possível observar que a formulação COM, embora apresente valores de CoF inferiores às amostras com fibra natural, exibiu um coeficiente de atrito mais estável frente à pressão e velocidade ($\Delta\mu_{COM} = 0,18$) quando comparada com as demais amostras ($\Delta\mu_{GF1} = 0,24$; $\Delta\mu_{GF2} = 0,29$; $\Delta\mu_{GF3} = 0,20$;). Para o $\Delta\mu$ calculado anteriormente, foi considerada a diferença entre o maior e o menor valor do CoF médio ($\Delta\mu = CoF_{m\acute{a}x} - CoF_{m\acute{i}n}$) de cada amostra durante toda a etapa de sensibilidade à velocidade e pressão. Ainda com relação à estabilidade do CoF, observou-se que a amostra GF3 (maior percentual de fibra natural) se destacou durante a etapa de 80-40 km/h, com boa estabilidade ao aumento da pressão ($\Delta\mu = 0,07$). Sobre o comportamento de CoF com a velocidade, verificou-se que as amostras apresentaram tendências similares, com ligeiro acréscimo de CoF na direção das velocidades mais elevadas. De forma geral, pode-se

concluir que todas as amostras mostraram reduzida variação de CoF em função do aumento da velocidade.

Figura 6 – Coeficiente de atrito médio de cada formulação em função de diferentes velocidades e pressões de contato.



4.4. Resistência ao *fade*

A resistência ao *fade* das duas etapas (*fade 1* e *2*) para cada formulação é mostrada pela Figura 7. Os valores de percentual médio de resistência ao *fade* foram calculados conforme a Equação 2. O parâmetro de resistência ao *fade* visa mensurar o quanto o desempenho (CoF) de um MF é afetado por diferentes aplicações de temperaturas, sendo que 100% indica a performance ideal (CoF não é alterado pela temperatura). Em ambas as etapas de *fade*, a amostra COM apresentou os maiores valores de resistência. Esse desempenho é esperado e, conforme comentado anteriormente, pode ser explicado pelo fato de possuir uma formulação mais complexa que as demais amostras. Entre as amostras desenvolvidas com fibra natural e cerâmica, é possível observar que a amostra GF3 (maior percentual de fibra natural) apresentou uma melhor resistência ao *fade 1* quando comparada com a formulação GF1 (menor percentual de fibra natural). A partir da técnica de Análise de variância (ANOVA), foi possível verificar que houve uma diferença significativa no desempenho da GF1 em relação às outras (GF2 e GF3). Essa diferença pode ser explicada pela pior habilidade de formação de platôs de contato da amostra GF1. Conforme mostrado pela Figura 8, é possível observar que a amostra GF1 (Figura 8-a) apresenta uma menor quantidade de platôs (coloração clara) quando comparada com a amostra GF3 (Figura 8-b). De acordo com o que é explicado por Barros (2022), o contato tribológico é responsável pela deformação plástica das fibras (platô primário) e posterior compactação de detritos (platô secundário). Com base nisso, a formação de platô pode estar relacionada com uma maior área de contato e menores pressões específicas, reduzindo o nível de desgaste e melhorando o desempenho tribológico em elevadas temperaturas. Sendo assim, um maior percentual de fibra orgânica pode estar relacionado com uma maior resistência ao *fade 1* devido à maior formação de platôs. As Figuras A1-A2 do Apêndice A apresentam as

microscopias das amostras GF2 e COM após a etapa de *fade 1*. Com relação à etapa do *fade 2*, as amostras com fibra natural e cerâmica apresentaram resultados similares ao da amostra comercial. Esse aumento na resistência ao *fade* durante o *fade 2* pode ser atribuído à maior homogeneidade pós-cura e queima de voláteis ocasionada pelo “assentamento” térmico da primeira etapa (*fade 1*) (GEHLEN et al., 2022). A amostra GF2 (5% de fibra natural e 5% de fibra cerâmica), considerando o desvio padrão, mostrou a menor resistência ao *fade 2*. Porém, ainda assim ela apresentou um desempenho que pode ser considerado “aceitável” no *fade 2* (acima de 80%). Entre as amostras formuladas com fibra natural e cerâmica, os valores calculados no *fade 2* mostram pouca diferença. Isso pode indicar que percentuais maiores de fibra orgânica não interferem no desempenho do MF durante a etapa do *fade 2*.

