

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE PARTÍCULA DE  
CARBETOS DE SILÍCIO NO DESEMPENHO DE PASTILHAS  
DE FREIO AUTOMOTIVO**

**THAIS RODRIGUES GOMES**  
Engenheira Química

Porto Alegre  
(2022)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DE PARTÍCULA DE  
CARBETOS DE SILÍCIO NO DESEMPENHO DE PASTILHAS  
DE FREIO AUTOMOTIVOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais.

Porto Alegre

2022

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Celso Fredel

Dr. Alexandre Casaril

Prof. Dr. Afonso Reguly

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Afonso Reguly

## **AGRADECIMENTOS**

*Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais e a empresa Fras-le S.A onde realizei o estudo. Obrigada pela oportunidade de realização do trabalho e pela disponibilidade de realização de todos os ensaios necessários. Ao Diego Masotti por acreditar no tema e compartilhar o conhecimento e as discussões.*

*Agradeço aos meus professores, em especial ao meu orientador Carlos P. Bergmann. Obrigada pela paciência e pela perseverança durante esses anos.*

*Agradeço aos meus pais, Juçara Gomes e Everton Gomes, e ao meu noivo Lennon Reis por acreditarem em mim e sempre me incentivarem. Durante esses anos do mestrado muitas mudanças aconteceram, vocês fazem parte de todas elas. Muito obrigada por nunca desistirem e por sempre estarem ao meu lado. Vocês são a minha base e o motivo de eu querer sempre ser uma pessoa melhor.*

*Por último, muito obrigada Deus, por colocar no meu caminho essas pessoas incríveis e por estar ao meu lado em cada conquista.*

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.

Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Martin Luther King

## RESUMO

A pesquisa apresentada neste artigo concentra-se no efeito de três carbeto de silício, com diferentes tamanhos de partícula, sobre as características de desempenho, desgaste e ruído de materiais de pastilhas de freio. Tais características foram testadas em três tipos diferentes de dinamômetros, usando um sistema de freio de carro. O diâmetro das partículas de carbeto de silício utilizadas comercialmente eram de 3  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$  e 130  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Outras propriedades como pureza e morfologia, foram avaliadas através das técnicas de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. O método de desgaste abrasivo em microescala foi adaptado para medir a abrasividade dos carbeto de silício, a fim de prever o comportamento do produto. Os resultados desses testes mostraram que um incremento no tamanho das partículas aumentou a abrasividade e a taxa de desgaste da pastilha de freio. Também aumentou o coeficiente de atrito comparando o carbeto fino com o intermediário, mas estabilizou-se comparando o intermediário com o grosso. O mesmo comportamento do coeficiente de atrito foi observado no teste de ruído.

Palavras-chaves: tamanho de partícula, abrasivos, carbeto de silício, desgaste, pastilha de freio.

## **ABSTRACT**

The research presented in this work is focused on understanding the influence of the exchange of three different size silicon carbides in brake pads. The effects on the performance, wear and noise characteristics were tested in three different methods at an inertia brake dynamometer, using a car brake system. The diameter of the commercially used silicon carbide particles was 3  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$  and 130  $\mu\text{m}$  respectively. The morphology was tested through the technique of scanning electron microscopy and a microscale abrasive wear method was adapted to measure the abrasivity of the silicon carbides, in order to predict the product behavior and evaluated the wear mechanisms. The results of these tests showed that an increment of the particle size increased the abrasivity and the wear rate result of the brake pad. Also increased the friction coefficient comparing the fine carbide with the intermediary, but it had stabilize comparing the intermediary with the coarse one. The same behavior of the friction coefficient was observed on the noise test.

Keywords: particle size, abrasives, silicon carbide, wear, brake pad.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Número de publicações por ano na Science Direct sobre os quatro assuntos desde 2011. .....	2
Figura 2 Classificação dos materiais compósitos poliméricos. ....	6
Figura 3 Interação entre variáveis de desenvolvimento de produto. ....	8
Figura 4 Sistema de freio a) disco e b) tambor. Fonte: MOTORIST ASSURANCE PROGRAM, 2015 .....	9
Figura 5 Tribossistema para contato material de atrito e disco. Fonte: adaptado de (HOLMBERG <i>et al.</i> , 2007). ....	10
Figura 6 Níveis de estudo da tribologia de sistemas de freio. Fonte: adaptado de (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012); (HOLMBERG <i>et al.</i> , 2007). ....	11
Figura 7 Níveis de ensaios para estudo da tribologia do sistema de freio. Fonte: Adaptado de (BHUSHAN, 2001). ....	12
Figura 8 Classificação do desgaste abrasivo. Fonte: adaptado de (COLOMBO; FARIAS; BERTI, 2011). ....	13
Figura 9 Classificação do desgaste abrasivo quanto ao movimento do abrasivo a) dois corpos e b) três corpos. Fonte: HUTCHINGS (1992) .....	14
Figura 10 Escala de coeficiente de desgaste em função do mecanismo de desgaste. Fonte: adaptado de (HUTCHINGS, 1992). ....	14
Figura 11. Classificação do desgaste abrasivo quanto aos mecanismos de desgaste a) microsulcamento, b) formação de proa e c) microcorte. Fonte: (HOKKIRIGAWA; KATO, 1988). ....	15
Figura 12. Imagens fotográficas de matérias-primas de acordo com sua função: a) Aglomerante: resina fenólica; b) Fibra não-metálica: aramida; c) Fibra metálica: lã de aço; d) Carga	

orgânica: pó de caju; e) Carga inorgânica: barita; f) Lubrificante sólido: grafite; g) Abrasivo: carbetos de silício. Fonte: o autor.....	18
Figura 13 Influência do ângulo de ataque na intensidade do desgaste e no tipo de mecanismo. Fonte: ZUM GAHR (1987) .....	20
Figura 14 Exemplo de influência do formato da partícula no fator de forma. Fonte: RUSS (1995) .....	21
Figura 15 Taxa de desgaste em função do tamanho da partícula abrasiva. Fonte: Adaptado de MISRA e FINNIE (1981) .....	22
Figura 16 Cristais de carbetos de silício. Fonte: Refractory Metal (2022) .....	24
Figura 17 Fluxograma de ensaios de classificados conforme o nível e a aplicação.....	25
Figura 18 Gráfico de distribuição do tamanho de partícula dos carbetos de silício.....	28
Figura 19 Morfologia dos carbetos de silício: imagens fotográficas e por microscopia óptica. ....	29
Figura 20. Desenho 2D pastilha de freio de referência geométrica PD/82. ....	30
Figura 21 Equipamento para a determinação da abrasividade (esquerda) e seu esquema de funcionamento (direita). Fonte: KELLY; HUTCHINGS (2001). ....	32
Figura 22 Esquema de funcionamento de um dinamômetro inercial. Fonte: LINK, 2022 .....	35
Figura 23 Determinação da rugosidade média Ra.....	36
Figura 24 Esquema de posicionamento do microfone para o ensaio de ruído. Fonte: SAEJ2521, 2006 .....	39
Figura 25 Variação do volume desgastado em função do diâmetro médio das partículas dos carbetos.....	40
Figura 26 Imagens por microscopia óptica da da superfície submetida ao desgaste à a) dois corpos e b) três corpos. ....	42
Figura 27. Imagens por microscopia óptica das placas das crateras de abrasividade em placa de PMMA. ....	43

Figura 28. Variação da taxa de desgaste específica em função da severidade de contato. ....	43
Figura 29. Valores da densidade relativa dos materiais de atrito investigados. ....	45
Figura 30. Valores da dureza Gogan dos materiais de atrito investigados.....	45
Figura 31. Dureza Gogan dos materiais de atrito investigados em função do diâmetro médio das partículas dos carbeto.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Figura 32 Valores da resistência ao cisalhamento dos materiais de atrito investigados. ....	46
Figura 33 Valores de compressibilidade dos materiais de atrito investigados.....	47
Figura 34 Variação do desgaste de disco total em função do diâmetro médio da partícula.....	48
Figura 35 Variação do desgaste de disco em função da temperatura por etapa do ensaio.....	49
Figura 36 Variação da rugosidade do disco no ensaio de desgaste. ....	50
Figura 37 Diagrama adaptado de Eriksson; Bergman; Jacobson (2002) para formação de platôs. a) Material contendo carbetto de silício com partículas finas b) material contendo carbetto de silício com partículas grossas. ....	52
Figura 38 Superfície da pastilha após ensaio de desgaste. Imagens por MEV com elétrons secundários (direita) e imagens por MEV espectro (esquerda). a) Pastilha com SiC A, b) Pastilha com SiC C.....	53
Figura 39 Imagens em lupa com magnificação de 8x em lupa dos discos após ensaio de desgaste, sendo a) material A e b) material C.....	54
Figura 40 Variação do desgaste de pastilha total em função do diâmetro médio das partículas. ....	55
Figura 41 Variação do desgaste da pastilha em função da temperatura por etapa do ensaio...	57
Figura 42. Atrito médio das etapas do ensaio Ak-Master dos materiais de atrito contendo cada um dos SiC A, SiC B e SiC C. ....	58
Figura 43. Variação do atrito com a influência da velocidade em diferentes pressões a) 10 bar, b) 40 bar e c) 80 bar.....	60
Figura 44 Pressão necessária para frenagem na etapa de <i>fade</i> com desaceleração constante. .	61

Figura 45 Distribuição de atrito nas etapas de caracterização do ensaio de performance.....	62
Figura 46 Variação da quantidade de frenagens com ruído em função da intensidade do ruído. .....	64
Figura 47 Distribuição da quantidade total de frenagens do ensaio em função dos coeficientes de atrito. ....	65
Figura 48 Distribuição da quantidade de frenagens com ruído e dos coeficientes de atrito médios em função da pressão aplicada. ....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Grupos de materiais utilizados em pastilhas de freio. ....	17
Tabela 2 Tipos de estruturas cristalinas do carbetos de silício. ....	24
Tabela 3 Resultados de distribuição de tamanho de partículas dos carbetos. ....	28
Tabela 4 Composição genérica da pastilha de freio .....	30
Tabela 5 Etapas do ensaio de AK-Master para medição da performance da pastilha de freio.	37
Tabela 6 Resumo das etapas do ensaio de SAE J2521 para medição do ruído do sistema de freio.....	38
Tabela 7. Média da pressão aplicada por etapa de ensaio. ....	56
Tabela 8. Atrito médio das etapas de caracterização do ensaio de performance.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*SiC: Carbetos de silício*

*SiC A: Carbetos de silício de diâmetro médio 3  $\mu\text{m}$*

*SiC B: Carbetos de silício de diâmetro médio 15  $\mu\text{m}$*

*SiC C: Carbetos de silício de diâmetro médio 130  $\mu\text{m}$*

*UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

*PPGE3M: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais.*

*UCS: Universidade e Caxias do Sul*

*MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura*

*PP: polipropileno*

*PMMA: polimetilmetacrilato*

*$H_a$  = dureza relativa da partícula abrasiva*

*$H_s$  = dureza relativa da superfície*

*$R_{ma}$  = dureza relativa de um mineral*

*$M_i$  = dureza Mohs do constituinte em um mineral*

*$R_i$  = percentual em massa do constituinte em um mineral*

*A = área projetada*

*P = perímetro projetado*

*F = fator de forma*

*$D_x$  = tamanho de partícula abaixo do qual X da amostra em pó se encontra*

*$D_{\text{médio}}$  = tamanho médio de partícula em uma amostra em pó*

*V = volume desgastado no ensaio de abrasividade*

*r = raio do anel no ensaio de abrasividade*

*$\theta$  = ângulo do setor circular no ensaio de abrasividade*

*x = altura do triângulo incluído no setor no ensaio de abrasividade*

*c = comprimento da cratera no ensaio de abrasividade*

$R_a$  = rugosidade média

$L$  = comprimento

$y(x)$  = altura absoluta em relação ao ponto de referência no ponto  $x$

$\mu$  = coeficiente de atrito (adimensional);

$T$  = torque medido

$P$  = pressão aplicada

$P_{lim}$  = pressão mínima requerida para desenvolver o torque de frenagem

$A_p$  = área do pistão

$r_{eff}$  = raio efetivo do disco de freio

$\eta$  = eficiência de frenagem

$S$  = severidade de contato

$S^*$  = severidade de contato crítica

$W$  = carga aplicada

$A$  = área de interação

$v$  = fração volumétrica da solução abrasiva

$H^l$  = dureza efetiva

$H_b$  = dureza da esfera

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
2.1.	Objetivo Geral .....	5
2.2.	Objetivos Específicos .....	5
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
3.1.	Materiais Compósitos.....	6
3.2.	Materiais Compósitos Poliméricos.....	6
3.3.	Freios .....	7
3.4.	Tribologia .....	10
3.4.1.	<i>Níveis de Ensaios Tribológicos</i> .....	<i>11</i>
3.4.2.	<i>Mecanismos de Desgaste</i> .....	<i>12</i>
3.5.	Matérias-Primas.....	15
3.6.	Propriedades das Partículas .....	19
3.6.1.	<i>Dureza</i> .....	<i>19</i>
3.6.2.	<i>Morfologia</i> .....	<i>19</i>
3.6.3.	<i>Distribuição de Tamanho de Partículas</i> .....	<i>21</i>
3.6.4.	<i>Pureza</i> .....	<i>22</i>
3.7.	Carbeto de Silício .....	23
<b>4</b>	<b>Materiais e Métodos .....</b>	<b>25</b>
4.1.	Materiais .....	25
4.1.1.	<i>Carbeto de Silício</i> .....	<i>25</i>
4.1.1.1.	Composição Química .....	25
4.1.1.2.	Fases Cristalinas .....	26

4.1.1.3.	Distribuição de Tamanho de Partícula .....	27
4.1.1.4.	Análise Morfológica.....	28
4.1.2.	<i>Pastilha de Freio</i> .....	30
4.1.2.1.	Formulação .....	30
4.1.2.2.	Processo de Produção .....	31
4.2.	Métodos de Caracterização.....	31
4.2.1.	<i>Abrasividade</i> .....	31
4.2.2.	<i>Resistência Mecânica</i> .....	33
4.2.2.1.	Densidade Relativa.....	33
4.2.2.2.	Dureza .....	33
4.2.2.3.	Compressibilidade .....	34
4.2.2.4.	Cisalhamento .....	34
4.2.3.	<i>Durabilidade</i> .....	35
4.2.3.1.	Rugosidade .....	36
4.2.4.	<i>Performance</i> .....	36
4.2.5.	<i>Ruído</i> .....	38
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>40</b>
5.1.	Abrasividade.....	40
5.2.	Resistência Mecânica .....	44
5.2.1.	<i>Densidade Relativa</i> .....	44
5.2.2.	<i>Dureza</i> .....	45
5.2.3.	<i>Cisalhamento</i> .....	46
5.2.4.	<i>Compressibilidade</i> .....	46
5.3.	Durabilidade do Disco e Pastilha de freio .....	47
5.3.1.	<i>Desgaste de Disco</i> .....	47

5.3.1.1.	Rugosidade .....	50
5.3.2.	<i>Mecanismo de Desgaste</i> .....	50
5.3.3.	<i>Desgaste das Pastilhas</i> .....	55
5.4.	Performance.....	57
5.4.1.	<i>Atrito</i> .....	57
5.4.2.	<i>Estabilidade de Atrito</i> .....	61
5.5.	Ruído .....	63
<b>6</b>	<b>Conclusão</b> .....	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Sugestão para Trabalhos Futuros</b> .....	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>70</b>
8.1.	MEV carbetos de silício .....	70
<b>9</b>	<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A atual conjuntura de desenvolvimento de materiais compósitos é muito favorável à sua utilização em diferentes ramos da indústria, em virtude do conjunto de suas propriedades. O uso desse tipo de material possui forte tendência de aumento, visto que cada vez mais engenheiros vão entender o seu potencial de aplicação. Pode-se citar como fatores para isso, a grande capacidade de adaptação às características desejadas em projeto, baixo custo de processamento e normalmente um baixo impacto ambiental.

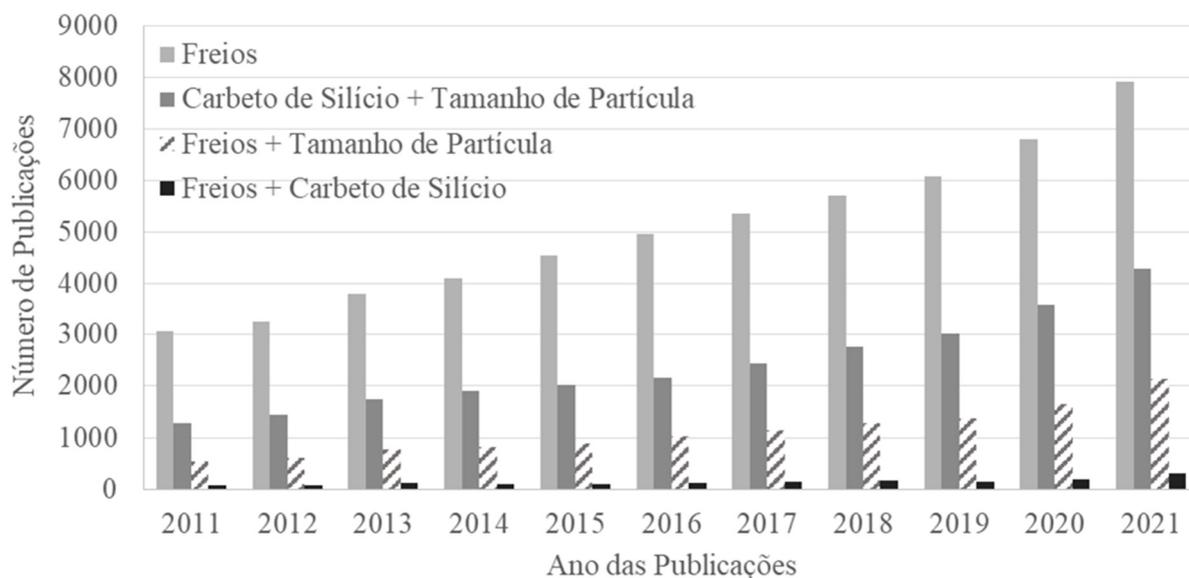
Os materiais de atrito utilizados na indústria automobilística são intrinsecamente materiais compósitos, pois em sua microestrutura encontram-se diferentes matérias-primas combinadas entre si. Sendo assim um material compósito, abrem-se inúmeras opções de inovação e melhoria contínua na produção de materiais de atrito. Historicamente, indústrias de materiais de atrito trabalham de forma individual, cada uma com seu respectivo conhecimento acumulado em seus centros de pesquisas industriais.

Quando se trata de requisitos de sistema de freio, é essencial pensar em um equilíbrio entre performance, desgaste, ruído e custo, sempre que um desses parâmetro aumentar ou diminuir inevitavelmente os demais irão sofrer alterações de comportamento. As pastilhas de freio são categorizadas em um veículo como itens consumíveis, isso porque elas desgastam com o uso e precisam ser trocadas. Visto isso, um importante parâmetro para o cliente é a vida útil do seu jogo de pastilhas, para minimizar custos ao longo do tempo.

Um dos fatores de avaliação na indústria automobilística que a cada dia ganha maior notoriedade é o conforto acústico, seja pelo acoplamento das peças, seja pelo isolamento acústico ou pelo ruído proveniente da frenagem do veículo. Com isso, cresce o número de pesquisas com enfoque em identificar as causas provenientes de cada um dos componentes do sistema de freio para a geração de ruído. Ao analisar as variáveis oriundas das pastilhas de freio, entende-se que as variações de abrasivos acarretam modificações de comportamento significativas, seja pela sua dureza, tamanho partícula, concentração e compressibilidade. Todavia, existem poucos trabalhos que relacionam os componentes da pastilha o com o ruído.

Devido ao aumento da demanda por agilidade da indústria automobilística, as empresas estão buscando entender os fenômenos que englobam os seus materiais junto a instituições acadêmicas e fóruns relacionados à área. Essa mudança cultural do segmento é evidenciada pelo aumento significativo de artigos científicos publicados anualmente (Figura 1). Segundo

busca em base de artigos (SCIENCE DIRECT, 2022), observa-se um aumento de cerca de 159% na publicação anual de artigos de freios em 10 anos.



**Figura 1** Número de publicações por ano na Science Direct desde 2011 sobre os quatro assuntos: Freios, Carbetos de Silício + Tamanho de Partícula, Freios + Tamanho de Partícula e Freios + Carbetos de Silício (SCIENCE DIRECT, 2022).

O desenvolvimento de materiais compósitos exige uma abordagem interativa e sistemática para alcançar o ponto de equilíbrio entre os requisitos desejados, desde diversos testes de aplicação do produto, passando pelas suas propriedades mecânicas e chegando até o nível caracterização dos seus constituintes.

Os materiais de atrito possuem constituintes que na sua grande maioria apresentam-se na forma de fibras e pós. Tratando-se dos constituintes em forma de pós, a propriedade que engloba a todos é o tamanho de partícula. Em função disso, observa-se também um aumento nas publicações relacionadas a freios e o termo tamanho de partícula. Comparando pela Figura 1 a quantidade de artigos publicados sobre esse tema em 2011 a 2021, observa-se um aumento de 299%, sendo que somente entre 2020 e 2021 constatou-se um acréscimo de 30%.

O material escolhido para investigação nesse trabalho foi o carbetos de silício, matéria-prima com variadas aplicações em diversos segmentos industriais. Seu emprego como constituinte em materiais compósitos é bastante frequente, sendo que em tal situação – corriqueira em materiais empregados em materiais de atrito – é de fundamental importância conhecer a influência de suas características físicas nas propriedades finais do compósito. De fato, a Figura 1 permite constatar-se um aumento no número de artigos publicados anualmente

sobre essas propriedades do carvão de silício e, em particular, o número de artigos que relacionam o abrasivo carvão de silício e o termo materiais de atrito.

A investigação em materiais de atrito busca correlacionar ensaios simples de caracterização de matérias-primas com os ensaios de maior complexidade, visando encontrar padrões de comportamento. Com isso, é possível realizar uma triagem das melhores opções de materiais, com testes simples e baratos. Para tanto, a primeira abordagem é a análise das propriedades fundamentais das matérias-primas constituintes. Após, analisa-se propriedades que são funções das matérias-primas, como a abrasividade de determinado material, que é dependente das suas propriedades fundamentais.

Posteriormente, fabrica-se o produto e determina-se as propriedades mecânicas do mesmo, com o objetivo de verificar a resistência e também prever alguns comportamentos que irão influenciar no desempenho do material de atrito. Finalmente, com o material passando em todas essas fases escolhe-se as melhores versões para analisar o desempenho das pastilhas de freio com ensaios de atrito, desgaste e ruído.

Atrito e desgaste são duas principais respostas do comportamento do sistema de freio. É importante salientar que tais características não são propriedades do material de atrito e sim da sua interação com o sistema de freio (BHUSHAN, 2013). Atrito ou força de atrito é a resistência ao movimento gerada ao empurrarmos ou tentarmos empurrar um corpo sobre uma superfície, isso porque existe interação dos átomos da superfície com os átomos do corpo além de um bloqueio mecânico nas reentrâncias e saliências (HALLIDAY; WALKER; RESNICK, 2012). Enquanto o desgaste é um tipo de dano da superfície por remoção de material de uma ou das duas superfícies em movimento de deslizamento, rolamento ou impacto (BHUSHAN, 2013).

Este trabalho foi realizado em uma indústria de materiais de fricção que produz lonas e pastilhas automotivas. Buscou-se entender a influência do tamanho de partícula do carvão de silício em diferentes características do produto e a influência dessa propriedade nos fenômenos envolvidos no contato tribológico. Foram investigadas as características químicas de 3 carbões de silício, utilizando de técnicas como fluorescência de raios X e difração de raios X, bem como características físicas, como de tamanho de partículas e morfologia, através de microscopia eletrônica de varredura. Procurou-se entender o efeito dessas características no comportamento sob fricção, com o objetivo de prever desempenho em serviço.

É nesse contexto que se insere este trabalho, com foco no auxílio da construção de especificações de matérias-primas mais robustas e que relacionam as suas propriedades

individuais com o efeito de atrito e desgaste no produto final. Sendo assim, o problema pode ser tratado de forma preditiva, diretamente na matéria-prima, e não corretiva, após a fabricação do produto.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho foi investigar a influência do tamanho de partículas dos carbetos de silício como constituinte de material de fricção em pastilhas automotivas, para isso foi avaliada a performance, durabilidade e geração de ruído das pastilhas contendo os diferentes carbetos de silício.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Determinar as propriedades físicas e químicas de diferentes carbetos de silício, tais como: composição química, cristalinidade, morfologia, abrasividade e distribuição de tamanho de partícula.
- b) Estabelecer as resistências mecânicas e o desempenho das pastilhas automotivas através de testes de durabilidade, performance e geração de ruído, realizados em dinamômetro inercial.
- c) Correlacionar as propriedades investigadas dos carbetos de silício com o desempenho do produto final.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS

Um compósito é um material fabricado com dois ou mais componentes que possuem propriedades físicas e químicas distintas entre si. Sendo assim, a propriedade final do material está relacionada diretamente com a soma das características dos constituintes do produto, combinando ganhos em menor densidade e maior resistência mecânica, por exemplo.

O uso de materiais compósitos inicia na Segunda Guerra Mundial pelo exército norte-americano, tratando-se de um plástico reforçado com fibra de vidro. É possível também encontrar registros de que os britânicos utilizavam compósitos para a substituição do alumínio em aviões. No Brasil, iniciou somente a partir dos anos 1950 em São Paulo, com a abertura da primeira fábrica de resina poliéster. Nessa mesma década, as montadoras automobilísticas americanas introduziram materiais compósitos em suas linhas de produção. Desde então, muita coisa mudou. A utilização de compósitos atingiu segmentos nunca esperados, com a liderança de utilização tomada pela indústria de construção civil e a automotiva (ABMACO, 2008). A constante inovação, por exemplo, dos compósitos poliméricos possibilita a produção de peças que antes só poderiam ser constituídas por metais (MARINUCCI, 2011).

Os materiais compósitos de matriz polimérica podem ser classificados de 3 formas quanto à morfologia da fase dispersa: particulados, fibrados e laminados, conforme Figura 2. Os materiais de atrito se categorizam como compósitos fibrados com fibras descontínuas, além de outros materiais particulados. Esse tipo possui a desvantagem de possuir uma resistência mecânica inferior ao compósito com fibras contínuas, todavia se beneficia de possuir resistência semelhante em todas as direções, chamado de quase-isotrópico (MARINUCCI, 2011).

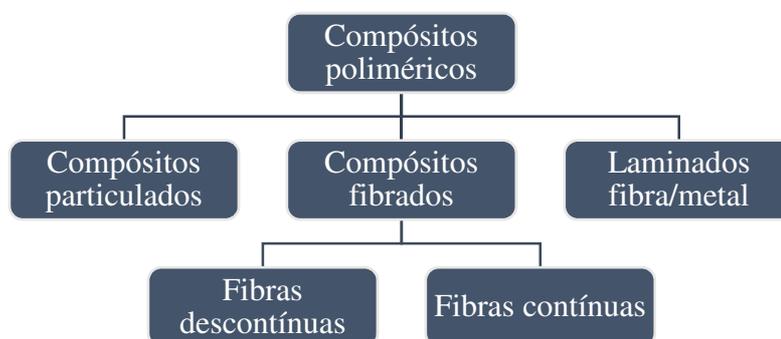


Figura 2 Classificação dos materiais compósitos poliméricos.

#### 3.2. MATERIAIS COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os materiais compósitos de matriz polimérica geralmente utilizam resinas poliméricas para a sua fabricação. Os polímeros se dividem em termoplásticos e termofixos, onde o termoplástico pode ser amolecido com temperatura e ou pressão. Já o termofixo não possui essa característica o que faz com que não seja possível realizar deformações após a sua produção. Entre as resinas termofixas, existem 4 tipos principais (ABMACO, 2008):

- Resina Poliéster Insaturado
- Resina Epóxi
- Resina Fenólica
- Poliuretano

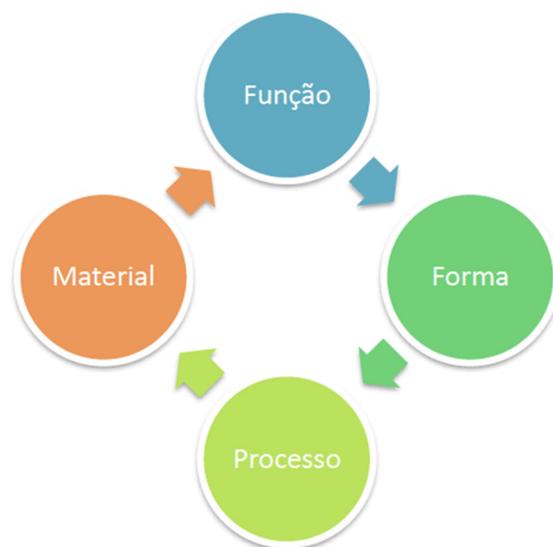
A resina fenólica é amplamente utilizada na fabricação de materiais de atrito para freios automotivos, graças às características termofixas de estabilidade em temperatura e pressão.

Resinas fenólicas são produzidas através da condensação e polimerização de um fenol com um formaldeído. Elas são comumente chamadas de baquelite devido ao fato de que foi desenvolvida por Beakeland. A resina fenólica é comercializada na forma líquida e sólida e possui uma densidade entre 1 e 1,25 g/cm<sup>3</sup> (ABMACO, 2008). Geralmente utilizada na versão sólida para a fabricação de pastilhas e lonas de freio, a baquelite já é adquirida com alguns aditivos como o hexametiltetramina como agente acelerador de cura.

Hoje em dia, a perda no processo produtivo se torna um passivo ambiental considerável, visto que em sua totalidade é destinada a aterros sanitários (ABMACO, 2008). Com o objetivo de diminuir o impacto no meio ambiente, as empresas de materiais de atrito utilizam o seu resíduo de produção como carga para a produção de novas peças.

### 3.3. FREIOS

O centro de um processo de seleção de materiais está na interação entre a função, o material, a forma e o processo de fabricação. Conforme mostrado na Figura 3, a função delimita a escolha do material e da forma, enquanto o processo é influenciado pela escolha do material e irá definir a forma do produto (ASHBY, 2011).



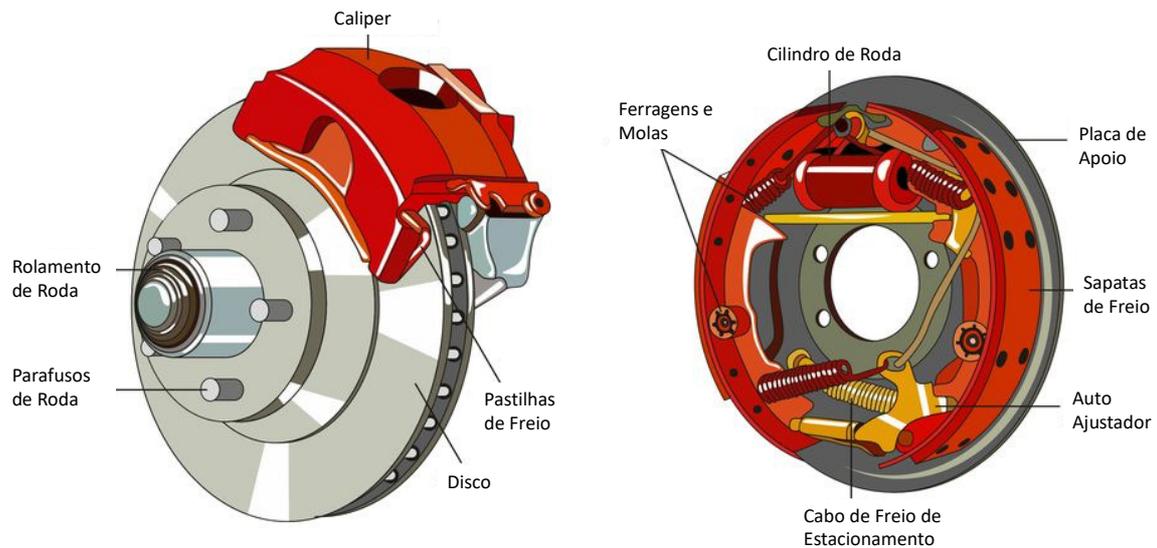
**Figura 3 Interação entre variáveis de desenvolvimento de produto.**

Este conceito de seleção de materiais pode ser facilmente adaptado no processo de desenvolvimento de um material de atrito. Porém, é necessário levar em conta que este material faz parte de um sistema de freio com outros componentes e variáveis.

A frenagem é geralmente obtida pelo atrito entre superfícies; tal fenômeno é uma conversão da energia cinética e potencial em calor, em vibração, em deformação no regime elástico, além de energias envolvidas no desgaste dos materiais envolvidos (LOMBARDI JR.; URBANO ÁVILA; DEZIDERIO PRIETO, 2018). Atualmente, existem dois tipos de sistemas de freios mais utilizados mundialmente: freio a disco e o freio a tambor (vide Figura 4).

a) freio a tambor: foram os primeiros sistemas de freio utilizados e fazem uso de sapatas com lonas de freio que são empurradas contra o tambor de freio. Atualmente estão sendo substituídos por freio a disco, devido à sua menor eficiência. Além disso, freios a disco são mais seguros, possuem auto ajuste e são menos suscetíveis a superaquecimento e outros problemas mecânicos (LAMB, 2008) (Figura 5 a).

b) freio a disco: a partir das décadas de 1950 e 1960, deu-se a utilização desse tipo de sistema de freio em maior intensidade (MALUF, O.; ANGELONI, M.; SANTOS, J. C.; COLÓCIO, M. A.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, 2005). Fazem uso de duas pastilhas que são pressionadas contra um disco de freio (BREZOLIN, 2007). Veja Figura 5 b).



a) b)  
**Figura 4 Sistema de freio a) disco e b) tambor. Fonte: MOTORIST ASSURANCE PROGRAM, 2015**

No freio a disco, a força de frenagem será composta pela força de compressão na pastilha, pelo coeficiente de atrito (razão da força de fricção pela força normal) entre as superfícies e pelo raio efetivo de frenagem (LOMBARDI JR.; URBANO ÁVILA; DEZIDERIO PRIETO, 2018).

Divide-se em 5, os principais requisitos de um material de atrito (BLAU, 2008). São eles:

- atuar com um coeficiente de atrito uniforme e moderadamente alto;
- minimizar interações de fricção que geram ruídos;
- resistir ao desgaste para aumentar vida-útil;
- possuir boa difusividade térmica, para que a interface não atinja a temperatura crítica e faça com que o sistema perca pontos em performance;
- resistir a cargas mecânicas e térmicas impostas durante as frenagens.

Os requisitos são vários, assim como as variáveis que influenciam no contato tribológico, como acabamento de superfície, pressões de contato, velocidade de deslizamento, tipo de movimento, temperatura, formação de filmes e condições ambientais. Uma das principais fontes é a temperatura, isso porque a energia cinética de frenagem é convertida em energia térmica e essa é liberada para o ambiente (BLAU, 2008). A temperatura gerada se torna um limitador no desempenho dos sistemas de frenagem, visto que existe uma diminuição do coeficiente de atrito e da resistência ao desgaste com o aumento da temperatura (LOMBARDI JR.; URBANO ÁVILA; DEZIDERIO PRIETO, 2018). Tal fenômeno de correlação é

conhecido como “*fade*”, e geralmente é um problema para o desenvolvimento de novos materiais de atrito posto que é solicitada uma estabilidade do coeficiente de atrito (SHIBATA *et al.*, 1993).

### 3.4. TRIBOLOGIA

O termo Tribologia, onde *tribo* tem o significado de atrito e *logia* de estudo, é definido como a ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo e da energia envolvida. Para carros essa energia é dividida pelos seguintes mecanismos: 33% - gases de exaustão, 29% - resfriamento e 38% - potência mecânica para superar as perdas por atrito (33%) e arrasto (5%) (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012).

Na maioria das vezes, os mecanismos tribológicos básicos de contato, se combinados, se transformam em algo muito mais complexo. Isso acontece devido a fatores como a geometria de contato, rugosidade, elementos interfaciais (detritos de material) e superfície heterogênea, como mostra a Figura 5. Esse processo gera mudanças das suas propriedades devido a alterações de carga e condições de deslizamento (HOLMBERG *et al.*, 2007). Portanto, o atrito, o desgaste e as vibrações são conseqüências de uma interação tribológica entre duas superfícies (BHUSHAN, 2013).

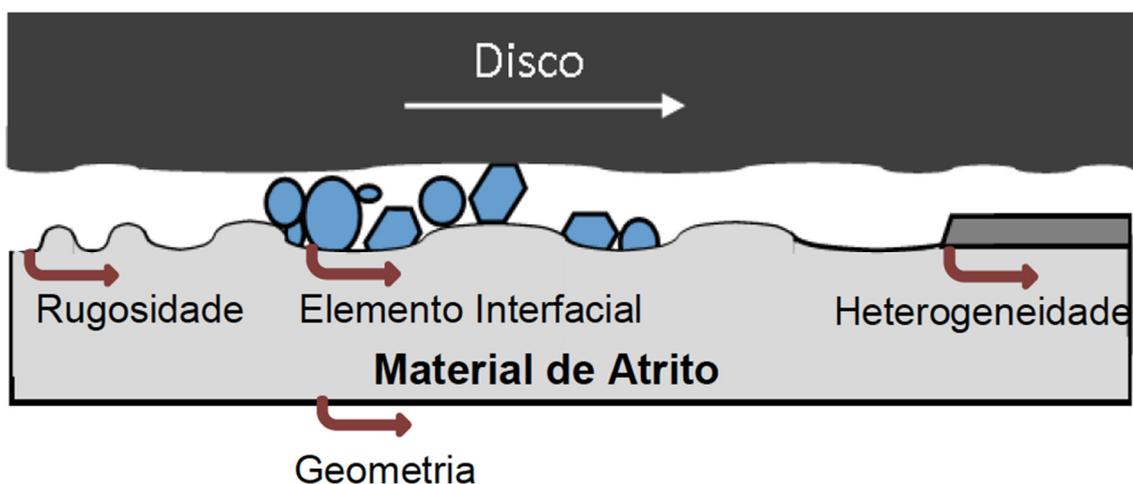
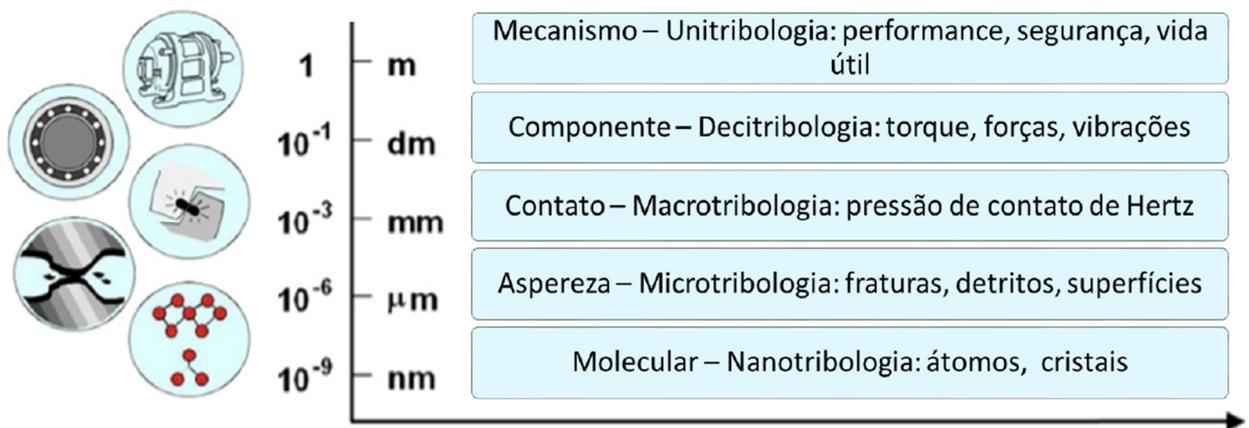


Figura 5 Tribossistema para contato material de atrito e disco. Fonte: adaptado de (HOLMBERG *et al.*, 2007).

Além disso, a Tribologia pode ser investigada em diversos níveis, em alguns casos é possível observar fenômenos em escala nanométrica devido a interações moleculares ou

atômicas; em outros, se faz necessário um estudo em nível micrométrico, supondo o surgimento de trincas e presença de rugosidades (HOLMBERG *et al.*, 2007). Isto resulta em um total de 5 níveis de estudo de processos tribológicos, mostrados na Figura 6. Todos os níveis irão influenciar de alguma forma o resultado final do produto. Por isso, é importante a análise crítica dos fenômenos envolvidos, onde fatores micrométricos influenciam significativamente o resultado de desempenho de um material, por exemplo.

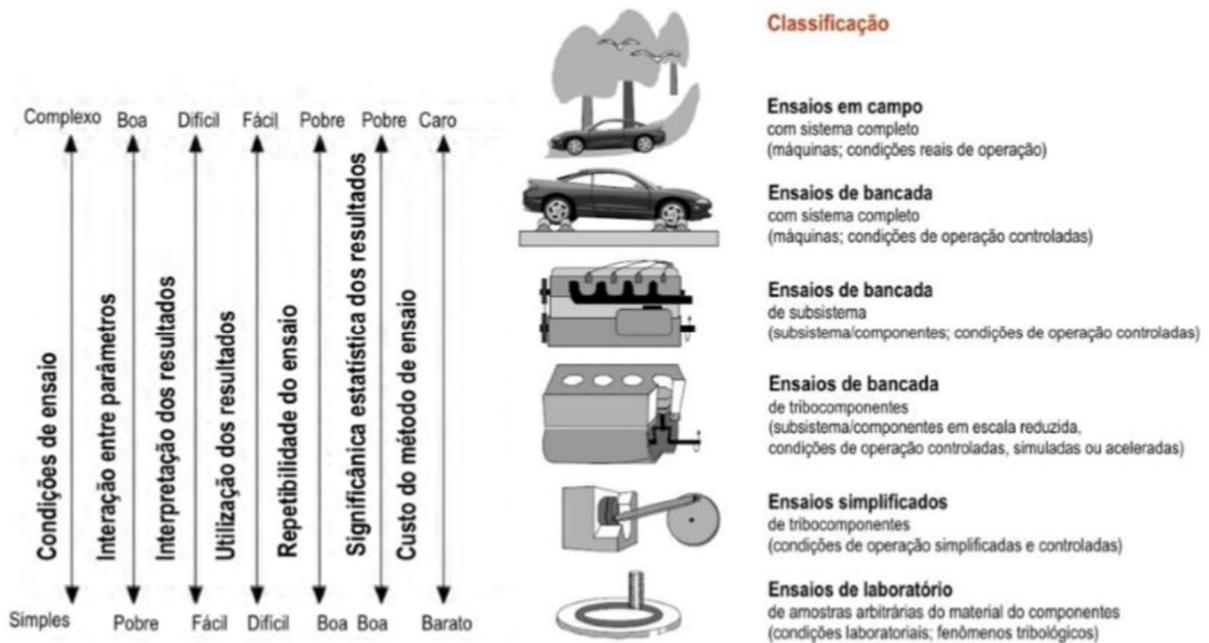


**Figura 6** Níveis de estudo da tribologia de sistemas de freio. Fonte: adaptado de (HOLMBERG; ANDERSSON; ERDEMIR, 2012); (HOLMBERG *et al.*, 2007).

### 3.4.1. NÍVEIS DE ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

Segundo (BHUSHAN, 2001), existem 6 categorias para ensaios de materiais, onde, quanto maior a aproximação da situação real, maior o custo e a complexidade do ensaio enquanto a repetitividade e a significância estatística dos dados diminuem (Figura 7). Além disso, a interação entre os fatores é mais simples nas primeiras classificações, facilitando a interpretação (HOLMBERG; MATHEWS, 1994).

Na indústria de material de atrito, muitas vezes hipóteses são testadas diretamente nos níveis superiores. Isso facilita pela correlação dos resultados com a realidade, porém faz com que ciclos de desenvolvimento sejam mais longos e com custos elevados para os projetos em questão.



**Figura 7 Níveis de ensaios para estudo da tribologia do sistema de freio. Fonte: Adaptado de (BHUSHAN, 2001).**

### 3.4.2. MECANISMOS DE DESGASTE

Os mecanismos de desgaste possuem a finalidade de especificar o desgaste quanto à forma de geração e remoção dos seus resíduos. Contudo existem diversas classificações dos mecanismos de desgaste variando entre fontes, que se parecem e algumas sofrem sobreposição nas suas definições. A norma DIN 50320, 1979 classifica o desgaste em 4 tipos de mecanismos:

- adesivo: em condições de altas velocidades, temperatura e pressão, ocorre uma ligação química entre as superfícies, também podem ocorrer difusão, troca eletrônica, microbrasagem, adsorção, desenvolvimento de forças secundárias (e.g. van der Waals). Essas são fortes o suficiente para resistir ao deslizamento, gerando a transferência de material de uma superfície para a outra;
- abrasivo: em um contato deslizante, ocorre remoção do material de uma das superfícies devido à deformação plástica que pode ocorrer por diferença de dureza entre as mesmas ou pode ser gerada por fatores geométricos;
- fadiga: gerado por repetição de movimentos, com aumento e diminuição de carga o que pode ocasionar trincas e fragmentos na superfície;
- triboquímico: ocasionado em meios corrosivos e com altas temperaturas, devido ao atrito das asperezas, o que aumenta a reatividade química.

Neste trabalho, o mecanismo de desgaste com maior foco de estudo será o desgaste abrasivo, pois entende-se que este é o mecanismo onde os minerais particulados investigados mais influenciam, quando observado o sistema de freio automotivo. O desgaste abrasivo é classificado de acordo com três critérios, conforme Figura 8.

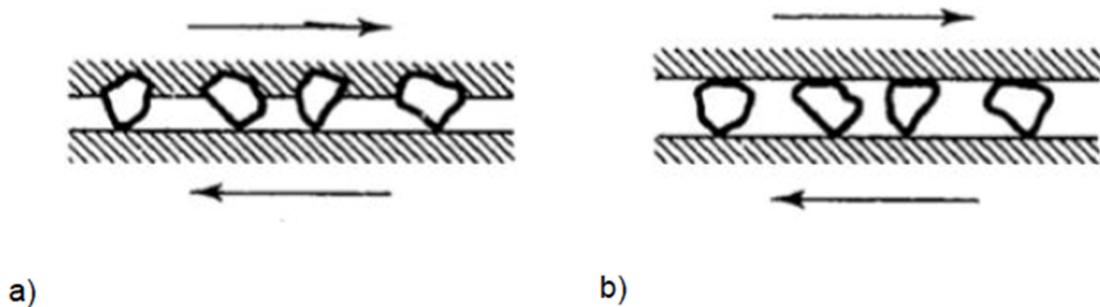


**Figura 8 Classificação do desgaste abrasivo. Fonte: adaptado de (COLOMBO; FARIAS; BERTI, 2011).**

Existem dois tipos de desgaste abrasivo classificados quanto ao movimento do abrasivo, partículas ou protuberâncias:

a) desgaste a dois corpos: é causado por protuberâncias duras agarradas à superfície, conforme Figura 9 a).

b) desgaste a três corpos: neste fenômeno partículas duras estão livres para rolar entre duas superfícies Figura 9 b).



**Figura 9 Classificação do desgaste abrasivo quanto ao movimento do abrasivo a) dois corpos e b) três corpos. Fonte: HUTCHINGS (1992)**

As taxas de desgaste serão alteradas quanto ao tipo de movimento do abrasivo conforme evidencia a Figura 10, sendo o mecanismo de três corpos com taxas que são menores quando comparadas ao desgaste a dois corpos (HUTCHINGS, 1992). No desgaste a dois corpos, o material abrasivo está aderido à superfície, arrancando o material da superfície oposta. Já no desgaste a três corpos devido ao movimento, a partícula tende a rolar entre as superfícies, e porventura é eliminada como resíduo.

Tipo de Desgaste	Mecanismo de Desgaste	Coefficiente de Desgaste (k)
Abrasivo		<p>10<sup>-7</sup> 10<sup>-6</sup> 10<sup>-5</sup> 10<sup>-4</sup> 10<sup>-3</sup> 10<sup>-2</sup> 10<sup>-1</sup> 10</p> <p>3 Corpos</p> <p>2 Corpos</p>

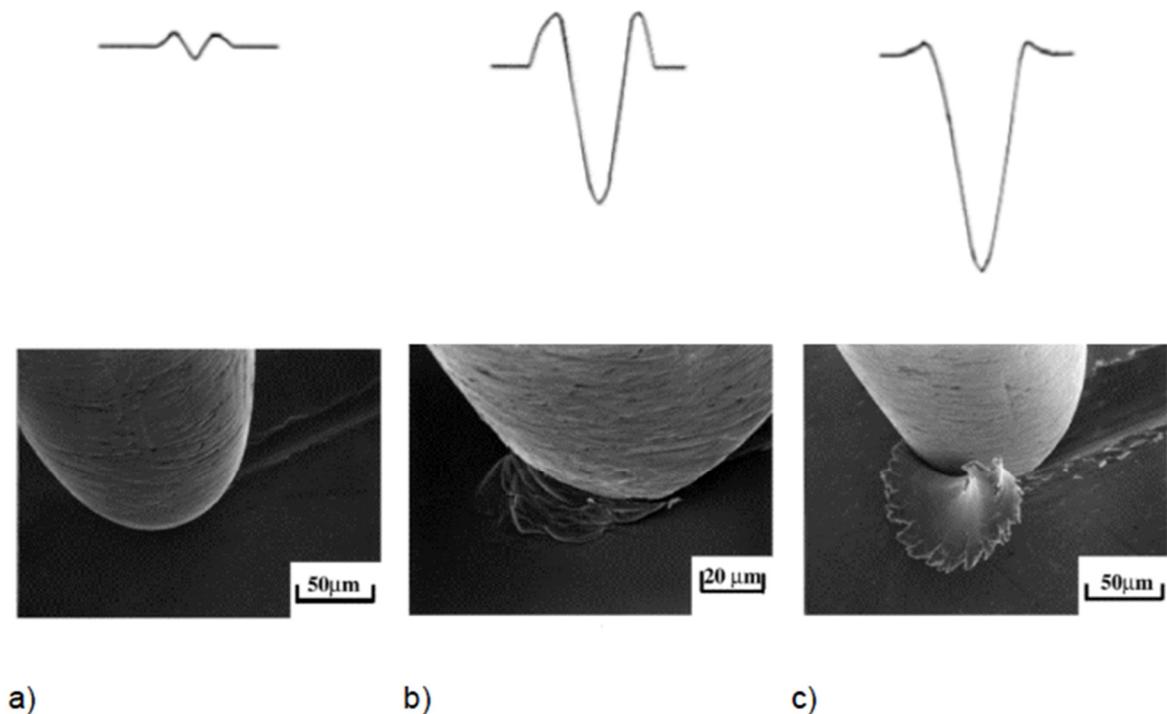
**Figura 10 Escala de coeficiente de desgaste em função do mecanismo de desgaste. Fonte: adaptado de (HUTCHINGS, 1992).**

Encontra-se uma certa imprecisão na definição de desgaste abrasivo ou microabrasivo, isso porque a literatura não define cada um dos termos separadamente: o desgaste microabrasivo estaria contido no desgaste abrasivo, o que variaria seria apenas a faixa de desgaste abrasivo (COZZA, 2011):

a) desgaste abrasivo: o coeficiente de desgaste varia entre  $2,5 \times 10^{-4}$  a  $1,2 \times 10^{-1}$   $\text{mm}^3/\text{N.m}$ . São utilizados ensaios chamados “roda de borracha” e “pino-sobre-disco” para estudar este tipo de desgaste (COZZA, 2011; HUTCHINGS, 1992);

b) desgaste microabrasivo: o coeficiente de desgaste varia entre  $1 \times 10^{-6}$  a  $2,5 \times 10^{-4}$   $\text{mm}^3/\text{N.m}$  e é analisado por meio do ensaio chamado “esfera rotativa” (COZZA, 2011; TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

Segundo (HOKKIRIGAWA; KATO, 1988), existem cinco tipos de mecanismos de desgaste microabrasivo. O primeiro, chamado de microsulcamento, possui desgaste moderado e deslocamento de material para as bordas laterais; o terceiro, chamado de microcorte, exibe desgaste severo e o material é removido em forma de lascas, enquanto o segundo, chamado de formação de bordas ou proa, possui características intermediárias ao microsulcamento e ao microcorte Figura 11.