Figura 7 – Percentual médio de resistência ao *fade* para cada formulação (quanto maior a resistência, melhor).

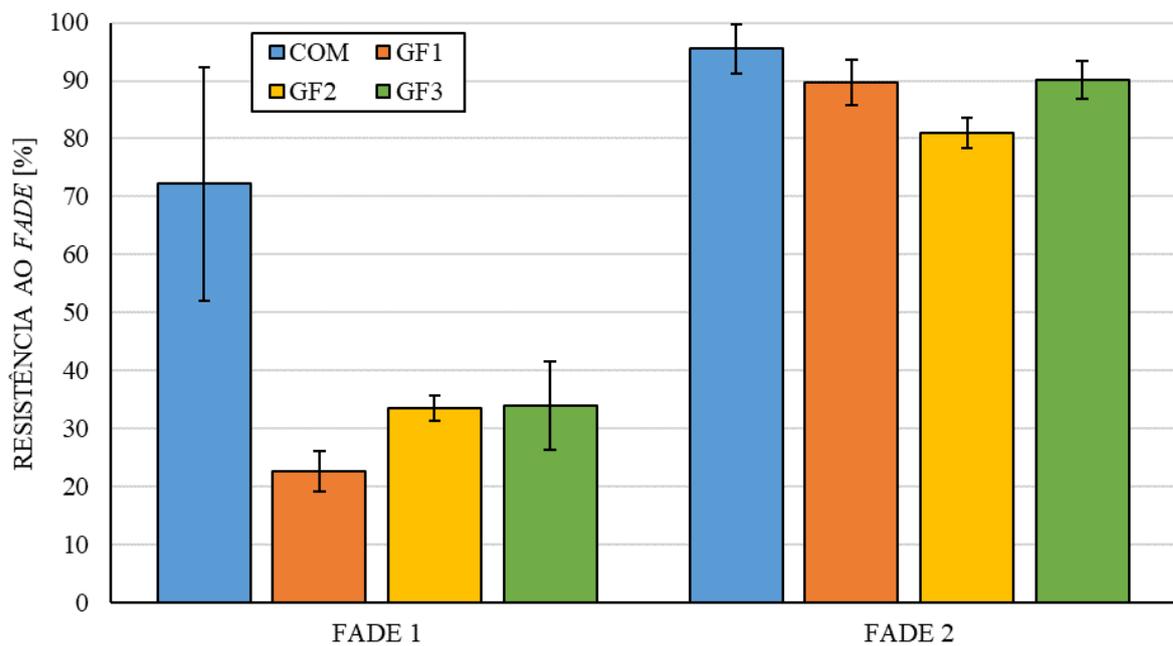
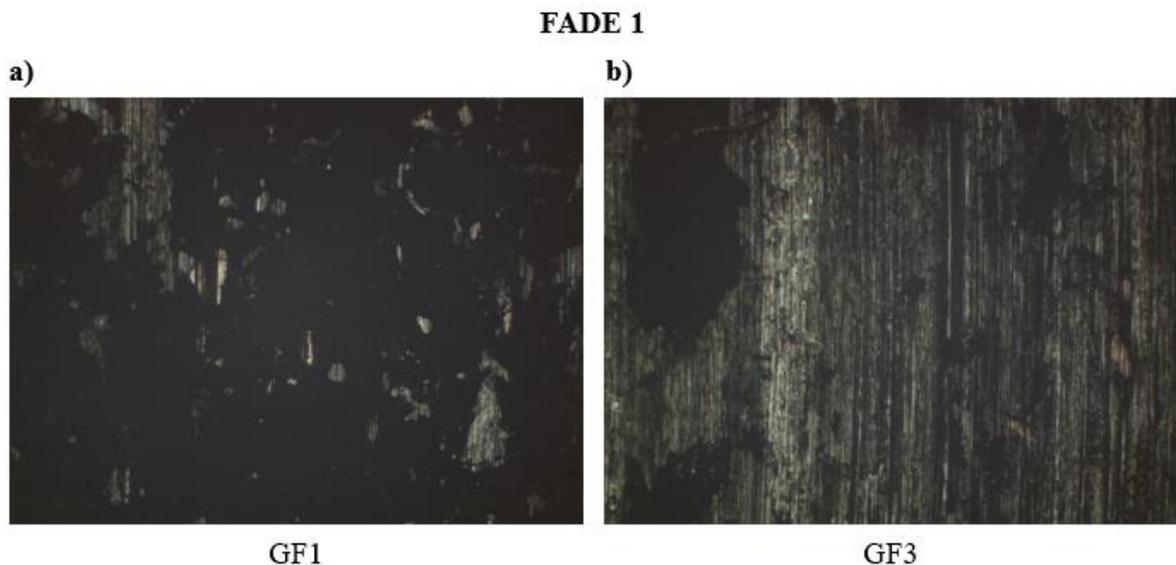