**Figura 11. Classificação do desgaste abrasivo quanto aos mecanismos de desgaste a) microsulcamento, b) formação de proa e c) microcorte. Fonte: (HOKKIRIGAWA; KATO, 1988).**

### 3.5. MATÉRIAS-PRIMAS

É importante ressaltar que em muitos casos as formulações de material de atrito são desenvolvidas de individualmente por cada fabricante. Por se tratar de segredo industrial,

existem raras publicações e com isso pouco conhecimento é compartilhado nesse ramo, sendo que cada fabricante é responsável pelo seu próprio aprendizado e, conseqüentemente, pelas suas próprias formulações.

O material de atrito tem em média 15 componentes em sua formulação, porém é possível reuni-los quanto às suas funções. Isso vai de encontro ao que foi descrito no item 3.1 Materiais Compósitos, onde cada um dos componentes tem as suas propriedades individuais que quando somadas auxiliam na produção de um material que agrega as características de todos. São 4 funções primárias básicas: aglomerante, reforço, carga e modificador de atrito. Além das suas funções principais, existem outros requisitos secundários que são impostos a essas matérias-primas como a facilidade de processabilidade sem segregação e capacidade de pré-formar (NICHOLSON, 1995).

Com a função de **aglomerante**, as principais matérias-primas são as resinas, conforme referido anteriormente no item 3.2. Com isso, as suas próprias propriedades (térmicas e mecânicas) influenciam diretamente as características finais do produto como: geração de ruído, resistência ao desgaste e resistência mecânica (SHIBATA *et al.*, 1993).

Para as fibras, é atribuída a função de **reforço**, ou seja, prover resistência mecânica e à temperatura. No passado, a fibra mais utilizada em materiais de atrito era o amianto, que, com a sua proibição, foram substituídas por outras fibras, e a evolução para o conceito que utiliza uma base semimetálica. Fibras como aramida, celulose, cerâmicas, aço, cobre e latão são amplamente utilizadas atualmente (ERIKSSON; BERGMAN; JACOBSON, 2002; SHIBATA *et al.*, 1993).

As **cargas** possuíam por muito tempo a única função de reduzir a quantidade de materiais mais nobres utilizados, por fins puramente econômicos. Atualmente, tira-se proveito dessa matéria-prima para agregar melhorias na processabilidade do produto e também nas suas propriedades mecânicas e químicas (ABMACO, 2008; ERIKSSON; BERGMAN; JACOBSON, 2002). O pó de caju é a carga orgânica mais utilizada, por muitas referências também é considerado uma resina (ERIKSSON; BERGMAN; JACOBSON, 2002), e auxilia para a redução de ruído proveniente da pastilha (NICHOLSON, 1995; SHIBATA *et al.*, 1993). Já as cargas inorgânicas são a barita, o carbonato de cálcio e o caulim. Além destes, pelo fato de que o material de atrito necessita ser alcalino para prevenir aderência com o disco, utiliza-se cal hidratada. Hoje em dia, a perda no processo produtivo se torna um passivo ambiental considerável visto que em sua totalidade é destinada a aterros sanitários (ABMACO, 2008).

Com o objetivo de diminuir o impacto no meio ambiente, as empresas de materiais de atrito utilizam o seu resíduo de produção como carga para a produção de novas peças.

O grupo dos **lubrificantes** assegura a estabilidade do coeficiente de atrito, principalmente em altas temperaturas. O lubrificante com utilização mais difundida é o grafite, natural ou sintético, em diferentes granulometrias e graus de pureza (ERIKSSON; BERGMAN; JACOBSON, 2002; SHIBATA *et al.*, 1993).

Os **abrasivos** que usualmente são pós cerâmicos, possuem a função de limpar a superfície de contato do disco dos depósitos de filmes, de modo que asseguram uma superfície mais bem definida, além de aumentar a durabilidade da pastilha. Para isso, possuem dureza superior ao (fundido, material que constitui o disco de freio, porém essa alta dureza gera desgaste e riscos na superfície, podendo até causar ruído indesejado. (ERIKSSON; BERGMAN; JACOBSON, 2002; SHIBATA *et al.*, 1993). Ademais, possuem a função de manter o nível de atrito alto, mesmo a altas temperaturas (MATĚJKA *et al.*, 2009). Usualmente, utiliza-se de 1 a 8 % em volume de abrasivos na formulação, de diferentes tipos, tamanhos e morfologias. Porém, para um mesmo tipo de abrasivo, o fator de maior influência é o tamanho das partículas. Tamanhos menores acarretam em baixa estabilidade de atrito e desgaste do material de fricção, em contrapartida tamanhos maiores aumentam a estabilidade do coeficiente de atrito e abrandam os efeitos do *fade*, porém geram desgaste do disco (BIJWE *et al.*, 2012).

A Tabela 1 apresenta um resumo das 4 funções principais e exemplos de matérias-primas utilizadas na fabricação de pastilhas de freios (NICHOLSON, 1995; SHIBATA *et al.*, 1993).

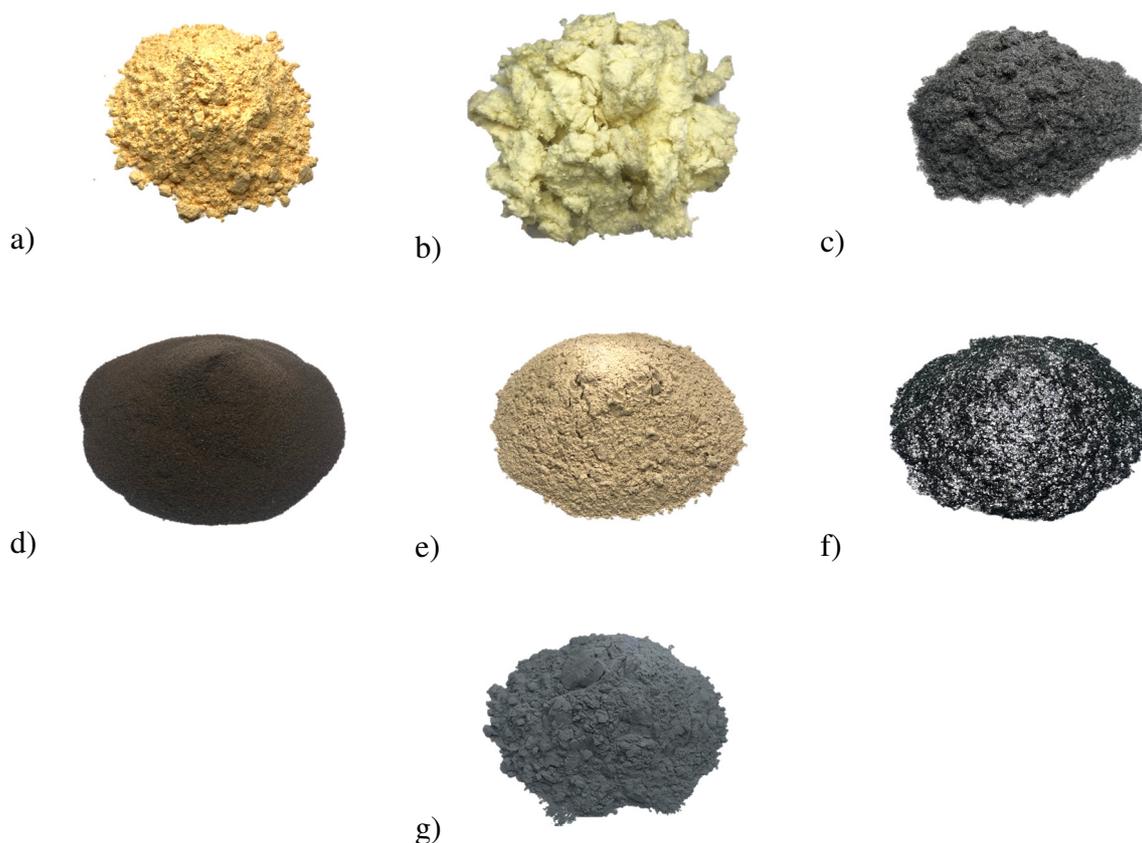
**Tabela 1 Grupos de materiais utilizados em pastilhas de freio.**

Função	Grupo	Descrição	Materiais
Aglomerante	-	Juntar todos os componentes	Resina, Borracha
Reforço	Fibras Não Metálicas	Aumentar resistência mecânica do material de atrito	Aramida, Celulose, Fibra de Vidro
	Fibras Metálicas	Aumentar resistência térmica do material de atrito	Fibra de Aço,
Carga	Orgânicas	Reduzir o desgaste em baixa temperatura.	Pó de caju, Borracha
	Inorgânicas	Reduzir desgaste em alta temperatura.	Barita, Carbonato de Cálcio, Caulim
	Lubrificantes	Prevenir micro aderência no Rotor	Grafite, Sulfetos

Modificador de Atrito	Abrasivos	Limpar superfície do rotor e aumentar o coeficiente de atrito.	Alumina, Carbetto de Silício
-----------------------	-----------	--	------------------------------

Fonte: (BLAU, 2008) (NICHOLSON, 1995).

A Figura 12 apresenta imagens fotográficas de matérias-primas que exemplificam cada uma das funções e grupos de componentes mostrados na Tabela 1, sendo a imagem a) uma foto da resina fenólica pura utilizada na maioria das pastilhas de freio automotivas com a função de aglomerante; b) é a imagem de uma fibra de aramida, não-metálica, empregada como reforço em materiais que exigem alta resistência mecânica; c) é uma fibra de reforço metálica denominada lã de aço, amplamente utilizada em materiais para pastilhas metálicas; d) pó de caju com a função de carga orgânica, muito utilizado para aumentar características de compressibilidade do produto; e) também é enquadrado como uma carga, porém inorgânica, denominada barita, amplamente utilizada em materiais de atrito; f) grafite, empregado como lubrificante e g) carbetto de silício, utilizado como atritante. O grafite e o carbetto de silício são, portanto, modificadores de atrito, o primeiro atuando para diminuir e o segundo, para aumentar.



**Figura 12. Imagens fotográficas de matérias-primas de acordo com sua função: a) Aglomerante: resina fenólica; b) Fibra não-metálica: aramida; c) Fibra metálica: lã de aço; d) Carga orgânica: pó de caju; e) Carga inorgânica: barita; f) Lubrificante sólido: grafite; g) Abrasivo: carbetto de silício. Fonte: o autor**

### 3.6. PROPRIEDADES DAS PARTÍCULAS

Segundo Oparin; Tanaino (2015), desde 1950 muitos estudos sobre abrasividade foram realizados, porém não existe evidência de que este assunto esteja perto de esgotado e que os problemas do ensaio de abrasividade foram resolvidos. Nenhum dos testes de abrasividade é considerado o “teste perfeito” e na maioria das vezes é impossível comparar os resultados, pois dizem respeito às características das amostras ensaiadas e não dos materiais com os quais são constituídas. Isto acaba gerando confusões quanto à definição de abrasividade de um mesmo mineral. Como exemplo, tem-se o quartzo que é definido como um mineral de abrasividade média (KUZNETSOV e BARON, 1961) e de alta abrasividade (LYUBIMOV, 1967). Por isso, este tópico irá abordar as propriedades básicas das partículas e a sua correlação com o desgaste.

Hutchings (1992) e Oparin; Tanaino (2015) concordam que algumas das propriedades básicas das partículas que influenciam o desgaste são: dureza, morfologia e tamanho do grão, além da composição química e mineralógica.

#### 3.6.1. DUREZA

A dureza relativa da partícula abrasiva ( $H_a$ ) em relação à superfície ( $H_s$ ) do material irá influenciar na taxa de desgaste. Quanto mais dura for a partícula em relação à dureza da superfície, maior será o desgaste, ou seja, quanto maior for a razão  $H_a/H_s$  maior será o desgaste.

Segundo Hutchings (1992), para uma partícula causar desgaste na superfície, a razão  $H_a/H_s$  deve ser maior que 1,2. Na escala de dureza Mohs, esta relação fica em torno de 1,6 entre um material e o subsequente na escala, exceto para o diamante. Sendo assim, o material com dureza Mohs superior sempre irá riscar o material com classificação Mohs menor.

O índice relativo de dureza de uma amostra mineral leva em conta a dureza Mohs de cada componente mineral e o percentual deste mineral na sua composição, segundo a Equação 1:

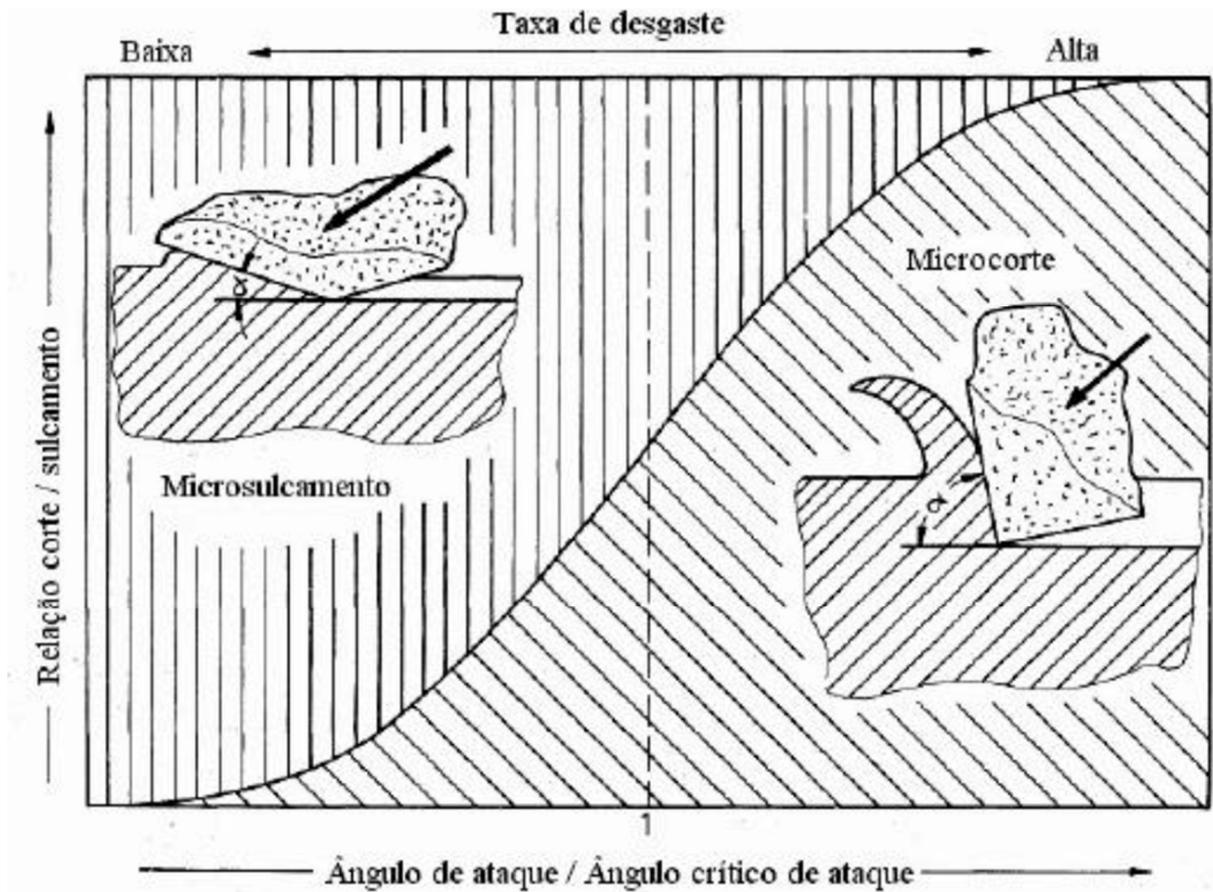
$$R_{ma} = 0,01 \sum_i M_i \cdot R_i \quad (1)$$

onde,  $M_i$  é a dureza Mohs e  $R_i$  é o percentual em massa de cada mineral constituinte da amostra (OPARIN; TANAJNO, 2015).

#### 3.6.2. MORFOLOGIA

Partículas angulares geram um desgaste maior do que partículas redondas e essa angulosidade influencia o tipo de mecanismo de desgaste microabrasivo (HUTCHINGS, 1992).

Sendo assim, para ocorrer o mecanismo de desgaste por microcorte (Figura 11 c), o ângulo de ataque da partícula abrasiva deve ser maior que o ângulo de ataque crítico, caso contrário ocorrerá um mecanismo de desgaste por microsulcamento, conforme evidencia a Figura 13 (SEDRIKS; MULHEARN, 1963).

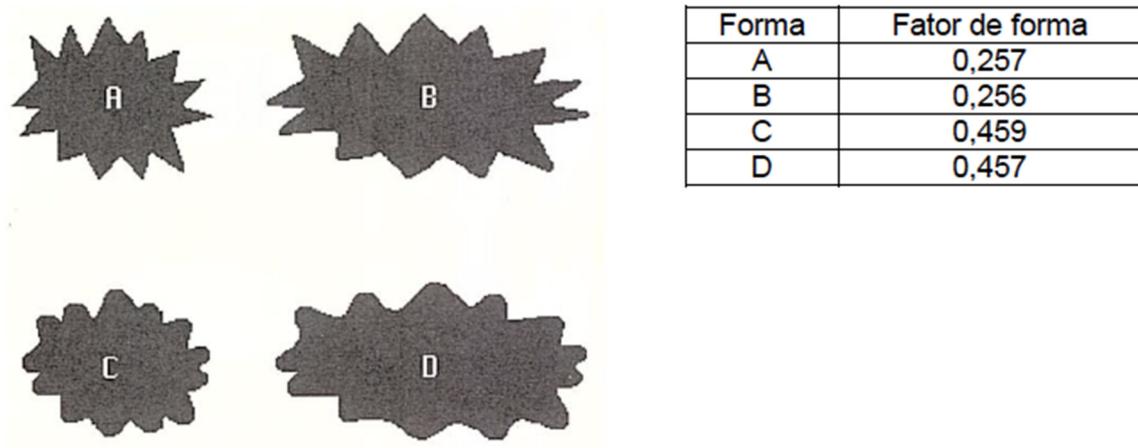


**Figura 13** Influência do ângulo de ataque na intensidade do desgaste e no tipo de mecanismo.  
**Fonte:** ZUM GAHR (1987)

Porém, é difícil definir e quantificar o formato das partículas. Um parâmetro simples e um tanto grosseiro para quantificar a morfologia das partículas é o fator de forma expresso pela Equação 2:

$$F = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2} \quad (2)$$

onde  $A$  é a área projetada e  $P$  é o perímetro projetado da partícula (RUSS; NEAL, 2017). Assim, se  $F=1$  a projeção da partícula é um círculo e quanto menor o valor de  $F$ , mais angular será a partícula (HUTCHINGS, 1992). Esse comportamento é exemplificado na Figura 14.



**Figura 14** Exemplo de influência do formato da partícula no fator de forma. Fonte: RUSS (1995)

### 3.6.3. DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULAS

O tamanho da partícula possui forte influência no desgaste. Partículas menores geram microsulcamento, formando microlascas descontínuas e deformáveis, e partículas maiores geram microcorte, originando microlascas contínuas e não-deformáveis (CORONADO; SINÁTORA, 2009).

Estudos alterando o tamanho da partícula mostram que, variando o tamanho de 10  $\mu\text{m}$  até 100  $\mu\text{m}$ , ocorre um aumento da taxa de desgaste da superfície, porém, aumentando o tamanho de 100  $\mu\text{m}$  até 250  $\mu\text{m}$ , as taxas mantêm-se praticamente constantes para os dois tipos de desgaste abrasivos, a dois e três corpos, conforme Figura 15 (HUTCHINGS, 1992). Sendo assim, para tamanhos pequenos, a taxa de desgaste cresce proporcional ao tamanho, porém, após atingir um ponto crítico, o comportamento muda, estabilizando a taxa de desgaste (COZZA, 2011; MISRA; FINNIE, 1981). Isso ocorre porque as partículas maiores rolam para fora da superfície de atrito ou quebram, gerando partículas menores.

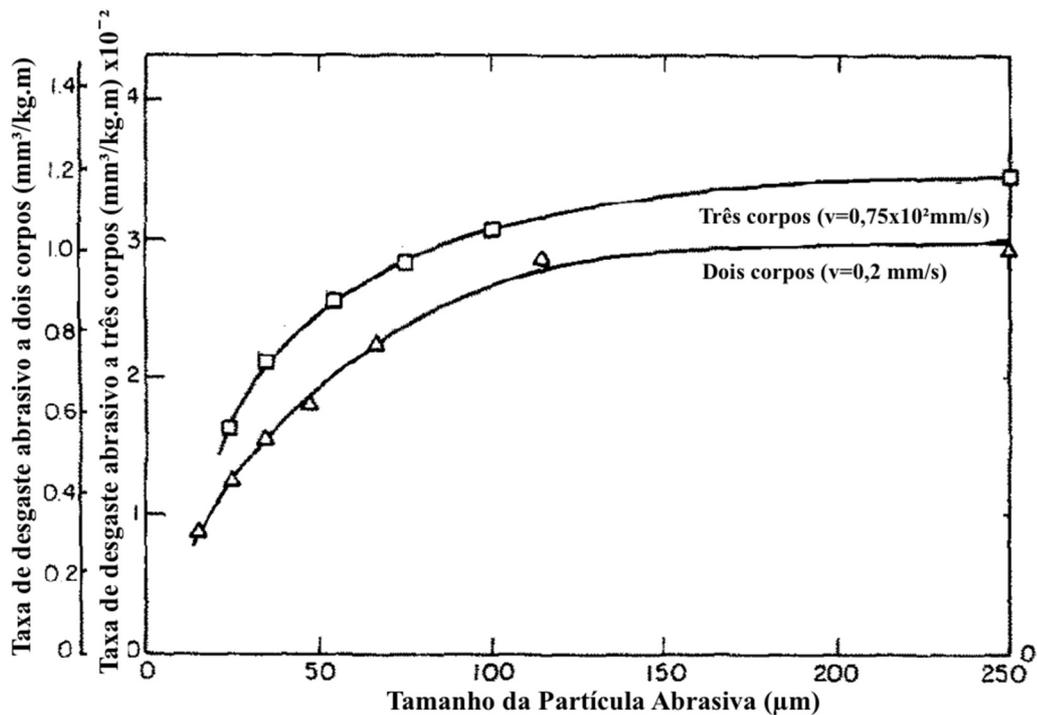


Figura 15 Taxa de desgaste em função do tamanho da partícula abrasiva. Fonte: Adaptado de MISRA e FINNIE (1981)

#### 3.6.4. PUREZA

As matérias-primas utilizadas no material de atrito raramente são puras, sem contaminantes. O mais importante é conhecer exatamente qual material foi utilizado para aprovar o produto final e ter certeza de que este material poderá ser replicado posteriormente. Sendo assim, muitas vezes, o material mais economicamente viável e localmente disponível pode ser satisfatório.

No entanto, é preciso ter cuidado com as baritas, pois podem estar contaminadas com óxidos metálicos com valores de dureza superiores aos da própria barita, como óxido de silício e óxido de ferro. A consequência da contaminação com minerais ou compostos mais duros, como a sílica, é o aumento não planejado do atrito no produto final. O aumento do atrito utilizando baritas com 10% de sílica não é necessariamente ruim, contudo, o formulador deve saber da sua existência e do seu efeito no produto através de ensaios de performance. Sendo assim, outro fator de risco é a estabilidade dos percentuais de cada fase na matéria-prima e, portanto, a matéria-prima deve ter um grau de pureza constante.