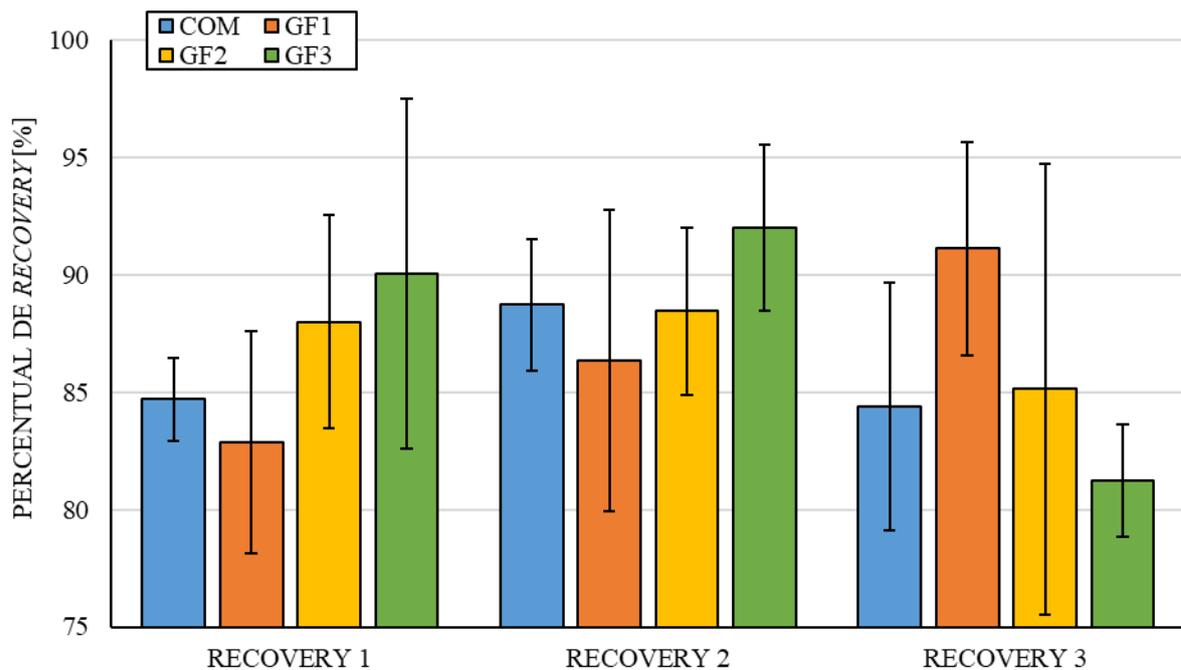
Figura 8 – Microscopias das amostras após a etapa de *fade 1*: a) formulação GF1, b) formulação GF3.



4.5. Percentual de *recovery*

O percentual de *recovery*, calculado conforme a Equação 3, das três etapas para cada formulação é mostrado na Figura 9. O parâmetro de percentual de *recovery* tem como objetivo mensurar a capacidade do material de fricção de se recuperar após aplicações de alta temperatura, sendo que 100% ou mais indica a performance ideal. Considerando o desvio padrão, todas amostras apresentaram valores de *recovery* similares em todas as etapas. Em relação às formulações com fibra natural e cerâmica, destaca-se o desempenho da GF3 (amostra com maior percentual de fibra natural). Nas duas primeiras etapas, a GF3 apresentou resultados superiores ao das demais amostras e, durante o *recovery* 3, o desempenho de GF3 foi próximo ao da formulação comercial. Além disso, todas as três amostras com fibras naturais exibiram resultados acima de 80% no *recovery*. Conforme explicado por Gehlen et al. (2022), resultados de percentual médio de *recovery* superiores a esse valor podem ser considerados satisfatórios. Sendo assim, os resultados podem indicar que a adição de fibra orgânica na composição das amostras não alterou o desempenho tribológico dos MF em relação à métrica de *recovery*.