A barita comercial, por exemplo, é muitas vezes uma mistura de sulfato de bário e estrôncio, assim como no caso da contaminação por sílica, esta contaminação pode não ser prejudicial ao produto. Contudo, esta mistura apresenta propriedades diferentes das matérias-

primas individuais, fazendo com que trocas constantes possam gerar variações no comportamento de atrito e desgaste do produto final (NICHOLSON, 1995).

O controle das propriedades citadas anteriormente possui importância fundamental para a prevenção de efeitos não esperados no comportamento do atrito e do desgaste do material de atrito, assim como a durabilidade do sistema de freio. Tal estudo diminui a quantidade de testes diretamente no produto e faz o controle na entrada do processo.

### 3.7. CARBETO DE SILÍCIO

O carbetto de silício (SiC) é um dos mais importantes tipos de carbetos, por suas propriedades e aplicações tecnológicas (RIEDEL, 2000). O carbetto de silício pertence ao grupo de materiais com alta dureza e ponto de ebulição resultante de ligações covalentes, nomeado de materiais duros não-metálicos (KIEFFER; BENESOVSKY, 1963). Em sua forma natural, foi encontrado em um meteorito nos Estados Unidos, no estado do Arizona. Sua produção industrial em larga escala foi viabilizada a partir do processo conhecido por Acheson. Atualmente, a produção anual é de cerca de 700.000 toneladas (RIEDEL, 2000).

O processo de fabricação do SiC exige uma fonte de carbono, na qual o coque é amplamente utilizado, e uma fonte de silício, normalmente emprega-se a sílica. Essa mistura é aquecida até temperaturas entre 1700 a 2500 °C e permanece no forno de 8 a 10 dias. A reação química da formação de SiC é a da Equação 3:



A energia necessária é fornecida através de um núcleo de grafite conectado a dois eletrodos nas extremidades do forno. Dessa forma, o carbetto de silício vai se formando em camadas ao redor do núcleo, sendo a primeira camada constituída pelo  $\alpha$ -SiC, visto que é a fase que necessita a maior temperatura para cristalização (FORELAND *et al.*, 2008). Logo após, está a camada composta pelo  $\beta$ -SiC, que requer temperaturas menores que 2000 °C. Todavia, uma outra estrutura poderia ser sintetizada em temperaturas menores 1300 – 1600 °C, utilizando outro processo através da decomposição da metiltriclorossilano em wurtzita (RIEDEL, 2000).

Como visto, quando sinterizado pelo processo de Acheson, é possível obter-se SiC sob diversas estruturas cristalinas. A Tabela 2 apresenta os tipos predominantes de estrutura cristalina do SiC conforme a sua temperatura de modificação.

**Tabela 2 Tipos de estruturas cristalinas do carbeto de silício.**

Nome	Estrutura
$\alpha$ SiC (alta temperatura de modificação)	6H (hexagonal)
	15R (romboédrica)
	4H (hexagonal)
$\beta$ SiC (baixa temperatura de modificação)	3C (cúbica)

A Figura 16 é uma imagem fotográfica de um cristal de carbeto de silício com suas diversas facetas e cores refletindo a luz, ainda é possível observar a geometria proveniente da sua estrutura cristalina hexagonal.



**Figura 16 Cristais de carbeto de silício. Fonte: Refractory Metal (2022)**

Suas propriedades de dureza, resistência térmica e resistência à corrosão fazem do SiC um excelente abrasivo, um agente de cementação de ligas de ferro e uma excelente matéria-prima para materiais refratários (RIEDEL, 2000).

Fortes ligações interatômicas asseguram tanto uma dureza alta quanto uma boa refratariedade, fatores que influenciam diretamente na seleção de materiais utilizados como abrasivos, devido ao poder de atrito e as altas temperaturas pontuais geradas pela ação de corte.

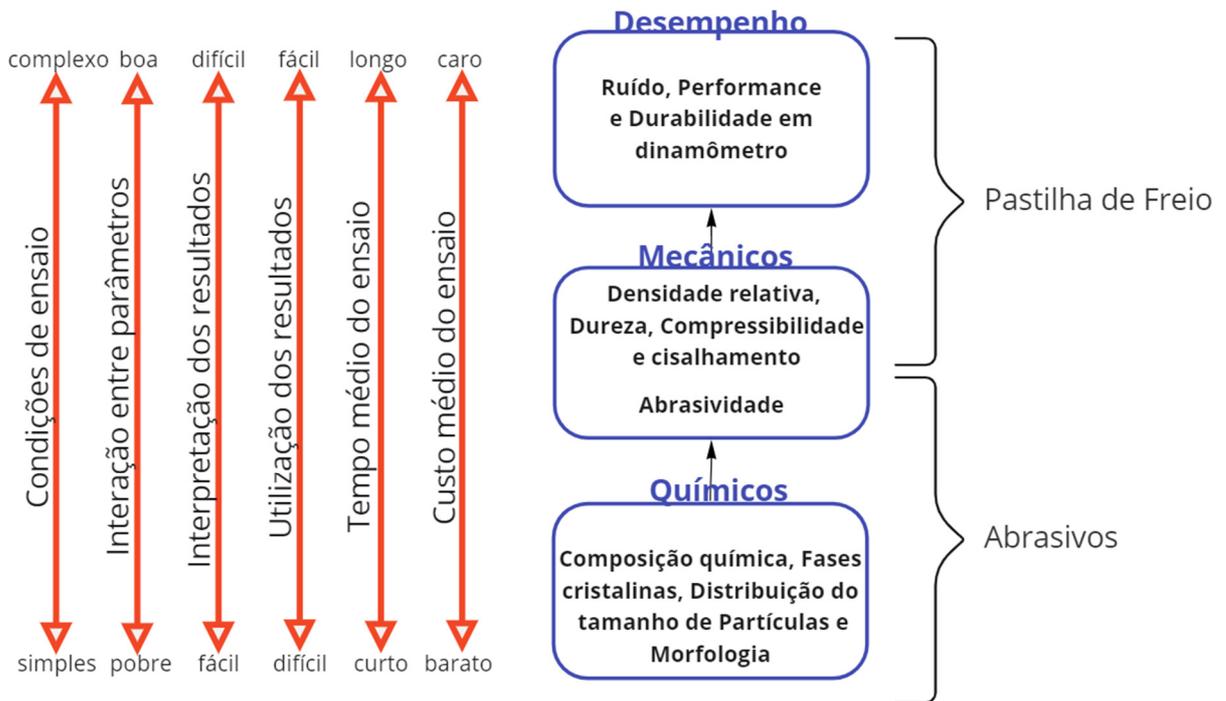
A Tabela 3 apresenta valores genéricos de algumas propriedades do carbeto de silício.

**Tabela 3. Valores propriedades do carbeto de silício.**

Propriedade	Valor de referência
densidade	3,2 g/cm <sup>3</sup>
condutividade térmica	0,2 $\frac{\text{cal.cm}}{\text{°C.cm}^2.s}$
dilatação térmica a 20 °C	$2,5 \times 10^{-6} \frac{\text{in}}{\text{in.°F}}$
módulo de elasticidade a 20 °C	450 GPa

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 17 apresenta um fluxograma dos ensaios realizados. Estão classificados conforme o tipo de material: abrasivos e pastilha de freio. Foi utilizada a classificação de (BHUSHAN, 2001), vide Figura 7, onde os ensaios são classificados conforme sua complexidade e os pontos positivos e negativos de cada um.



**Figura 17 Fluxograma de ensaios de classificados conforme o nível e a aplicação.**

### 4.1. MATERIAIS

#### 4.1.1. CARBETO DE SILÍCIO

Para esse estudo, foram escolhidos três carbeto de silício, denominados de A, B e C, com distribuição de tamanho de partículas distintas.

##### 4.1.1.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química dos carbeto de silício foi determinada por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X, abrangendo todos os elementos presentes no intervalo de número atômico do sódio ao urânio.

Foi utilizado um equipamento Shimadzu modelo EDX-7000, com um tubo de ródio, um detector de alta performance e uma bomba de vácuo. Mensurou-se o percentual através de uma rotina que é operacionalizada com as informações dos parâmetros fundamentais do equipamento, com resolução de uma casa decimal.

A preparação da amostra foi realizada através do método de pó solto, sem fusão. Foram utilizadas em torno de 20 g do carbetto alocado em um porta-amostra com polipropileno em sua extremidade, por se tratar de um plástico imperceptível à fluorescência e com baixa contaminação.

O carbetto de silício denominado A possui 98% em massa do elemento silício, e 2% de alumínio. Já os demais, B e C, possuem em suas composições aproximadamente 100% do elemento silício.

#### 4.1.1.2. FASES CRISTALINAS

Foram identificadas as fases cristalinas presentes em cada amostra de carbetto de silício através da técnica de difração de raios X. O equipamento utilizado para a análise foi o modelo XRD-6100 da Shimadzu, do tipo  $\Theta - 2\Theta$  e dispõe de um tubo de cobre com comprimento de onda de 1,54 nm. Foram utilizadas fendas de divergência e espalhamento de 0,5 mm e de recepção de 0,15 mm, além disso um monocromador posicionado logo antes do detector com o objetivo de filtrar a radiação  $K\beta$ , permitindo somente a detecção da radiação  $K\alpha$  característica, o que diminui o ruído do difratograma.

Para as 3 amostras analisadas, foi utilizado o mesmo intervalo de 5 a 80 °. As amostras de carbetto de silício foram dispostos no porta-amostra de alumínio com uma concavidade de 1 mm de profundidade e 25 mm de diâmetro. Após, foram pressionados com o auxílio de papel manteiga e uma placa de vidro de modo que a amostra ficasse da mesma altura do porta-amostra e com o menor número de rugosidades na sua superfície.

A interpretação dos difratogramas resultantes foi realizada com o auxílio do *software* Match 3 Crystal Impact. As cartas padrão utilizadas para identificação das fases cristalinas foram as da base de dados Powder Diffraction Standard (PDF).

Verificou-se que as três amostras possuem, como fase cristalina principal, o carbetto de silício, totalizando em torno de 97%. A fase mineral é denominada moissanite, mas também é conhecida como  $\alpha$ -SiC e possui sistema cristalino hexagonal. As fases cristalinas contaminantes

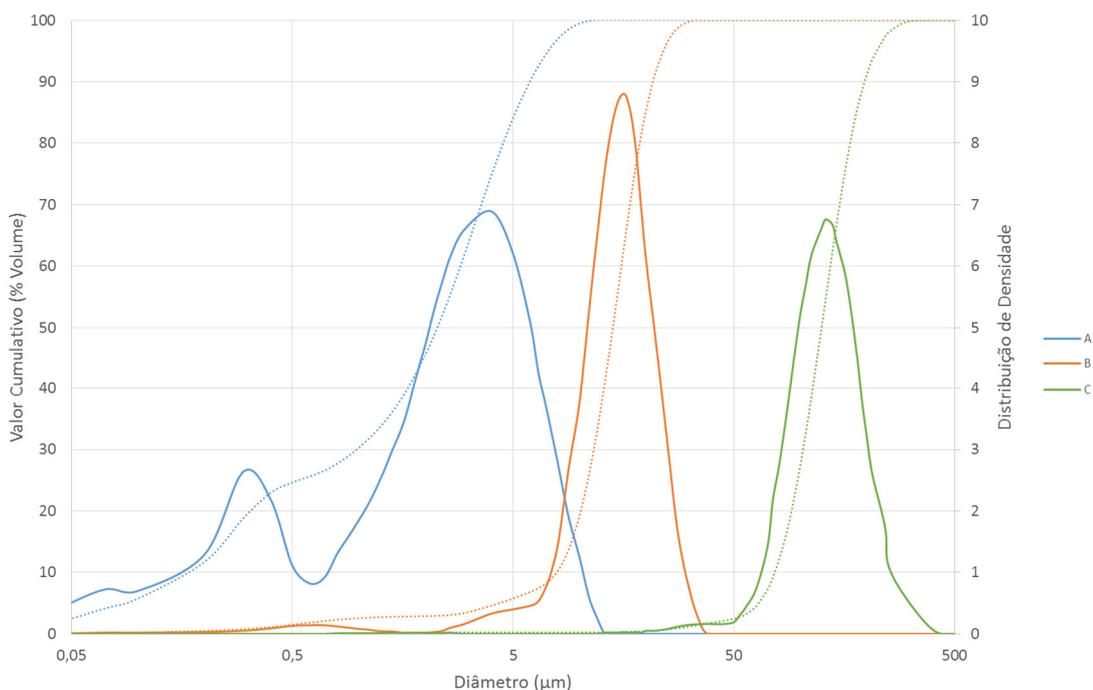
foram identificadas como quartzo (em todas as amostras), e silício metálico, presente apenas na amostra A.

#### **4.1.1.3. DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DE PARTÍCULA**

Utilizou-se o método de difração à laser, para a determinação da distribuição do tamanho de partículas dos carbetos de silício em estudo. Todas as análises foram realizadas em meio líquido, no equipamento marca Cillas modelo 1180. O meio escolhido foi o álcool isopropílico e foi mantida a obscuridade de cada um dos materiais em valores próximos a 15. A obscuridade está relacionada à sombra que as partículas fazem ao incidir o feixe de laser.

As amostras foram analisadas pelo método de Fraunhofer, o qual não necessita de informações óticas do material, e pelo método de Mie, utilizando um índice de refração de 2,55, valor da base de dados do próprio equipamento. Não se observou variações significativas entre os métodos, portanto, os resultados apresentados nesse trabalho foram obtidos pelo método de Fraunhofer.

A Figura 18 apresenta a distribuição do tamanho de partícula acumulada e por densidade de população, assim é possível verificar que o material mais fino SiC A apresenta uma distribuição bimodal, sendo o primeiro e menor pico centralizado em 0,3  $\mu\text{m}$ , com tamanhos de 0,05  $\mu\text{m}$  até aproximadamente 0,6  $\mu\text{m}$ , tais partículas representam em volume cerca de 25% do total. Os 75% restantes das partículas formam o segundo e principal pico que está centralizado em 4  $\mu\text{m}$ , onde encontram-se partículas de 0,6  $\mu\text{m}$  até o tamanho máximo de 12  $\mu\text{m}$ . Isso resulta em um tamanho médio de 3  $\mu\text{m}$  para o SiC A. Os SiC B e SiC C apresentam distribuição de partículas com comportamento monomodal. Para o SiC B, o pico está centralizado em aproximadamente 15  $\mu\text{m}$ , porém as partículas iniciam com tamanho mínimo de 2,5  $\mu\text{m}$  até o tamanho máximo de 36  $\mu\text{m}$ . Já a amostra SiC C, com partículas médias de 130  $\mu\text{m}$ , inicia com partículas de aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  e possui tamanho máximo de 400  $\mu\text{m}$ .



**Figura 18 Gráfico de distribuição do tamanho de partícula dos carbetos de silício.**

Observa-se uma variação significativa de tamanho médio da partícula, vide Tabela 3, sendo o SiC B cerca de 5 vezes maior que o SiC A e o SiC C cerca de 8 vezes maior que as partículas do SiC B. Constata-se também que não existe variação significativa entre os valores de  $D_{50}$  e  $D_{médio}$ , mantendo variações semelhante entre os carbetos de silício. Todos os valores estão em % volume de partículas.

**Tabela 3 Resultados de distribuição de tamanho de partículas dos carbetos.**

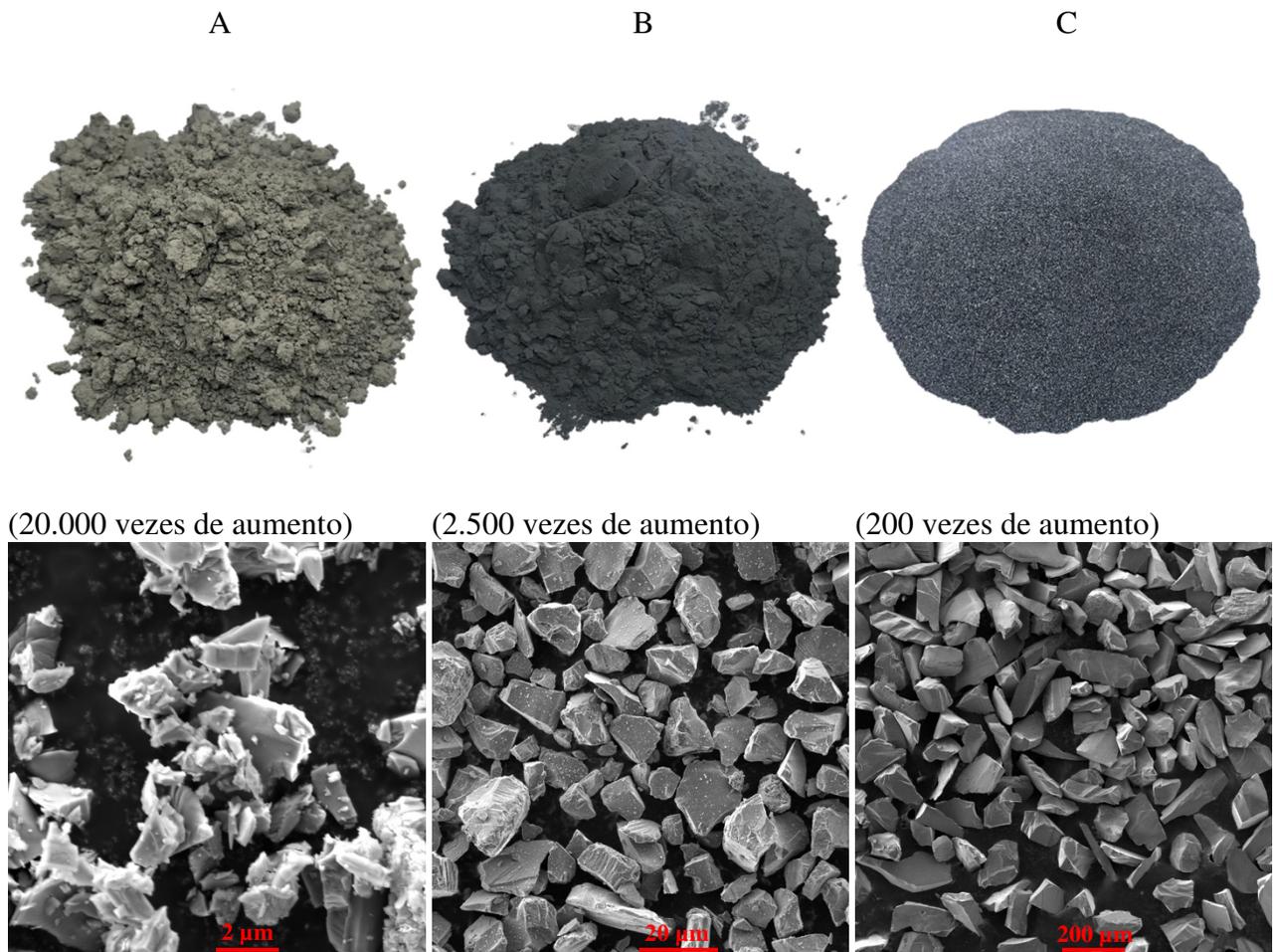
% Volume	A	B	C
$D_{10}$	0,2	7,8	76,0
$D_{20}$	0,8	10,1	90,8
$D_{50}$	2,6	14,2	124,7
$D_{80}$	5,0	18,8	168,7
$D_{90}$	6,3	21,6	196,7
$D_{100}$	12,0	36,0	400,0
$D_{médio}$	2,7	14,3	131,1

#### 4.1.1.4. ANÁLISE MORFOLÓGICA

A avaliação visual da morfologia da partícula foi realizada através da análise das imagens geradas por um microscópio eletrônico de varredura (MEV-FEG) da marca Tescan, modelo Mira 3. Os pós analisados foram depositados sobre uma fita condutora e receberam

metalização de ouro sobre a sua superfície. A preparação da amostra e a análise foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol pertencente à UCS.

A Figura 19 apresenta imagens fotográficas e por MEV dos carbetos de silício investigados. É possível constatar que todos possuem como semelhança partículas irregulares, pontiagudas, o que aumentaria sua abrasividade em contato com outra superfície, dado que a probabilidade de aumentar ângulo, atingindo o ângulo de ataque crítico, que propicia um desgaste de microcorte.



**Figura 19** Morfologia dos carbetos de silício: imagens fotográficas e por microscopia óptica.

Observa-se que o SiC A, além de possuir menor tamanho de partícula, possui morfologia das partículas e distribuição de tamanhos mais heterogênea que os demais carbetos, o que confirma o fato de a distribuição de tamanho de partícula possuir uma curva de densidade de população bimodal. Os demais carbetos, apresentam tamanhos e formatos mais semelhantes, com ângulos agudos. O anexo 8.1 traz imagens complementares às da Figura 18.

#### 4.1.2. PASTILHA DE FREIO

Foi utilizada para a análise do comportamento do carbetto de silício no freio a pastilha denominada PD/82 utilizada em veículo Agile da Chevrolet. A Figura 20 apresenta desenho das peças interna e externa dessa pastilha

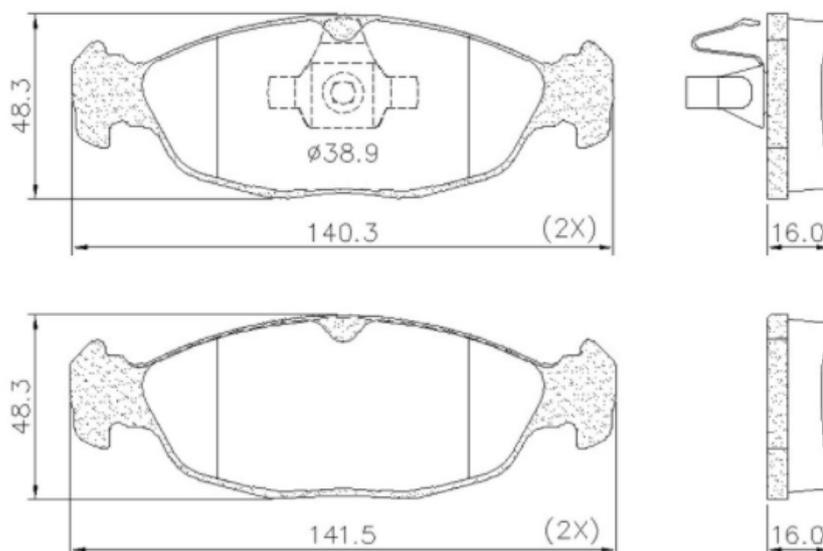


Figura 20. Desenho 2D pastilha de freio de referência geométrica PD/82.

##### 4.1.2.1. FORMULAÇÃO

A pastilha de freio utilizada para o estudo foi uma formulação semimetálica, sem a presença de amianto, contendo 5 % em volume de partículas abrasivas, ou seja, carbetto de silício. Para essa formulação de pastilha de freio, são utilizados 15 componentes divididos conforme sua função na Tabela 4. Foi utilizado o mesmo percentual em volume de todos os componentes e trocando somente o carbetto de silício utilizado.

Tabela 4 Composição genérica da pastilha de freio

Função	Grupo	% Volume	% Peso
Aglomerante	-	12	06
Reforço	Fibras Não Metálicas	01	01
	Fibras Metálicas	11	28
Carga	Orgânicas	02	01
	Inorgânicas	16	13
Modificador de Atrito	Lubrificantes	51	48
	Abrasivos	05	06

#### **4.1.2.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO**

As pastilhas passaram pelo processo de produção dividido em 4 etapas principais. A primeira etapa é denominada misturar, onde o material é pesado conforme os percentuais apresentados na formulação da Tabela 4 para uma carga de misturador de 6 kg.

A próxima etapa é chamada de pré-formar, onde o material é prensado por alguns minutos sem aquecimento, com o objetivo de adquirir o formato da peça para prensagem.

A etapa prensar é a terceira, diferente da segunda etapa, utilizou-se temperatura de 148 °C durante 5 minutos, para o alívio dos gases das reações geradas foi realizado ventilações durante esse processo.

Por fim, a última etapa é referente ao pós-cura, etapa que garante que a resina presente no material foi totalmente curada e não sofrerá mudanças na aplicação. Na pós-cura, o material é colocado em uma estufa com temperatura de 230 °C por cerca de 5 horas, finalizando assim o processo de produção do material a ser testado.