Figura 9 - Percentual médio de *recovery* para cada formulação (quanto maior o *recovery*, melhor).

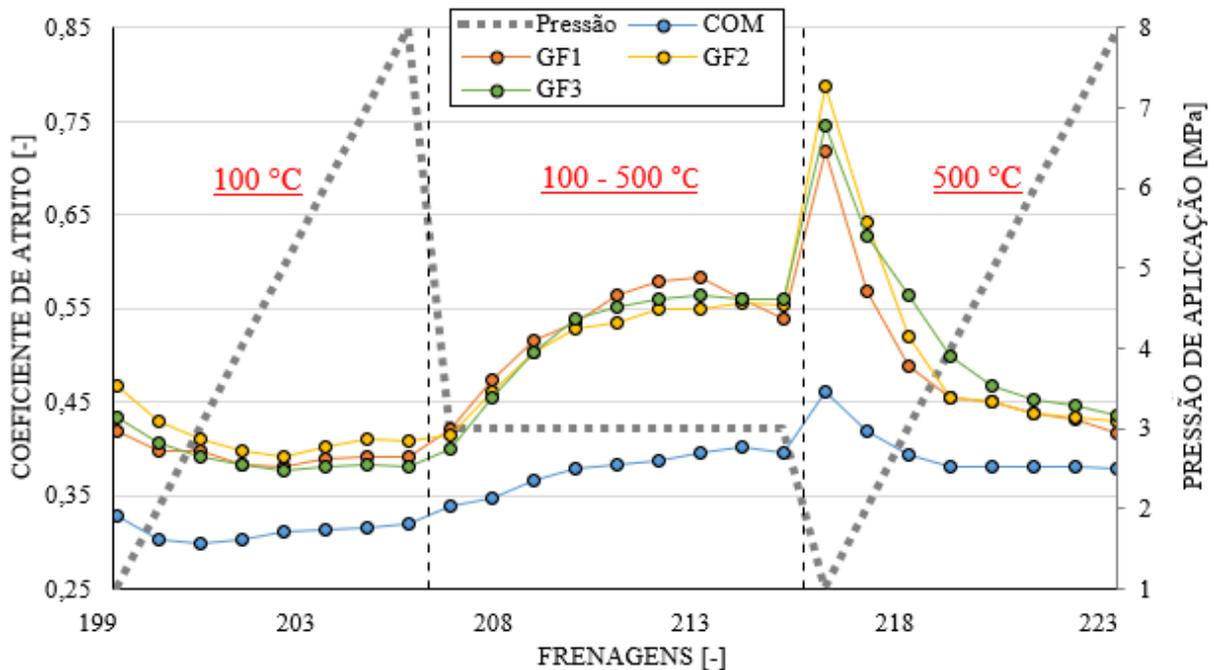


4.6. Sensibilidade à temperatura e pressão (TPS)

Em relação aos resultados da sensibilidade à temperatura e pressão, a Figura 10 exibe o gráfico do CoF médio das amostras em função de diferentes temperaturas/pressões. Na primeira etapa (a 100 °C), todas as formulações apresentaram um coeficiente de atrito médio estável ($\Delta\mu_{\text{COM}} = 0,03$; $\Delta\mu_{\text{GF1}} = 0,04$; $\Delta\mu_{\text{GF2}} = 0,08$; $\Delta\mu_{\text{GF3}} = 0,06$), indicando assim uma relativamente baixa sensibilidade à variação de pressão em baixa temperatura. Na terceira etapa (500 °C), as formulações apresentaram uma considerável variação do CoF em relação à pressão ($\Delta\mu_{\text{COM}} = 0,08$; $\Delta\mu_{\text{GF1}} = 0,30$; $\Delta\mu_{\text{GF2}} = 0,36$; $\Delta\mu_{\text{GF3}} = 0,31$), superior à da etapa 1. Apesar da amostra COM também apresentar uma variação relativamente alta nessa etapa, sua sensibilidade à temperatura e pressão é menor que das demais amostras. Na etapa 2, nota-se que o aumento da temperatura causou uma elevação no coeficiente de atrito. Em relação à

análise das formulações com fibra natural, nota-se que as três amostras apresentaram resultados similares entre si. Isso pode indicar que a diferença no percentual de fibra natural entre as amostras não interfere no CoF e não altera a sensibilidade à temperatura. De modo geral, embora em uma magnitude diferente, as formulações com fibra natural e cerâmica apresentaram resultados (em termos de tendências) similares à amostra de referência (COM).

Figura 10 - Coeficiente de atrito médio de cada formulação em função de diferentes temperaturas e pressões de contato.



5. CONCLUSÃO

O trabalho em questão teve como objetivo avaliar o desempenho tribológico de amostras de pastilha de freio comercial (amostra de referência) e amostras formuladas com fibra natural e cerâmica submetidas a um procedimento normatizado (Ak Master). A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Entre as amostras com fibra natural e cerâmica, a amostra GF3 (7,5% de fibra natural) apresentou os menores níveis de desgaste durante as etapas com elevadas pressões e temperaturas. Esses resultados foram satisfatórios e podem indicar uma possível relação entre a adição de fibra natural na formulação das amostras e o aumento da resistência ao desgaste.
- Em relação ao valor nominal do coeficiente de atrito (*Performance* μ), as formulações com fibra natural e cerâmica exibiram valores de CoF médio superiores à amostra comercial (COM). Esse desempenho foi atribuído ao fato dos materiais cerâmicos possuírem elevada dureza.
- Durante a etapa que visa avaliar a sensibilidade à velocidade e pressão dos materiais de fricção, a amostra comercial apresentou o CoF mais estável. Apesar disso, as amostras com fibra natural/cerâmica mostraram reduzida variação de CoF em função do aumento da velocidade e pressão. A classificação da estabilidade das amostras, de melhor para pior, é: COM > GF3 > GF1 > GF2.
- Entre as formulações com fibra natural/cerâmica, a amostra GF3 mostrou o melhor desempenho durante a etapa do *fade 1*. Essa performance foi atribuída à melhor

habilidade de formação de platôs de contato, indicando que percentuais maiores de fibra orgânica (*Grewia optiva*) podem estar relacionados com uma maior resistência ao *fade*.

- Todas as formulações apresentaram valores satisfatórios (acima de 80%) de percentual médio de *recovery*. Dessa forma, os resultados podem indicar que não há uma forte dependência entre a adição de fibra natural na formulação dos MF e o desempenho tribológico em relação a métrica de *recovery*.
- Em baixa temperatura (100 °C), os resultados indicam uma moderada sensibilidade à variação de pressão das formulações. Contudo, em elevadas temperaturas (500 °C), as amostras com fibra natural e cerâmica (GF1, GF2 e GF3) apresentaram uma variação considerável do CoF em relação ao aumento da pressão. Apesar disso, as formulações com fibra natural exibiram resultados similares entre si, indicando que a adição de fibra orgânica não alterou a sensibilidade à temperatura.

De modo geral, entre as formulações com fibra natural e cerâmica, a adição de fibra natural na composição das amostras resultou em uma maior resistência ao desgaste, maior estabilidade à pressão e velocidade, maior resistência ao *fade* e maior percentual médio de *recovery*. Além disso, o ponto negativo das fibras naturais (desempenho inferior em altas temperaturas) foi contornado pela melhor habilidade de formação de platôs de contato das fibras orgânicas. Sendo assim, percebe-se que os materiais de fricção formulados com fibra natural e cerâmica apresentaram resultados satisfatórios, sinalizando o potencial uso desses materiais como alternativa ao cobre/asbesto.