### **4.2. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO**

#### **4.2.1. ABRASIVIDADE**

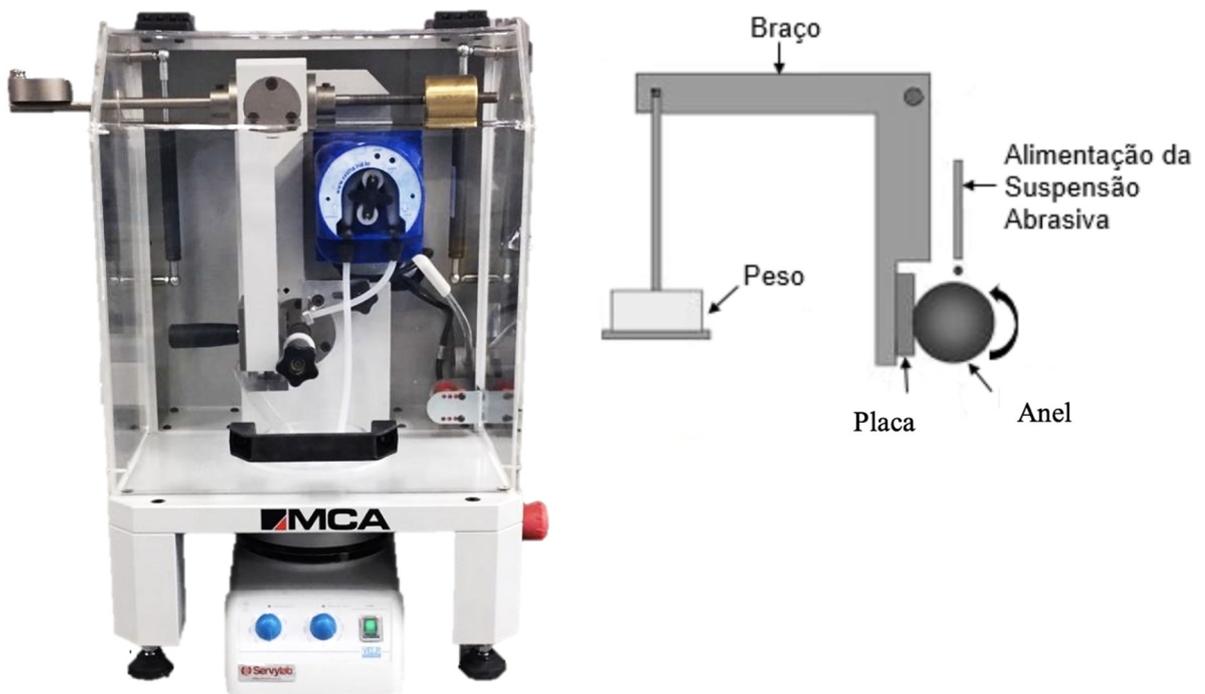
A abrasividade possui como resultado principal o volume desgastado da superfície, resultante do contato abrasivo das partículas. Para a análise da abrasividade, foi utilizado um procedimento interno da empresa FRAS-LE, desenvolvido para a análise do poder de abrasão dos atritantes utilizados pela empresa, conforme Figura 21. Utiliza-se para tanto, um equipamento de desgaste microabrasivo com anel adaptado (KELLY; HUTCHINGS, 2001). O ensaio é realizado com a dissolução do carbetto de silício em álcool, a uma concentração de 0,4 g/cm<sup>3</sup> em peso de carbetto de silício, independentemente do tamanho de partícula.

A mistura alcoólica passa por uma bomba peristáltica que a goteja sobre a superfície de um anel de poliacetal de 14 mm de raio. A escolha do anel, substituindo a rotineira esfera, é devido à marca deixada na superfície da placa. Ao utilizar o anel, é possível verificar com mais facilidade o mecanismo de desgaste, seja a dois ou três corpos. Além disso, as bordas da cratera ficam mais destacadas, o que facilita a medição do volume retirado devido ao desgaste.

O anel é rotacionado com uma velocidade de 30 rpm sobre uma placa de acrílico exercendo uma força normal de 0,25 N. A força é aplicada através de um braço onde é inserido o peso equivalente à força necessária, conforme mostra a Figura 21. A escolha do anel e da placa de acrílico é devido à dureza de ambos os materiais. Como o anel possui dureza menor

que a partícula do abrasivo, o carbeto de silício fica aderido sobre a superfície do anel e desgasta a placa de acrílico. Esses materiais também facilitam a utilização do mesmo método para particulados com dureza menor, o que não seria possível se fosse utilizado uma esfera/anel de aço. O tempo de duração do contato entre as partes é de 25 minutos, o que resulta em uma distância percorrida de 55 m. O ensaio é realizado em triplicata e o resultado final é a média dos volumes desgastados.

Durante o ensaio, a solução é agitada constantemente por um agitador eletromagnético, o que impede a precipitação do abrasivo. Além disso, o sistema funciona em circuito fechado, ou seja, as partículas que já passaram pelo contato voltam para o sistema e se misturam com as demais.



**Figura 21** Equipamento para a determinação da abrasividade (esquerda) e seu esquema de funcionamento (direita). Fonte: KELLY; HUTCHINGS (2001).

Para a medição do volume desgastado, foram utilizadas imagens de microscópio. As crateras possuem formato essencialmente retangular, porém, devido a variações de geometria, foi escolhido medir a sua largura e comprimento através da média das distâncias obtidas pela matriz binária da imagem em preto e branco. Cada imagem possui a resolução de 1920 x 2560 pixels, sendo cada pixel o equivalente a 0,0027 mm. Como a cratera reproduz o formato circular do anel, foi utilizada a fórmula do seguimento circular para determinar o volume desgastado, segundo a Equação 4, sendo  $w$  a largura da cratera.

A área do seguimento circular é definida utilizando a área do setor e a área do triângulo, conforme Equação 5. Com isso, chega-se à Equação 6, sendo  $r$  o representante do raio do anel,  $\theta$  o ângulo do setor circular,  $x$  a altura do triângulo incluso no setor. Para a determinação de  $x$ , utiliza-se a Equação 7, onde  $c$  determina o comprimento da cratera. Ao final, é possível determinar o volume desgastado.

$$V = A_{seguimento} \cdot w \quad (4)$$

$$A_{seguimento} = A_{setor} - A_{triângulo} \quad (5)$$

$$A_{seguimento} = \frac{r^2 \cdot \theta}{2} - \frac{x \cdot c}{2} \quad (6)$$

$$x = \sqrt{r^2 - \left(\frac{c}{2}\right)^2} \quad (7)$$

#### 4.2.2. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais foram realizados testes que avaliam a resistência mecânica são denominados: densidade relativa, dureza, compressibilidade e cisalhamento. Esses são ensaios amplamente conhecidos na indústria de fricção e utilizados para desenvolvimento e controle de qualidade conforme requisitos de clientes.

##### 4.2.2.1. DENSIDADE RELATIVA

O ensaio de densidade relativa da pastilha de freio é realizado conforme a norma NBR 5544 do ano de 1998 denominada Guarnições da embreagem e do freio – Determinação da densidade relativa, definida pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Para a realização do ensaio foram medidas 6 peças para cada material. Nesse método, um corpo-de-prova da pastilha é pesada em ar (A) e também pesada em um suporte mergulhado em água destilada (B) em temperatura ambiente. Após, a densidade é calculada conforme Equação 8.

$$d_{relativa} = \frac{A}{A-B} \quad (8)$$

##### 4.2.2.2. DUREZA

A medição de dureza Gogan é um ensaio não destrutivo, por isso pode ser utilizada para controle de processo de produção. Esse tipo de dureza é amplamente utilizado na indústria de materiais de atrito. A norma NBR 5520 do ano de 1991 denominada Guarnições de freio –

Determinação da dureza “Gogan” de materiais de fricção, definida pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

O número de dureza Gogan é referente à distância de avanço em unidades de 0,0064 mm do penetrador no corpo-de-prova. São realizadas duas medidas por peça em 6 peças por material. O seu resultado é inversamente proporcional à rigidez do material, ou seja, quando maior a dureza Gogan do produto, menos rígido ele será.

#### **4.2.2.3. COMPRESSIBILIDADE**

A determinação da compressibilidade dos materiais utilizados em pastilhas de freio segue a seção 9.2.7 da norma ATE N 543 27.00 décima primeira edição do ano de 2012.

O ensaio simula a aplicação de carga de um freio a disco hidráulico. Esse dispositivo entrará em contato com a plaqueta da pastilha de atrito. É aplicada uma pré-carga de 5 bar, após aumenta-se a pressão para o máximo de 160 bar, que deve ser atingida em 2 segundos e permanecer por mais 1 segundo. É inserido um dispositivo com formato semelhante ao pistão de freio, com o objetivo de simular a condição real de aplicação. São realizadas 6 aplicações. O valor de compressibilidade é obtido na última aplicação. O resultado é disponibilizado em unidade de comprimento ( $\mu\text{m}$ ) e em percentual em relação a espessura do corpo-de-prova. Para a realização do ensaio foram medidas 42 peças para cada material.

#### **4.2.2.4. CISALHAMENTO**

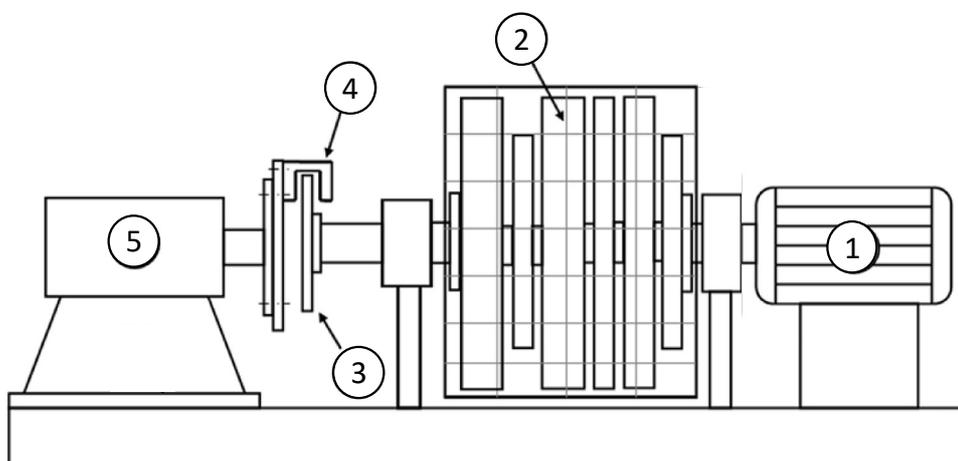
O método de cisalhamento tem o objetivo de verificar a aderência do material de atrito na plaqueta metálica. Para que ocorra essa colagem é aplicado um adesivo que possui reatividade com o metal e com o material de atrito.

A determinação da resistência ao cisalhamento das pastilhas de freio utiliza por sua vez a seção 9.2.6 da mesma norma ATE N 543 27.00 referida para a determinação da compressibilidade. Para a realização do ensaio, é utilizado um dispositivo que se adapta a geometria da peça. Após, é aplicada uma força sobre a material de atrito próximo à região de contato com a plaqueta com uma taxa de 4500 N/s. O resultado será a força necessária para o cisalhamento e a avaliação visual da superfície da plaqueta após o deslocamento. Para a realização do ensaio foram medidas 6 peças para cada material.

### 4.2.3. DURABILIDADE

A durabilidade de uma pastilha de atrito é avaliada quanto ao seu desgaste, integridade estrutural e outros comportamentos derivados do uso. Além disso, também é avaliado o comportamento do disco, visto que por se tratar de um contato entre duas superfícies, se espera que o disco também possua alta durabilidade.

Os ensaios de pastilhas de freio para determinar sua durabilidade foram realizados em um dinamômetro inercial conforme Figura 22. No equipamento, um motor elétrico (1) aciona um conjunto de discos flutuantes (2) que fornecem a inércia requerida ao ensaio. Na extremidade do eixo, encontra-se o disco (3) juntamente com a pinça (4) que está conectada ao sistema de medição de torque (5).



**Figura 22** Esquema de funcionamento de um dinamômetro inercial. Fonte: LINK, 2022

Para o teste dos carbetos foi utilizado o freio do veículo Agile com uma inércia de 50 kg.m<sup>2</sup>. Este ensaio foi realizado em 5 ciclos de 500 frenagens em velocidade inicial de 60 km/h e velocidade final de 0 km/h, com uma desaceleração de 2 m/s<sup>2</sup>. Cada um dos ciclos possui temperatura de início da frenagem constante, sendo o 1º em 100 °C, o 2º em 200 °C, o 3º em 300 °C, o 4º em 400 °C e o 5º novamente em 100 °C. Após cada ciclo, são mensurados os desgastes das pastilhas e do disco em massa e em espessura. O objetivo dos ciclos é verificar a influência da temperatura no comportamento de desgaste do disco e da pastilha de freio, visto que no uso do freio no dia-a-dia pode levá-lo a temperaturas elevadas.

Após cada ciclo, são mensurados os desgastes das pastilhas, interna e externa, e do disco em massa e em espessura. Também são avaliados parâmetros como presença de sulcos, bolhas, trincas, contaminações, manchas e aspecto em geral.

#### 4.2.3.1. RUGOSIDADE

A rugosidade do disco foi avaliada através do parâmetro de rugosidade média  $Ra$  (Average roughness) medido em um medidor de perfil modelo Talysurf series 2 da marca Taylor-Hobson. A Figura 23 representa graficamente o que é medido através desse parâmetro, trata-se da altura média entre o perfil de rugosidade e a sua linha média, calculado pela integral da altura absoluta ao longo do comprimento avaliado. Abaixo segue a Equação 11 proposta para o índice:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) \quad (11)$$

Onde:

$Ra$  é a rugosidade média;

$L$  é a comprimento;

$y(x)$  é a altura absoluta em relação ao ponto de referência no ponto  $x$ ;

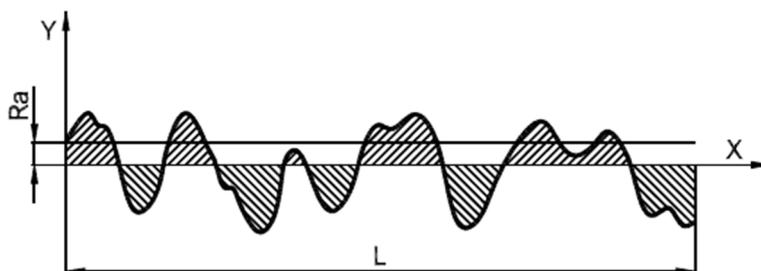


Figura 23 Determinação da rugosidade média  $Ra$ .

#### 4.2.4. PERFORMANCE

A análise de performance é considerada a característica de maior relevância para o desenvolvimento de materiais de atrito. O método para a determinação da performance avalia a variação do coeficiente de atrito em função da velocidade, pressão e temperatura. O coeficiente de atrito é definido pela geometria do sistema de freio e as forças aplicadas. A Equação 9 evidencia o cálculo utilizado para a indicação do coeficiente de atrito.

$$\mu = \frac{100 \cdot T}{2 \cdot (P - P_{lim}) \cdot A_p \cdot r_{eff} \cdot \eta} \quad (9)$$

Onde:

$\mu$  é o coeficiente de atrito (adimensional);

$T$  é o torque medido (N/m)

$P$  é a pressão aplicada (kPa)

$P_{lim}$  é a pressão mínima requerida para desenvolver o torque de frenagem (kPa)

$A_p$  é a área do pistão (mm<sup>2</sup>)

$r_{eff}$  é o raio efetivo do disco de freio (mm)

$\eta$  é a eficiência de frenagem, considera-se 100%

A norma AK-Master utilizada para avaliação da performance das pastilhas de freio é de origem europeia, desenvolvida por fabricantes de materiais de atrito. O ensaio de AK-Master é semelhante ao previsto pela norma SAE J2522 em suas etapas de teste. Ambos são procedimentos para veículos com freios hidráulicos e avaliam o coeficiente de atrito em função das diferentes variáveis do ensaio, vide Tabela 5.

**Tabela 5 Etapas do ensaio de AK-Master para medição da performance da pastilha de freio.**

Etapa	Temperatura Inicial (°C)	Frenagens por etapa	Velocidade (km/h)	Pressão (bar)
1- Assentamento	100	30	80 – 30	30
2- Queima	100	64	80 – 30	15 até 38
3- Caracterização	100	6	80 – 30	30
4.1- Velocidade	100	8	40 – 05	10 até 80
4.2- Velocidade	100	8	80 – 40	10 até 80
4.3- Velocidade	100	8	120 – 80	10 até 80
4.4- Velocidade	100	8	160 – 130	10 até 80
4.5- Velocidade	100	8	180 – 150	10 até 80
5- Caracterização	100	6	80 – 30	30
6- Frio	40	1	40 – 05	30
7- Auto-estrada <sup>(I)</sup>	50	2	100 – 05	variável
8- Caracterização	100	18	80 – 30	30
9- Fade 1 <sup>(II)</sup>	100 até 550	15	100 – 05	variável
10- Caracterização	100	18	80 – 30	30
11- Velocidade	100	8	80 – 30	10 até 80
12- Temperatura com P cte	100 até 500	9	80 – 30	30
12- Pressão com T cte	500	8	80 – 30	10 até 80
13- Caracterização	100	18	80 – 30	30
14- Fade 2 <sup>(II)</sup>	100 até 550	15	100 – 05	variável
15- Caracterização	100	18	80 – 30	30

(I) desaceleração constante de 0,6 m/s<sup>2</sup>; (II) desaceleração constante de 0,4 m/s<sup>2</sup>. Cte = constante

O AK-Master não é um ensaio de certificação, entretanto é amplamente utilizado para desenvolvimento de novos produtos para avaliação de performance à frio, eficácia em freios

novos, sensibilidade à velocidade, estabilidade de coeficiente de atrito, resistência ao fade e recuperação após temperatura.

#### 4.2.5. RUÍDO

O ruído é atualmente uma das principais razões de devoluções, garantias e mudança para um concorrente nesse ramo. Em função disso, as versões com os diferentes abrasivos foram avaliadas quanto ao seu ruído.

Para a avaliação do ruído foi utilizado o ensaio SAE J2521, vastamente aplicado na indústria automobilística. O método expõe o sistema de freio a condições de frenagens propícias ao ruído do tipo *squeal*, tipo que gera incomodo durante o uso ao motorista, seus passageiros e também poluição sonora. O ensaio tem o objetivo de intensificar a ocorrência de ruído de forma a acelerar a avaliação do mesmo em um curto período de tempo.

A norma SAE J2521 tem como principal objetivo a avaliação do ruído tipo *squeal*, sendo este o ruído que gera maior desconforto ao usuário. O *squeal* é definido como níveis de ruído de pico iguais ou superiores a 70 dB (A) entre 1,25 kHz e 16 kHz de frequência para testes usando conjuntos de eixos completos. O ensaio dura em torno de 48 h e é exposto a temperaturas entre 50 °C e 300 °C, em velocidade que variaram de 5 km/h a 80 km/h, além de variações de pressões de 2,5 bar a 51 bar. Havendo ainda mais variáveis, como frenagens para manter o veículo em velocidades constantes e frenagens que forçam uma desaceleração constante. A Tabela 6 apresenta a matriz de variáveis do ensaio de forma resumida.

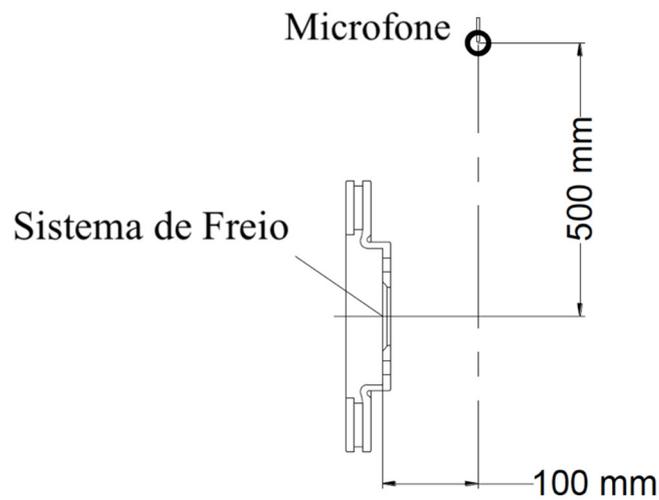
A Figura 24 apresenta a posição em que o microfone é colocado em função da norma utilizada. Esta posição deve ser fixa para todos os ensaios realizados com o intuito de comparar o desempenho de diferentes corpos-de-prova. Além disso, o som de fundo não deve ultrapassar 60 dB (A), visto que se procura estimar os ruídos superiores a 70 dB (A). O modelo simplificado de expressão dos resultados leva em consideração o percentual de frenagens na qual o limite de ruído de 70 dB (A) é atingido.

**Tabela 6** Resumo das etapas do ensaio de SAE J2521 para medição do ruído do sistema de freio.

Nome	Etapas	Ciclos*	Temperatura Inicial (°C)	Frenagens por ciclo	Velocidade (km/h)	Pressão (bar)
Assentamento	1	1	100	30	80 – 30	30
	2	1	100	32	80 – 30	15 até 46
	3	1	100	6	80 – 30	30

Velocidade cte	4	19	50 até 300	14	3 e 10 alternada	05 até 30
Aquecimento	5	2	100 e 150	12	500	05 até 30
Para trás /frente	6	5	50 até 150	10	-3 e 3 alternada	05 até 20
Desaceleração	7	9	50 até 250	12	50 – 0	05 até 30
Repete etapas 3, 4, 5, 6, 7, 3, 4, 5, 6, 7, 3						
<i>Fade</i>	8	1	100 até 550	15	100 – 0	Variável máx. 160
Recuperação	9	1	100	18	80 – 30	30
Repete etapas 4, 5, 6, 7, 3						

\* O ciclo é o conjunto de frenagens com a mesma temperatura.



**Figura 24** Esquema de posicionamento do microfone para o ensaio de ruído. Fonte: SAEJ2521, 2006

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. ABRASIVIDADE

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos pelo método de abrasividade para os carbeto de silício investigados, em função dos seus diâmetros médios. A faixa de erro apresentada é referente ao desvio padrão encontrado para cada carbeta de silício investigado.

A análise dos resultados obtidos, observa-se que o material mais fino (A) apresentou volume desgastado de  $0,01 \text{ mm}^3$ ; para o tamanho intermediário (B), obteve-se resultado médio de  $0,10 \text{ mm}^3$ ; já o material mais grosseiro (C) apresentou volume desgastado de  $0,50 \text{ mm}^3$ .

Assim, ao aumentar o tamanho de partícula, é observado um aumento significativo dos resultados de abrasividade, conforme previsto na bibliografia. A curva de tendência que relaciona o volume de material desgastado da placa de polimetil-metacrilato (PMMA), apresenta um ajuste da curva linear de 0,99. Isso indica que o principal impacto no desgaste do ensaio de abrasividade dá-se pelo diâmetro e não pela área superficial, visto que a área de contato na superfície é maior para os menores tamanhos. Entende-se que o diâmetro está relacionado à profundidade do sulcamento gerado na placa, aumentando, conseqüentemente, o desgaste do material.

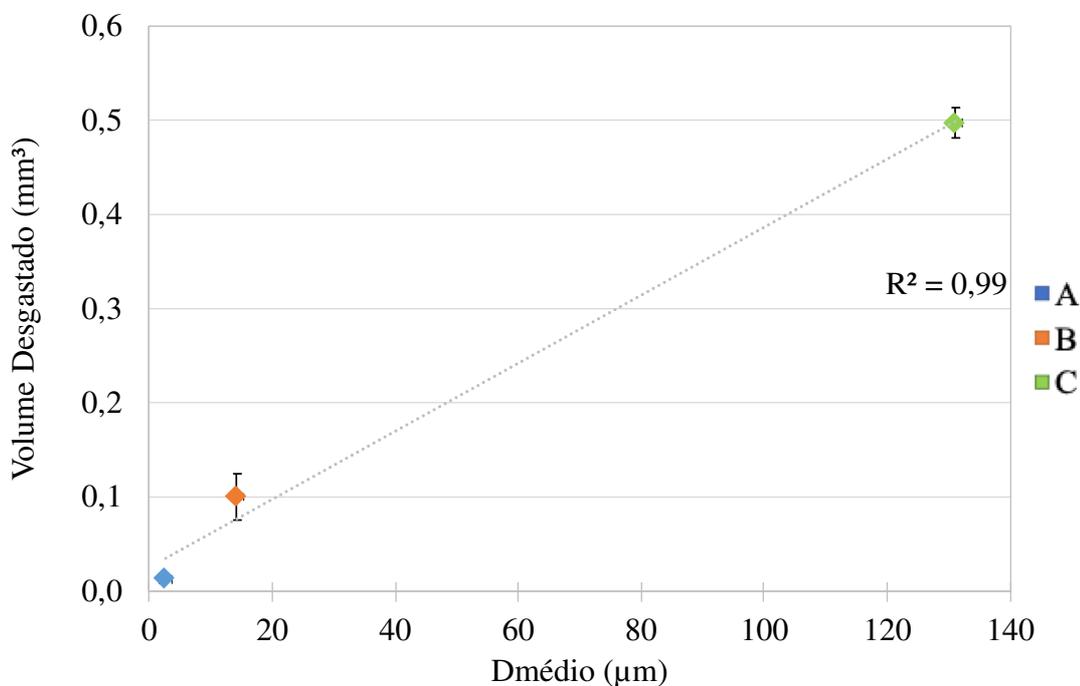


Figura 25 Variação do volume desgastado em função do diâmetro médio das partículas dos carbetos.

Entretanto, não se observou efeito de estabilização do desgaste com o tamanho, fato que também é indicado pela bibliografia como fenômeno provável, já que, ao aumentar o tamanho, observou-se uma estabilização do desgaste, conforme Figura 15 do item 3.6.3. Entende-se que tal fato não ocorreu devido aos materiais das superfícies em contato. No caso de superfícies metálicas, a estabilização ocorre devido ao encruamento do filme superficial da placa metálica, segundo JOST (1966).