Para estudos futuros, pode-se avaliar de forma mais aprofundada a influência e relação da formação de platôs durante as etapas com elevadas temperaturas (*fade*). Esse estudo mais aprofundado, em conjunto com a avaliação do tribofilme, pode auxiliar em uma melhor análise do nível de desgaste apresentado pelas amostras com fibra natural e cerâmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARANGANATHAN, N.; BIJWE, Jayashree. Development of copper-free eco-friendly brake-friction material using novel ingredients. **Wear**, v. 352, p. 79-91, 2016.
- BARROS, Liu Yesukai de. **Estudo da transição do regime de desgaste de materiais de fricção aplicados a freios automotivos**. 2022.
- BREZOLIN, André. **Estudo de geração de trincas térmicas em discos de freios de veículos comerciais**. 2014.
- BUTT, Hans-Jürgen; GRAF, Karlheinz; KAPPL, Michael. **Physics and chemistry of interfaces**. John Wiley & Sons, 2003.
- CASARIL, Alexandre. **Modelagem matemática e avaliação experimental do módulo de elasticidade de materiais compósitos particulados de matriz fenólica para uso como material de fricção**. 2009.
- Dowson, D.; "**History of Tribology**", John Wiley & Sons, Inc., 2nd edition, 1998.
- HUTCHINGS, Ian M. Leonardo da Vinci' s studies of friction. **Wear**, v. 360, p. 51-66, 2016.
- ERIKSSON, Mikael; BERGMAN, Filip; JACOBSON, Staffan. On the nature of tribological contact in automotive brakes. **Wear**, v. 252, n. 1-2, p. 26-36, 2002.
- FINDIK, Fehim. Latest progress on tribological properties of industrial materials. **Materials & Design**, v. 57, p. 218-244, 2014.
- GEHLEN, G. S. et al. Tribological performance of eco-friendly friction materials with rice husk. **Wear**, v. 500, p. 204374, 2022.
- KALEL, Navnath et al. Copper-free brake-pads: A break-through by selection of the right kind of stainless steel particles. **Wear**, v. 464, p. 203537, 2021.
- KCHAOU, Mohamed et al. Tribological performance characterization of brake friction materials: What test? What coefficient of friction?. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 233, n. 1, p. 214-226, 2019.
- KIM, S. J. et al. Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material. **Wear**, v. 251, n. 1-12, p. 1484-1491, 2001.
- KUMAR, Naresh et al. Napier natural fibre used as reinforcement polymer composite: As asbestos free brake friction material. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 2532-2536, 2022.
- LEE, Poh Wah; FILIP, Peter. Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials. **Wear**, v. 302, n. 1-2, p. 1404-1413, 2013.
- LIMPERT, Rudolf. **Brake design and safety**. SAE international, 2011.
- MA, Yunhai et al. Effects of bamboo fibers on friction performance of friction materials. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 26, n. 6, p. 845-859, 2013.
- MAHALE, Vishal; BIJWE, Jayashree; SINHA, Sujeet. A step towards replacing copper in brake-pads by using stainless steel swarf. **Wear**, v. 424, p. 133-142, 2019.
- NEIS, P. D. **Projeto e construção de um tribômetro com controle independente da temperatura do disco**. 2012, 11 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- NIRMAL, Umar; HASHIM, Jamil; AHMAD, MMH Megat. A review on tribological performance of natural fibre polymeric composites. **Tribology International**, v. 83, p. 77-104, 2015.
- ÖZTÜRK, Bülent; ARSLAN, Fazli; ÖZTÜRK, Sultan. Effects of different kinds of fibers on mechanical and tribological properties of brake friction materials. **Tribology Transactions**, v. 56, n. 4, p. 536-545, 2013.
- SAE International. J2522: Surface vehicle recommended practice Dynamometer global brake effectiveness (AK Master). [s. l.], 2003.

SINGARAVELU, D. Lenin; VIJAY, R.; FILIP, Peter. Influence of various cashew friction dusts on the fade and recovery characteristics of non-asbestos copper free brake friction composites. **Wear**, v. 426, p. 1129-1141, 2019.

SINGH, Tej et al. Comparative performance assessment of pineapple and Kevlar fibers based friction composites. **Journal of materials research and technology**, v. 9, n. 2, p. 1491-1499, 2020.

STRAFFELINI, Giovanni et al. Present knowledge and perspectives on the role of copper in brake materials and related environmental issues: A critical assessment. **Environmental Pollution**, v. 207, p. 211-219, 2015.

WEI, L.; CHOY, Y. S.; CHEUNG, C. S. A study of brake contact pairs under different friction conditions with respect to characteristics of brake pad surfaces. **Tribology International**, v. 138, p. 99-110, 2019.

XIN, Xu; XU, Cheng Guang; QING, Liu Fei. Friction properties of sisal fibre reinforced resin brake composites. **Wear**, v. 262, n. 5-6, p. 736-741, 2007.

YUN, Rongping; FILIP, Peter; LU, Yafei. Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials. **Tribology International**, v. 43, n. 11, 2010.

APÊNDICE A

Figura A1 – Microscopia da amostra GF2 após a etapa de *fade 1*.



Figura A2 – Microscopia da amostra COM após a etapa de *fade 1*.