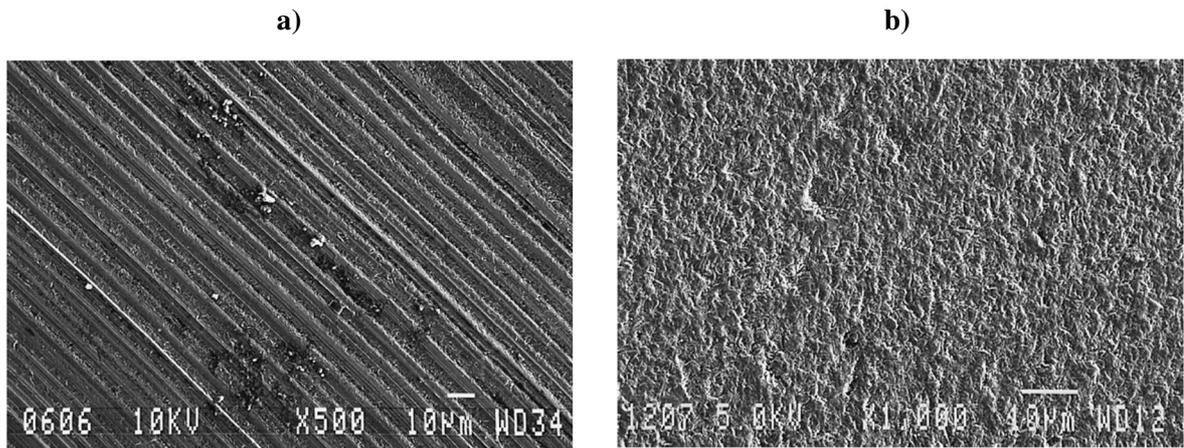
Ao observar as crateras resultantes dos ensaios de abrasividade, é possível perceber um comportamento de desgaste distinto entre o SiC C e os demais, SiC A e SiC B.

Para explicar o comportamento distinto das crateras de abrasividades será utilizado o modo de classificação por mecanismos conforme item 3.4.2. São seis os elementos que estão operando durante o contato de desgaste do ensaio: corpo primário, corpo secundário, terceiro corpo, meio ambiente, movimento relativo e forças de contato. Visto que foram fixadas as condições do meio ambiente, a velocidade de rotação e a carga utilizada, se faz necessário entender os três primeiros elementos.

O corpo primário é o elemento que sofre o desgaste de interesse, que no caso do ensaio de abrasividade se trata da placa de PMMA que será desgastada formando a cratera. O segundo corpo é a contraparte, cujo desgaste não é prioridade. Esse segundo corpo está em movimento em relação ao primeiro e é por ele que forças são transmitidas. Trata-se do anel de poliacetal. O terceiro elemento, chamado de terceiro corpo, é formado por outros materiais que por alguma situação estão na interface de contato entre o primeiro e o segundo corpo. Esses podem ser detritos do desgaste, partículas que foram colocadas no sistema, lubrificantes e produtos de reações químicas entre as partes. Os desgastes a dois corpos e a três corpos possuem coeficientes de desgastes ligeiramente distintos entre si, todavia, o desgaste a dois corpos tende a ser mais severo que o desgaste a três corpos, vide Figura 10.

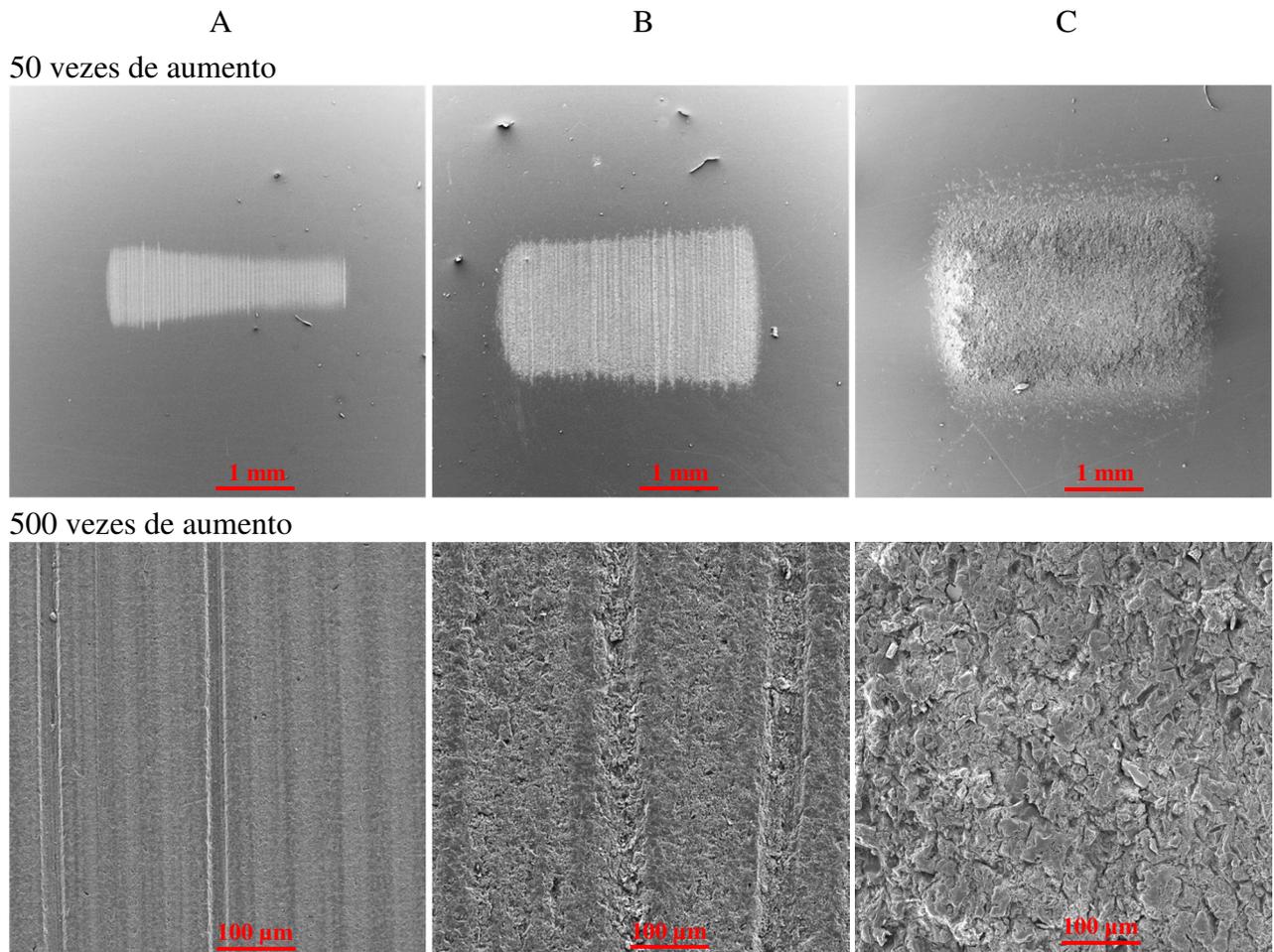
No caso do ensaio de abrasividade, onde uma solução contendo o abrasivo é gotejada sobre o anel, escolheu-se uma superfície de desgaste macia como o poliacetal. Deveu-se isso ao fato do carbetto de silício ser um material de alta dureza, tendendo então a se fixar ao anel, tornando-se assim parte do segundo corpo. Com isso, assegura-se que o mecanismo de desgaste dominante seja a dois corpos.

O desgaste a dois corpos possui um aspecto de riscamento onde a superfície fica com riscos paralelos na direção do movimento realizado, conforme Figura 26 a). Já o desgaste a três corpos possui aspecto de pontos, visto que o terceiro corpo presente está se movimentando na interface em direções aleatórias, conforme Figura 26 b).



**Figura 26** Imagens por microscopia eletrônica de varredura da superfície submetida ao desgaste a) dois corpos e b) três corpos (TREZONA; ALLSOPP; HUTCHINGS, 1999).

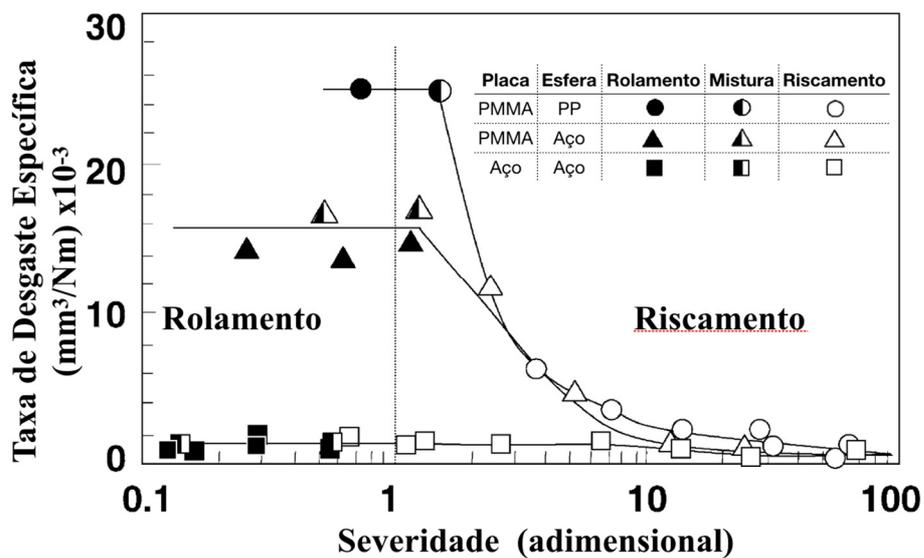
Ao analisar as imagens por microscopias eletrônica de varredura, geradas em magnificações de 50 e 500 vezes, das placas desgastadas pelos carbeto de silício, observa-se os riscos característicos de dois corpos nas crateras dos materiais A e B. Ou seja, supõe-se que o mecanismo predominante nesse ensaio para esses carbeto seja a dois corpos, conforme Figura 27.



**Figura 27. Imagens por microscopia eletrônica de varredura das crateras de abrasividade em placa de PMMA.**

Ao se observar as imagens com 500 vezes, é possível comprovar que se trata de um comportamento misto, onde o mecanismo principal é o de dois corpos. No entanto, a cratera do carbeto C, mais grosseiro, possui aspecto de três corpos, sem riscos contínuos durante a extensão do movimento do anel com a placa. Tal comportamento é observado em ambas as imagens com magnificações distintas de 50 e 500 vezes.

Entende-se que essa mudança de mecanismo ocorreu devido ao fato de que a força utilizada não foi suficiente para engastar as grandes partículas do carbeto C no anel. No artigo de Adachi e Hutchings (2005), é apresentado um comparativo da severidade do contato versus a taxa de desgaste e o tipo de mecanismo presente: dois corpos, três corpos ou misto. Na Figura 28, são apresentados resultados para diferentes materiais em contato, incluindo o PMMA para a placa e o polipropileno PP para a esfera (material semelhante ao poliacetil), tendo como partícula abrasiva o carbeto de silício. Nessa configuração, a mudança de mecanismo de desgaste de dois corpos para três corpos fica evidente ao diminuir a severidade.



**Figura 28. Variação da taxa de desgaste específica em função da severidade de contato de Adachi e Hutchings (2005).**

Como no ensaio dos carbets A, B e C foram mantidos fixos os valores de carga, fração volumétrica do abrasivo e dureza das partes, a única alteração é o diâmetro das partículas. Sendo assim, analisando a Equação 10 de severidade, ao aumentar o diâmetro, aumenta-se o valor de área de interação e, conseqüentemente, diminui-se o valor de severidade, propiciando a

alteração do mecanismo. Porém, se for aumentado o valor da carga, tende-se a aumentar o valor de severidade e com isso voltar o mecanismo para dois corpos. Outra possibilidade de garantir o desgaste a dois corpos em todos os tamanhos de partículas é a alteração do corpo primário e secundário para material metálico.

$$S/S^* = \frac{W}{AvH^1} \times \frac{(H_s/H_b)^{0,49}}{0,0076} \quad (10)$$

Onde  $S$  é a severidade de contato e  $S^*$  é a severidade de contato crítica. Visto que  $W$  é a carga aplicada,  $A$  é a área de interação,  $v$  a fração volumétrica da solução abrasiva e  $H^1$  refere-se a dureza efetiva. Já  $H_s$  é a dureza da  $H_b$  é a dureza da esfera.

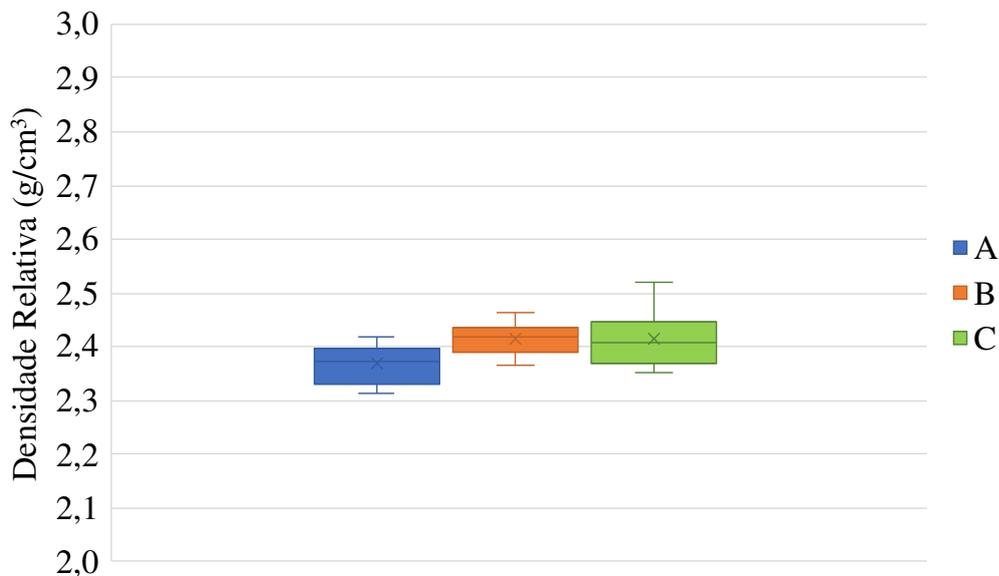
## 5.2. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os produtos contendo os diferentes carbetos não apresentaram variações significativas no grupo de ensaios que caracterizam a resistência mecânica dos materiais. Isso porque esse tipo de resultado tende a variar de acordo com os componentes que são utilizados para a produção das pastilhas de freio, já nesse caso variou-se apenas o tamanho das partículas dos abrasivos. Os subcapítulos a seguir irão detalhar os resultados de cada ensaio.

### 5.2.1. DENSIDADE RELATIVA

Os resultados de densidade relativa não mostraram variação significativa entre as peças fabricadas com os diferentes carbetos, visto que todos apresentaram valores em torno de 2,4 g/cm<sup>3</sup>, sendo o SiC A, de menor tamanho médio de partícula com resultado médio de 2,37 g/cm<sup>3</sup> e desvio padrão de 0,04. O SiC B, com tamanho médio intermediário, apresentou média de densidade 2,42 g/cm<sup>3</sup> e desvio padrão 0,03. Por fim, o SiC, de maior tamanho médio de partícula, apresentou resultado médio 2,41 g/cm<sup>3</sup> e desvio padrão 0,06. A Figura 29 mostra o gráfico de caixa dos resultados dos materiais contendo os diferentes carbetos.

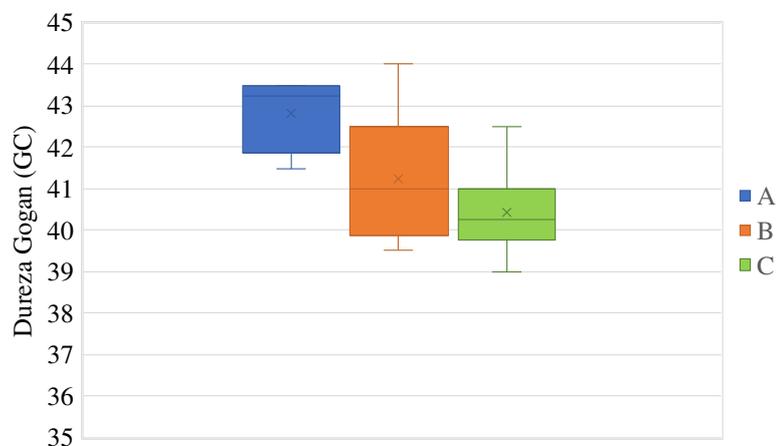
Analisando os resultados, entende-se que devido a sua similaridade, não se observa correlação entre a densidade específica e o tamanho médio de partícula do SiC. Tal fenômeno era o comportamento esperado, visto que todos os carbetos possuem a mesma densidade. Os diferentes tamanhos médios de partícula não acarretaram em diferenças significativas de empacotamento.



**Figura 29. Valores da densidade relativa dos materiais de atrito investigados.**

### 5.2.2. DUREZA

A Figura 30 apresenta o gráfico de caixa dos resultados de dureza Gogan dos materiais de atrito contendo os diferentes carbeto de silício. O material de atrito contendo o carbeto mais fino A possui a menor dureza, ou seja, é o material mais macio, sendo o seu valor médio 42,83 GC e desvio padrão 0,88. O carbeto intermediário B foi o material com maior variação, com resultado médio de dureza 41,25 GC e desvio padrão 1,64. O carbeto mais grosso C, apresentou resultado médio 40,42 e desvio padrão 1,16. Observa-se uma tendência de correlação inversamente proporcional ao tamanho de partícula dos abrasivos. Porém, devido ao desvio padrão das amostras ser maior que a diferença entre as mesmas considera-se que existe relação.



**Figura 30. Valores da dureza Gogan dos materiais de atrito investigados.**

### 5.2.3. CISALHAMENTO

A Figura 31 mostra o gráfico de caixa dos resultados de resistência ao cisalhamento dos materiais contendo os diferentes carbetos. Tal resultado é obtido através da razão entre a força máxima para cisalhamento do material e a área da pastilha. Os resultados de resistência ao cisalhamento não mostraram variação significativa entre as peças fabricadas com os diferentes carbetos de silício, visto que todos apresentaram valores em torno de 290 N/cm<sup>2</sup>. O SiC A, mais fino, apresentou resultado médio de 296 N/cm<sup>2</sup> e desvio padrão de 30. O SiC B, granulometria intermediária, apresentou resistência média de 290 N/cm<sup>2</sup> e desvio padrão 50. O SiC C, de granulometria mais grosseira, apresentou resultado médio de 296 N/cm<sup>2</sup> e desvio padrão 49. Com isso, não se observou relação dessa característica com o tamanho de partícula da matéria-prima abrasiva.

Além da característica de resistência ao cisalhamento, também se observou a aderência do material a plaqueta após o cisalhamento. Todos apresentaram 100% de aderência, ou seja, 100% da área da plaqueta estava coberta por material de atrito após o cisalhamento. Sendo assim, o material de atrito foi o material desprendido pelo cisalhamento, e não as interfaces por desgaste adesivo, em movimento relativo entre si.

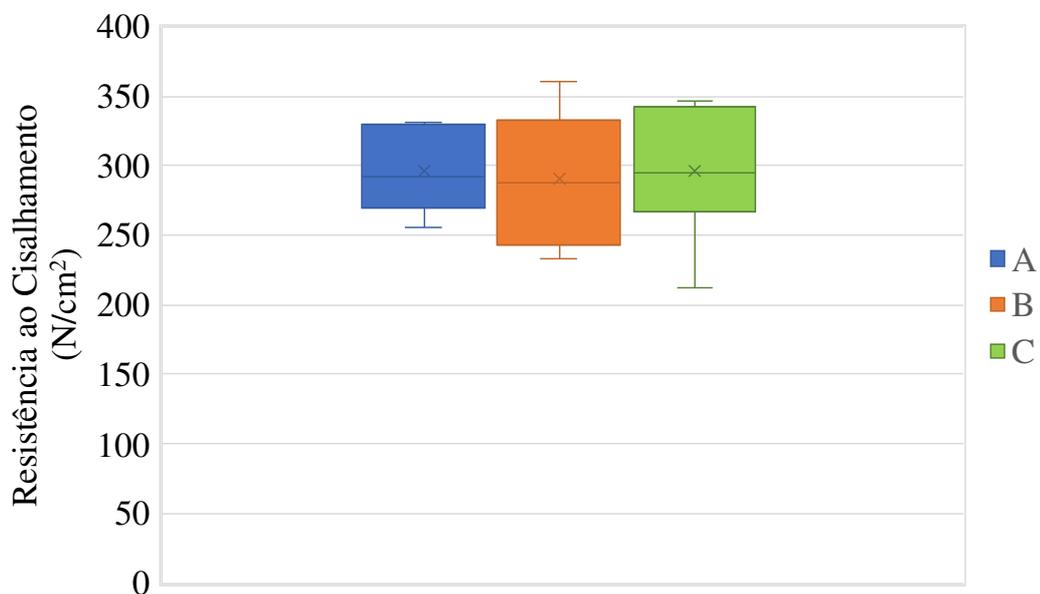
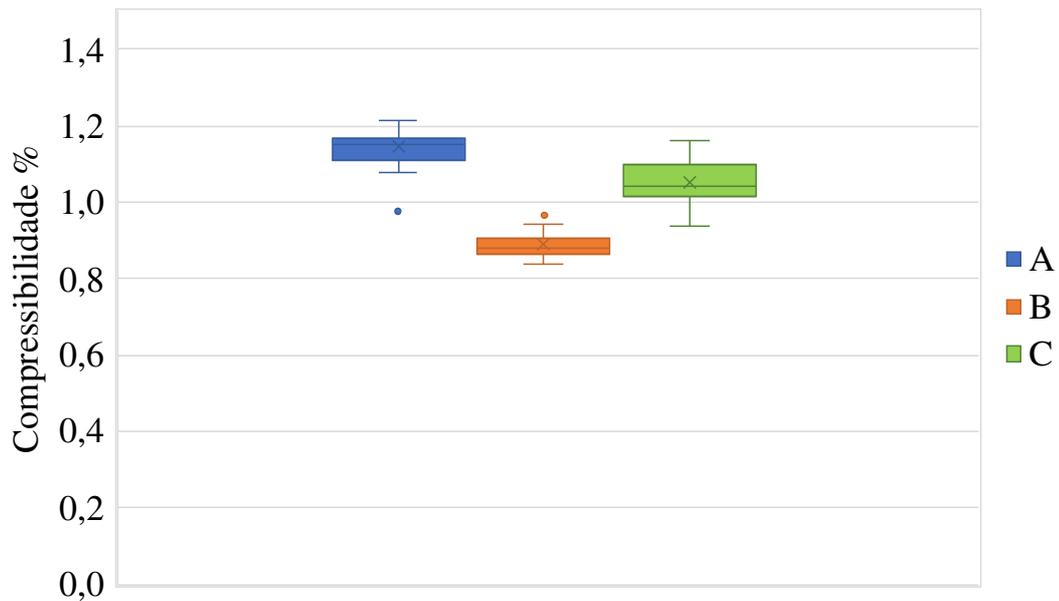


Figura 31 Valores da resistência ao cisalhamento dos materiais de atrito investigados.

### 5.2.4. COMPRESSIBILIDADE

Os resultados de compressibilidade apresentaram pequena variação entre as peças fabricadas com os diferentes carbetos de silício. Sendo o carbeta de silício mais fino A

apresentou resultado médio de 1,14% e desvio padrão de 0,05. O SiC B, com tamanho médio de partícula intermediário, apresentou média de compressibilidade de 0,89 e desvio padrão 0,03. Já o SiC C, com o maior tamanho médio de partícula apresentou resultado médio de 1,05 e desvio padrão 0,06. A Figura 30 mostra o gráfico de caixa dos resultados dos materiais contendo os diferentes carbetos. Não se observa correlação entre os resultados de compressibilidade e o tamanho de partícula, apesar da variação entre os resultados.



**Figura 32 Valores de compressibilidade dos materiais de atrito investigados.**

### 5.3. DURABILIDADE DO DISCO E PASTILHA DE FREIO

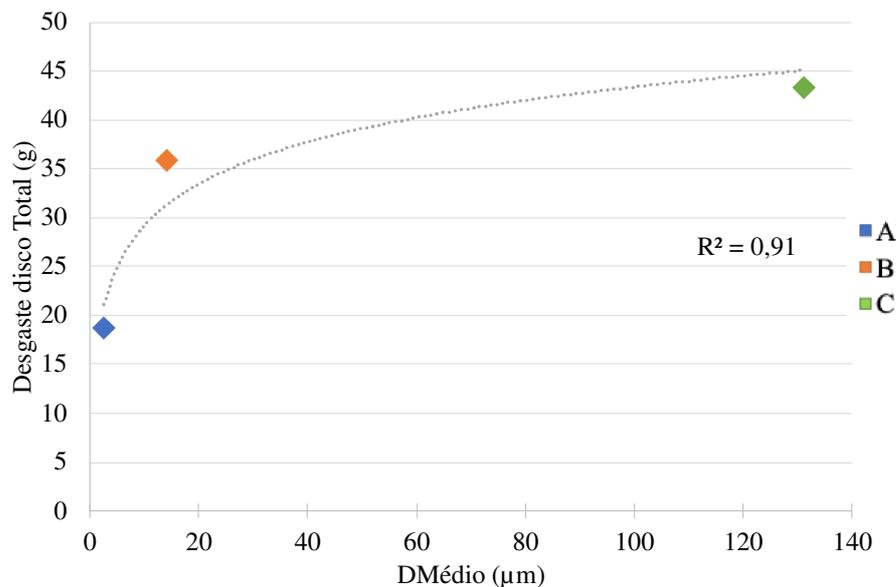
Os abrasivos, apesar da baixa quantidade utilizada, possuem por sua natureza de dureza mais elevada, alta influência no desgaste do disco e da pastilha de freio. Os resultados de desgaste de disco e pastilha serão analisados por perda de massa, devido a massa específica dos materiais serem semelhantes.

#### 5.3.1. DESGASTE DE DISCO

Os discos de freio, também chamados de rotores, são itens que com o tempo devem ser trocados. Porém devido ao seu alto custo, os fabricantes de pastilhas de freio também devem avaliar o seu desgaste. Por se tratar de um par tribológico, disco e pastilha, é inevitável a análise conjunta desses resultados. O desgaste do disco é necessário, para que ocorra a limpeza dos

filmes formados na sua superfície, tal filme caso não seja retirado pode afetar a performance do freio. Porém, um desgaste elevado irá gerar algumas falhas no disco, como sulcos, ondulações e riscos, além da necessidade de troca do disco em um curto período de tempo.

Verifica-se nos resultados de ensaio de desgaste em sistema de freio, um desgaste de disco total crescente ao aumentar o tamanho de partículas. O desgaste aumenta significativamente, cerca de 92% do SiC A para o SiC B, sendo as partículas de SiC A de tamanho médio 6 vezes menor que o tamanho médio das partículas de SiC B. Entretanto, o desgaste aumenta 21% ao comparar o resultado do uso de SiC B com o resultado com o uso de SiC C, sendo as partículas de B cerca de 9 vezes menores que C. Tal fenômeno indica uma estabilização do desgaste ao aumentar o tamanho de partícula médio. Em razão disso, foi utilizado uma regressão não-linear do tipo logarítmica, apresentada na Figura 33, para descrever o comportamento experimental.



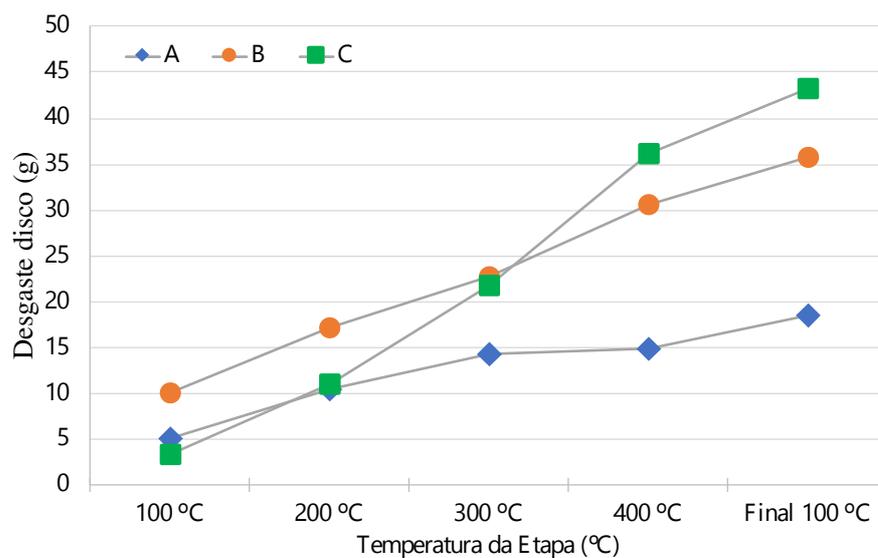
**Figura 33 Variação do desgaste de disco total em função do diâmetro médio da partícula.**

Ao analisar a bibliografia, o comportamento com o aumento do tamanho médio de partículas é um aumento significativo da taxa de desgaste, porém ao continuar aumentando, a tendência é que o desgaste se estabilize, o que ratifica o comportamento observado no ensaio de desgaste. Várias explicações são dadas na bibliografia para o aumento do desgaste com o aumento do tamanho de partícula, entende-se que não é uma razão específica, mas um conjunto de fatores que levam ao aumento do desgaste. Entretanto, a única teoria que é atribuída aos dois tipos de desgaste (dois corpos e três corpos), diz respeito ao aumento da dureza da superfície por deformação plástica em uma camada de aproximadamente 10 μm. Com isso, as partículas

menores só desgastam essa camada, devido a sua baixa penetração. Todavia, as partículas maiores possuem maior penetração e desgastam tanto a camada mais dura como a camada mais macia que está por baixo. Tal fenômeno também explica o motivo da taxa de desgaste estabilizar após 100 µm aproximadamente, visto que a profundidade de penetração já ultrapassou a espessura da camada deformada plasticamente.

A Figura 34 apresenta o desgaste acumulado ao aumentar a temperatura de ensaio em cada ciclo. Observa-se que existe um aumento do desgaste de disco com o aumento da temperatura. É possível deduzir que esse comportamento é devido à redução da dureza do ferro fundido que compõe o disco com o aumento da temperatura (BLAU, 2008). Verifica-se também que o SiC C possui um desgaste baixo, semelhante ao SiC A, nas primeiras etapas com temperaturas de 100 °C e 200 °C. Entretanto, o seu desgaste dispara ao passar por temperaturas mais altas como 300 °C e 400 °C. Enquanto a taxa de desgaste dos materiais contendo os carbeto A e B se mantêm constante com o aumento da temperatura, por certas vezes até diminui a taxa de desgaste, o material contendo SiC C aumenta o seu desgaste significativamente, saindo de 3 g na etapa de menor temperatura para quase 15 g na etapa de 400 °C.

Visto que a dureza do ferro diminui com o aumento da temperatura, deduz-se que o material contendo carbeto de silício de maior tamanho possuirá uma profundidade de penetração ainda maior que os materiais contendo SiC A e SiC B. Assim sendo, fica ainda mais evidente a influência do tamanho de partícula do abrasivo no comportamento de desgaste do disco de freio.



**Figura 34** Variação do desgaste de disco em função da temperatura por etapa do ensaio.

### 5.3.1.1. RUGOSIDADE

A Figura 35 apresenta os resultados de rugosidade do disco de freio antes e após o ensaio de desgaste. Pelos resultados obtidos, observa-se atuação do abrasivo similar ao desgaste. O material com SiC C apresentou valor de  $Ra$  maior em relação aos materiais contendo os demais carbeto, sendo o menor valor o material contendo SiC A, seguido pelos materiais contendo SiC B e SiC C. Tal resultado quantifica os sulcos feitos na superfície do disco, deixando evidente que ao aumentar o tamanho do abrasivo, aumenta-se também os riscos gerados na superfície de contato.

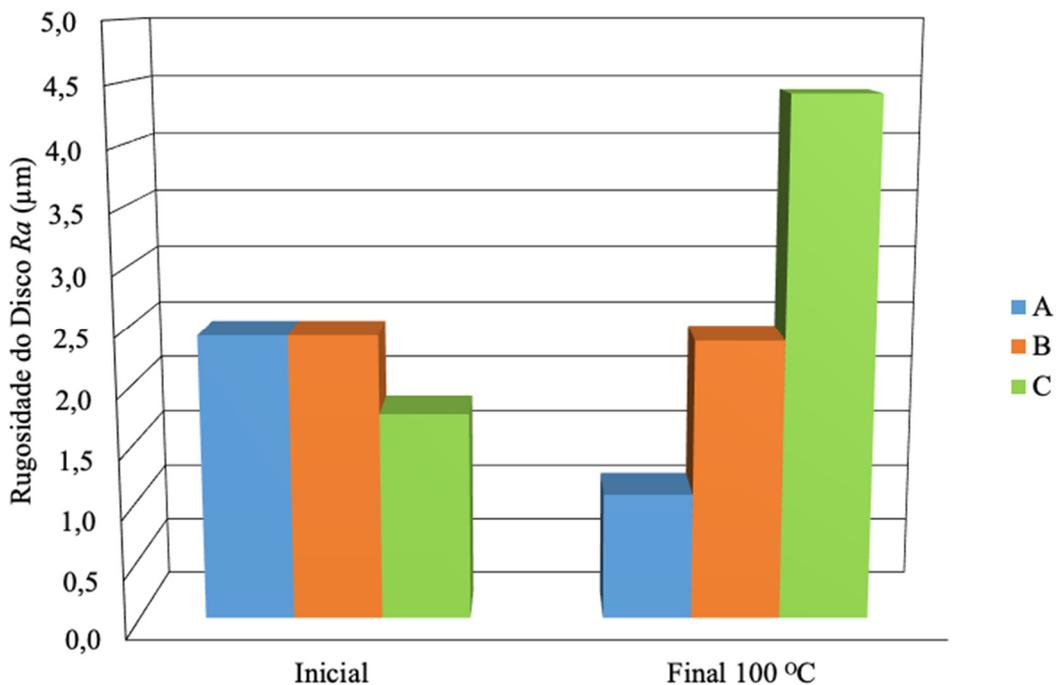


Figura 35 Variação da rugosidade do disco no ensaio de desgaste.

### 5.3.2. MECANISMO DE DESGASTE

Entende-se que o aumento do desgaste e da rugosidade do disco proporcional ao aumento do tamanho médio da partícula de SiC utilizado no material de atrito também é influenciado por quão presa essa partícula está à matriz da pastilha de freio. De acordo com Eriksson; Bergman; Jacobson (2002), o contato entre a pastilha e o disco de freio fica restrito as áreas de platôs que se formam na superfície da pastilha e estão distribuídos por toda ela. Sendo assim, a área de contato real é somente uma fração da área total da pastilha. Os mesmos autores sugerem que existem platôs primários e secundários, onde a fibra metálica forma o platô

primário, por estar mais presa à matriz, e os detritos (*debris*) do desgaste compactados formam os platôs secundários no entorno da fibra com o movimento rotativo do disco.

Cho *et al.* (2008) supõem que as partículas abrasivas com maior diâmetro servem como âncoras para os *debris* de desgaste dos outros componentes da pastilha, semelhante à teoria dos platôs formados pelas fibras metálicas. Nesse caso, a partícula de carbeto de silício com maior tamanho exercerá a função da fibra e permanecerá no platô primário, já as partículas dos demais carbetos de silício ficarão no platô secundário ou fora da área de contato. Com isso, o material com esse tipo de partícula irá desgastar o disco mais severamente, além de gerar o desgaste com mecanismo de dois corpos, visto que a partícula estará ancorada na matriz e não rolando na superfície ou fora da área de contato.

#### A

Figura 36 apresenta o diagrama adaptado de Eriksson; Bergman; Jacobson (2002) para exemplificar o que acontece quando se altera os tamanhos das partículas de carbetos. Já a Figura 37 apresenta a imagem por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies das pastilhas contendo SiC A (menor tamanho de partícula) e contendo SiC C (maior tamanho de partícula) após ensaio de desgaste.

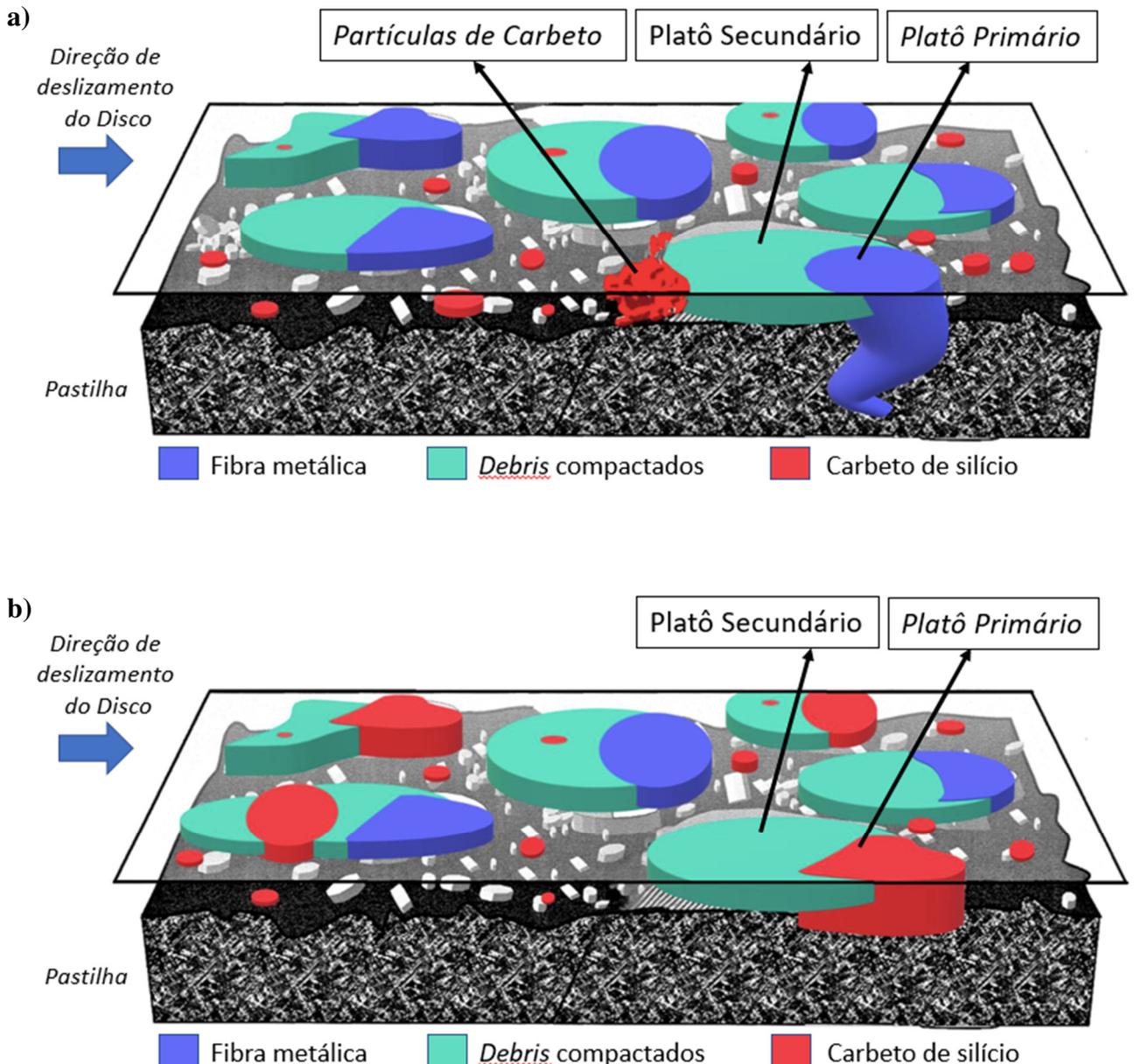
#### Na

Figura 36 a), as fibras metálicas em azul formam o platô primário, visto que estão ancoradas na matriz, o material em verde é o platô secundário formado por *debris* compactados. Já as pequenas partículas de carbeto de silício que estão em vermelho encontram-se nos platôs secundários e em sua grande maioria na base dos platôs, dispersas sobre a matriz e fora da área de contato. Supõem-se que está acontecendo um desgaste a três corpos, onde as partículas pequenas de carbeto que entram em contato com o disco logo são soltas da matriz e rolam para fora da área de contato. Na Figura 37 a), observa-se o comportamento esperado na superfície da pastilha, onde as partículas de silício em vermelho estão em sua grande maioria fora da superfície dos platôs.

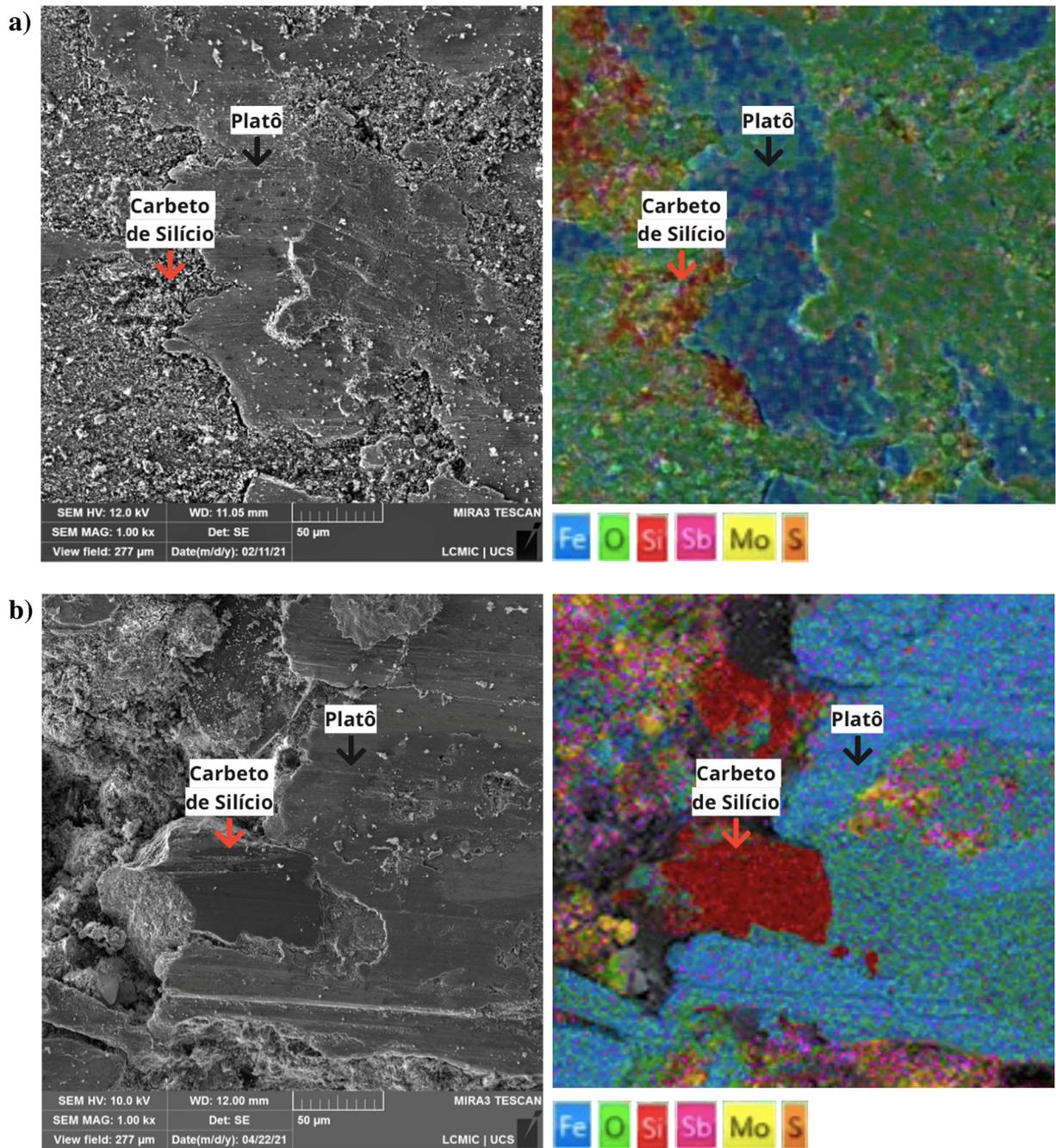
#### Entretanto, na

Figura 36 b), o diagrama apresenta a teoria de que as partículas de carbeto de silício mais grosseiras em vermelho também irão fazer o papel das âncoras, bem como as fibras metálicas. Supõe-se que partículas abrasivas estejam inseridas nos platôs e conseqüentemente irão realizar o mecanismo de desgaste a dois corpos, onde partículas de carbeto de silício ficam aderidas na matriz e realizam o riscamento do disco.

Na Figura 37 b), é possível visualizar as partículas grossas de carbeto de silício em um patamar mais elevado, na altura do platô, o que mostra que essa partícula está na área de contato, bem como as fibras metálicas e os *debris* de desgaste compactados, formados em sua grande maioria por óxido de ferro. No anexo 8.2, encontram-se os espectros do MEV separados em diferentes imagens para auxiliar no entendimento. No anexo 8.3, foram inseridas outras imagens por MEV da superfície das pastilhas que também exemplificam o fenômeno.



**Figura 36** Diagrama adaptado de Eriksson; Bergman; Jacobson (2002) para formação de platôs.  
a) Material contendo carbeto de silício com partículas finas b) material contendo carbeto de silício com partículas grossas.

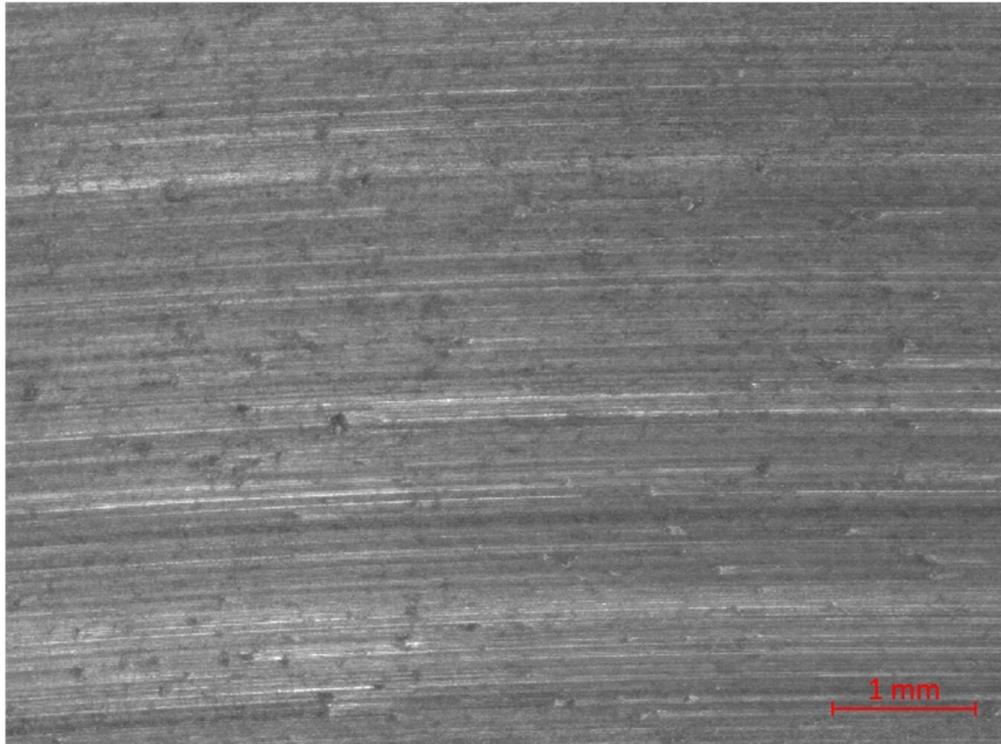


**Figura 37** Superfície da pastilha após ensaio de desgaste. Imagens por MEV com elétrons secundários (direita) e imagens por EDS (esquerda). a) Pastilha com SiC A, b) Pastilha com SiC C.

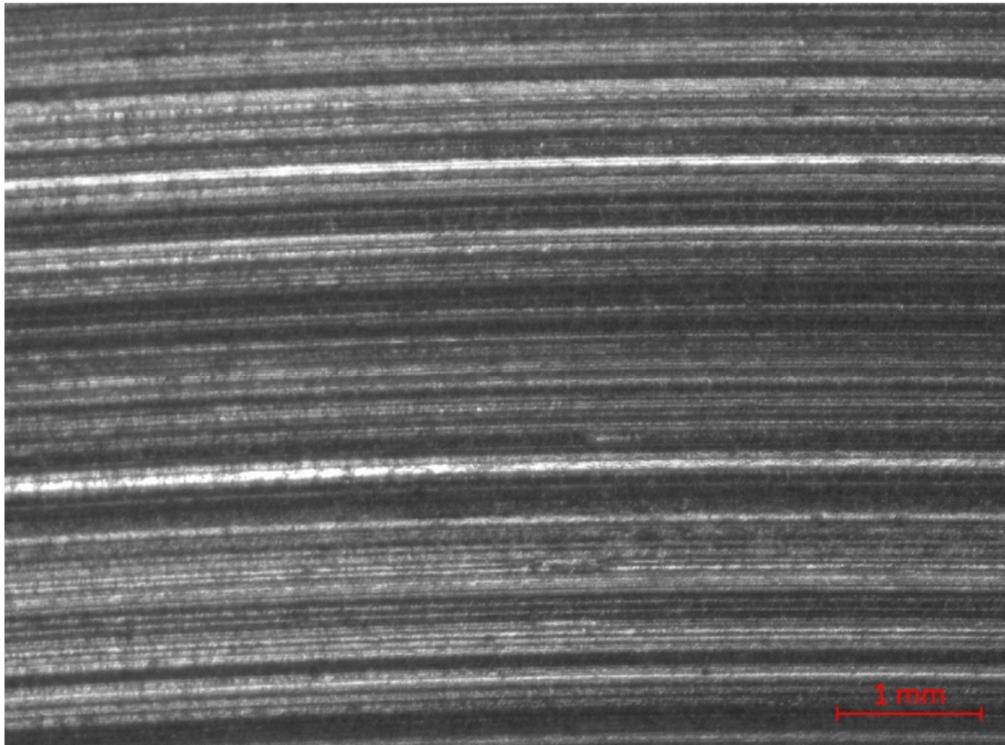
Outro resultado que contribui para o mecanismo de formação e platôs proposto são as imagens por lupa dos discos após os testes de desgaste, além do resultado de sua rugosidade, conforme 8. A Figura 38 a) apresenta. As imagens das superfícies dos discos mostram que o disco que esteve em contato com as pastilhas de freio contendo o SiC A (Figura 38 a), de granulometria mais fina, possui aspecto polido, com poucos riscos e vincos na superfície. Já o

disco que esteve em contato com as pastilhas de freio, contendo SiC C, de maior tamanho de partícula, contém riscos profundos em toda a sua superfície, indicando um atrito de dois corpos, conforme Figura 38 b).

a)



b)

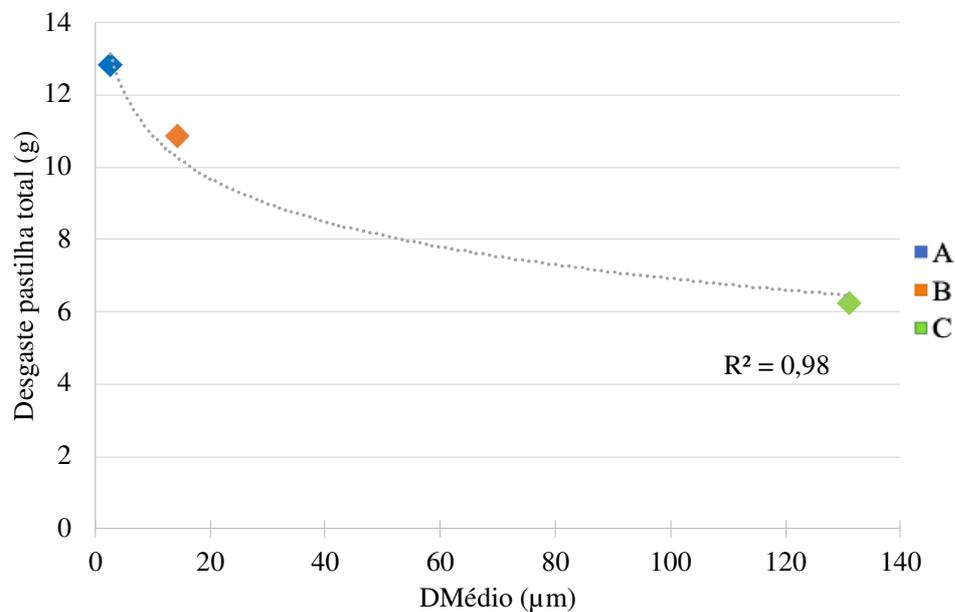


**Figura 38** Imagens em lupa com magnificação de 8x em lupa dos discos após ensaio de desgaste, sendo a) material A e b) material C.

### 5.3.3. DESGASTE DAS PASTILHAS

A Figura 39 apresenta a a variação do desgaste de pastilha total em função do tamanho médio das partículas de SiC utilizadas no material de atrito. É possível perceber uma correlação também logarítmica do desgaste da pastilha em peso com o tamanho de partícula. Os resultados de desgaste total em perda de peso indicam uma redução do desgaste de pastilha com o aumento do tamanho médio das partículas de SiC.

O material de atrito que possui maior desgaste é o material contendo SiC A de menor tamanho médio de partícula. Seguido pelo material de atrito contendo SiC B, com desgaste cerca de 15% menor e com tamanho de partícula intermediário, cerca de 5 vezes maior que o SiC A. Já o desgaste das pastilhas do material de atrito contendo SiC B para o material de atrito contendo SiC C caiu significativamente, cerca de 43%, visto que o tamanho médio de partícula de SiC C é 9 vezes maior que o tamanho médio das partículas de SiC B. Com isso, para o desgaste das pastilhas não é possível observar uma estabilidade de desgaste com os tamanhos de partículas intermediários estudados, apenas uma indicação pelo comportamento da curva de tendência.



**Figura 39** Variação do desgaste de pastilha total em função do diâmetro médio das partículas.

Uma hipótese estudada para justificar o fenômeno de diminuição do desgaste de pastilha foi que o aumento do tamanho de partícula estivesse vinculado ao parâmetro de pressão necessária para frenagem (RODRIGUES GOMES; FARIAS SOARES; PÉREZ BERGMANN, 2020). O ensaio de desgaste é montado de forma a estabelecer uma desaceleração constante de

2 m/s<sup>2</sup>, estando o veículo em uma velocidade inicial constante de 60 km/h e uma temperatura que será constante em cada ciclo. Porém, para atingir essa condição, a pressão necessária para exercer a frenagem até a parada total é variável e independe do ensaio.

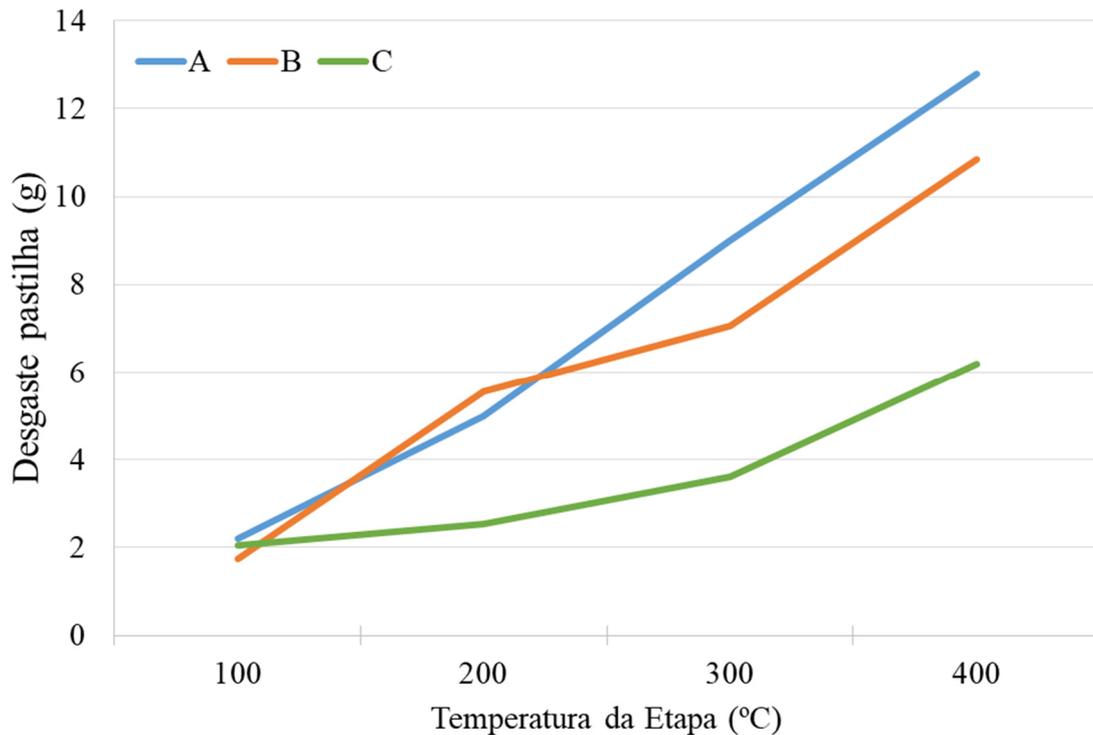
A Tabela 7 apresenta a pressão média aplicada para todo o ensaio e uma média da pressão aplicada nas 500 frenagens em cada um dos ciclos de temperatura.

**Tabela 7. Média da pressão aplicada por etapa de ensaio (bar).**

Temperatura	A	B	C
100 °C	22	20	18
200 °C	20	24	21
300 °C	24	25	22
400 °C	31	25	25
Pressão Média	24	21	24

Observou-se variação das pressões ao longo do ensaio, principalmente ao alterar a temperatura dos ciclos. Porém, não existe uma correlação direta das pressões de operação com o tamanho de partícula dos abrasivos em estudo.

A Figura 40 apresenta a variação do desgaste da pastilha de freio em função da temperatura por etapa do ensaio de desgaste. Observa-se proximidade dos resultados de desgaste de pastilha de freio dos materiais contendo os carbeto de silício A e B ainda mais evidente. Isso porque as curvas dos materiais contendo SiC A e contendo SiC B possuem resultados semelhantes ao longo do ensaio, se distanciando um pouco nas últimas etapas de desgaste a 300 °C e a 400 °C. Verifica-se que o material de atrito contendo SiC A possui a maior taxa de desgaste ao aumentar a temperatura, seguido pelo material de atrito contendo SiC B, que inclusive altera a sua taxa ao longo do ensaio. Por fim, o material de atrito com a menor taxa de aumento de desgaste de pastilha com temperatura é o que utiliza SiC C, com maior tamanho médio de partícula.



**Figura 40** Variação do desgaste da pastilha em função da temperatura por etapa do ensaio.

#### 5.4. PERFORMANCE

##### 5.4.1. ATRITO

A Figura 41 apresenta o atrito médio de cada uma das etapas do ensaio Ak-Master de avaliação de performance. É possível observar uma variação significativa dos atritos médios até a etapa de número 10 do material de atrito contendo SiC A em relação aos materiais de atrito contendo SiC B e contendo SiC C. Isso se deve supostamente ao menor tamanho médio de partículas do SiC A. Também é possível correlacionar esse comportamento com a apresentação das partículas dos abrasivos na superfície de contato das pastilhas com o disco, conforme comentado em 5.3.2. Propõe-se que partículas menores estejam presentes em sua maioria nos vales, já as partículas maiores como os materiais de atrito contendo SiC B e contendo SiC C estão presentes nos platôs de contato com o disco. Entende-se que devido à alta dureza dessas partículas, adiminuição das partículas presentes no contato influencia diretamente no atrito do material de atrito.

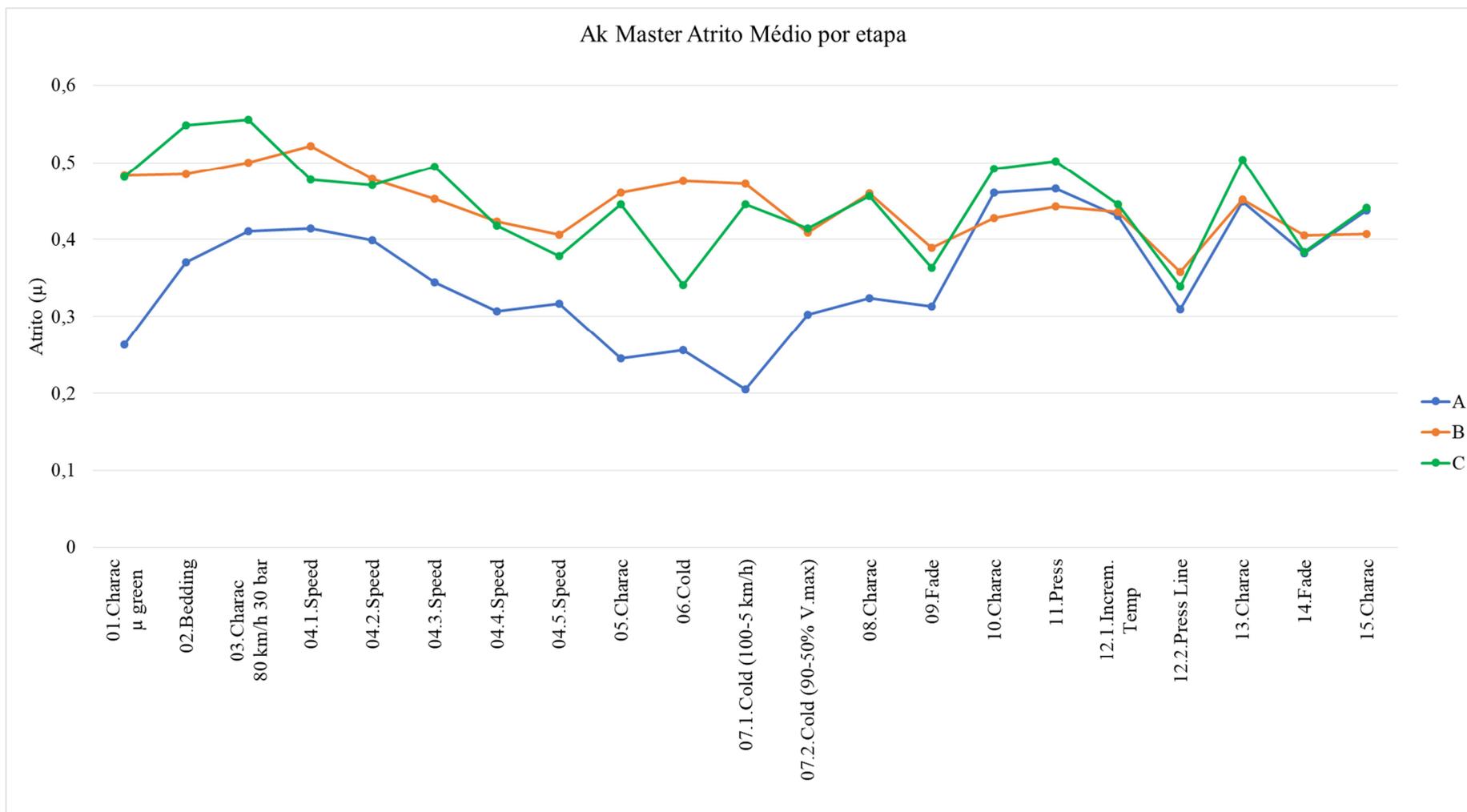
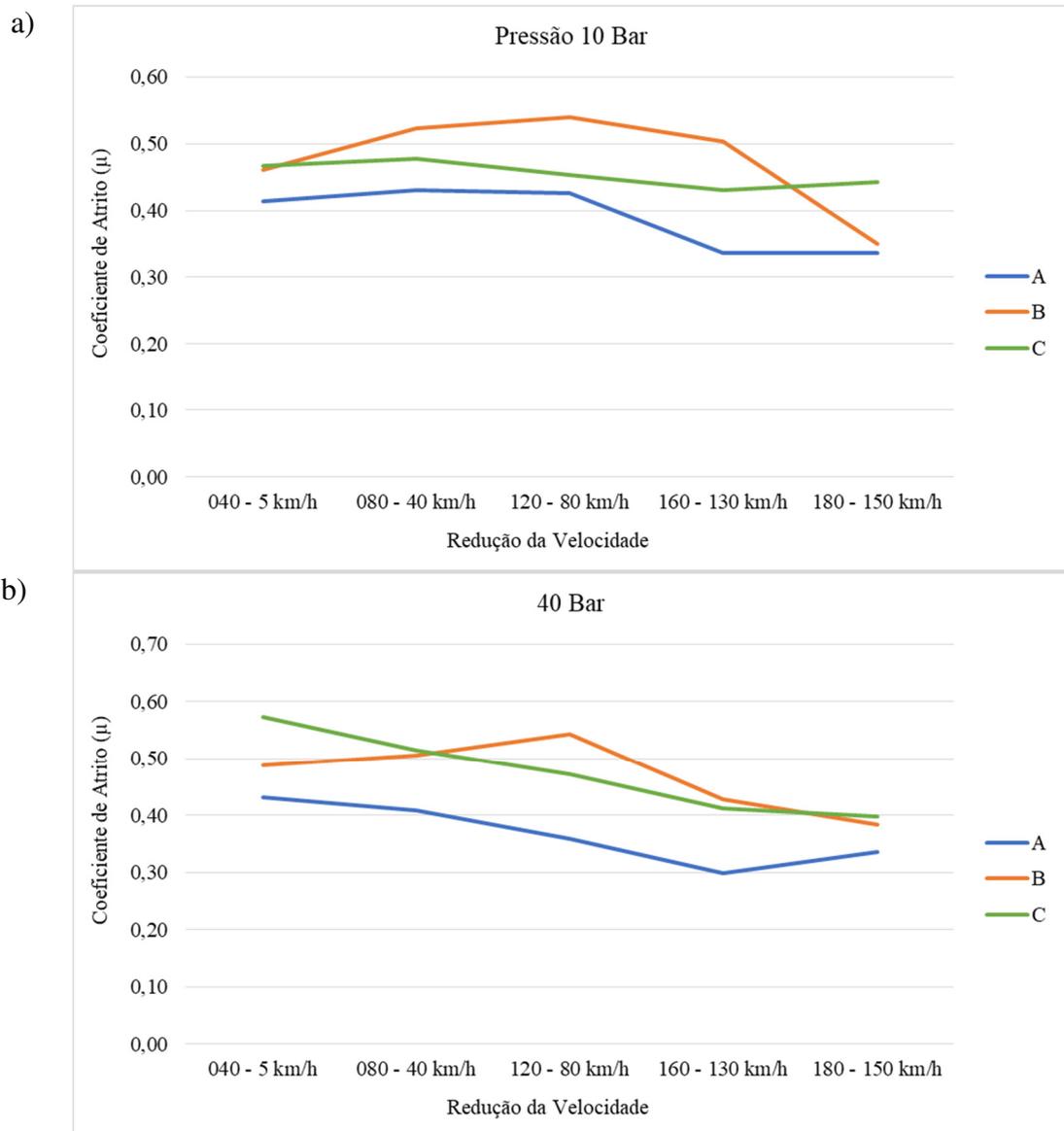
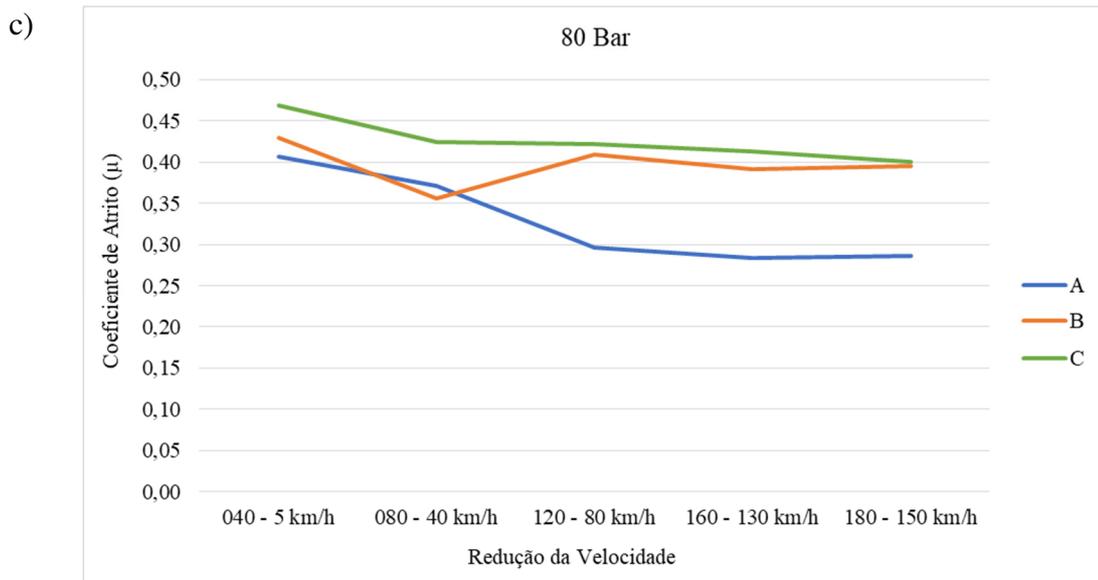


Figura 41. Atrito médio das etapas do ensaio Ak-Master dos materiais de atrito contendo cada um dos SiC A, SiC B e SiC C.

A variação do coeficiente de atrito com a velocidade de frenagem e pressão aplicada são parâmetros avaliados. Os gráficos da Figura 42 a) b) e c) sugerem novamente que o material de atrito contendo SiC A de menor tamanho médio de partícula apresenta coeficiente de atrito menor do que os demais materiais de atrito, contendo SiC B e contendo SiC C, independente da pressão ou velocidade aplicada.

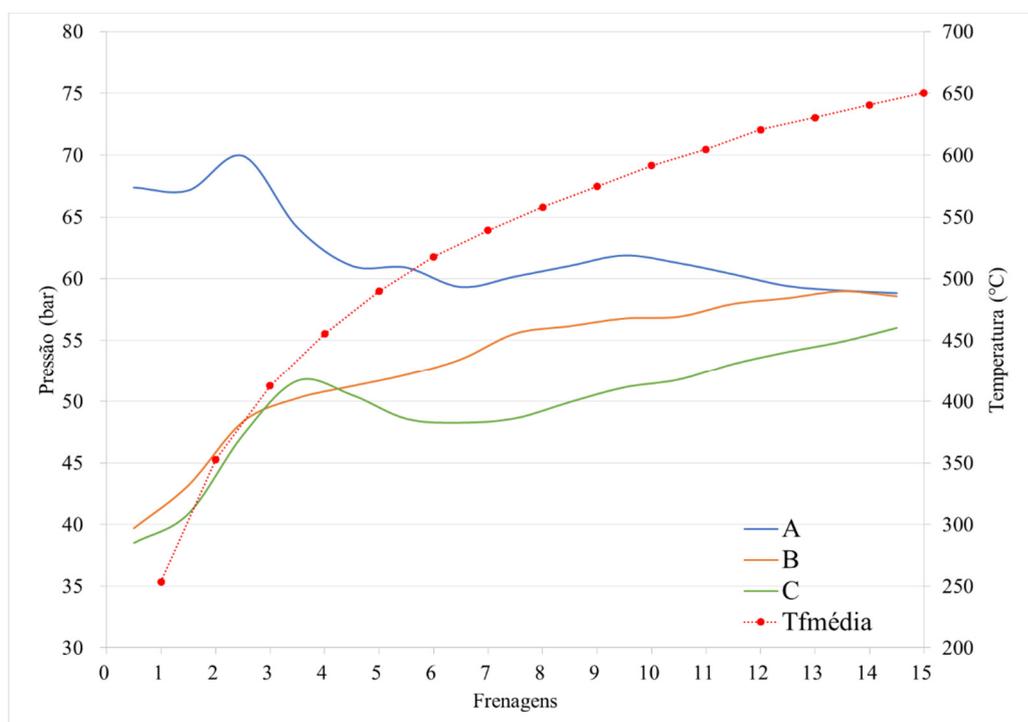




**Figura 42. Variação do coeficiente de atrito com a influência da velocidade em diferentes pressões a) 10 bar, b) 40 bar e c) 80 bar.**

Uma das etapas presente nos diversos métodos de avaliação de performance de materiais de atrito é o *fade*. A etapa de *fade* avalia a influência da temperatura no resultado, visto que a temperatura influencia na formação e remoção do filme formado na superfície da pastilha e do disco. Tal etapa realiza 15 frenagens com velocidade inicial de 100 km/h e final de 5 km/h, a velocidade é variável, dependendo somente do material, para manter uma desaceleração constante de  $0,4\text{m/s}^2$ . Esses parâmetros extremos fazem com que a temperatura da frenagem aumente, chegando em  $500\text{ }^\circ\text{C}$ .

Ao analisar a pressão necessária para as pastilhas de freio com os 3 diferentes carbetos de silício, observa-se novamente que o material de atrito contendo SiC A (com menor tamanho médio de partícula) possui comportamento distinto dos demais materiais de atrito, contendo SiC B e contendo SiC C (este com o maior tamanho médio de partícula dos carbetos de silício investigados). Entende-se que tal comportamento está relacionado ao mecanismo de formação de platôs na superfície das pastilhas, comentado anteriormente. Devido à presença das partículas menores, o material de atrito contendo SiC A não está tão presente e encrustado nas áreas de contato, necessitando de uma maior pressão para realizar a frenagem com a mesma desaceleração (vide Figura 43).



**Figura 43 Pressão necessária para frenagem na etapa de *fade* com desaceleração constante.**

#### 5.4.2. ESTABILIDADE DO COEFICIENTE DE ATRITO

Estabilidade do coeficiente de atrito é um dos fatores mais importantes para a utilização com confiança de freios de veículos de passeio, isso porque o motorista pretende utilizar um nível de força de frenagem semelhante mesmo depois de passar por situações extremas de velocidade, temperatura e pressão.

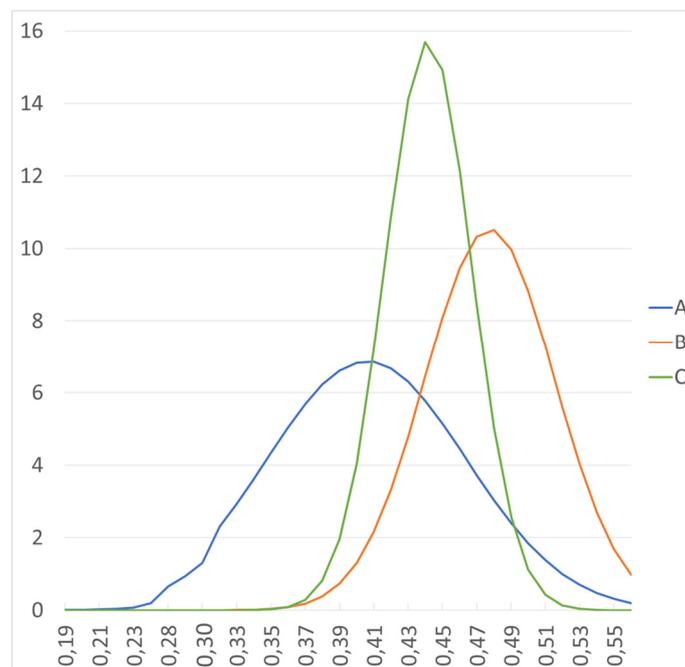
Avaliou-se a estabilidade do coeficiente de atrito analisando os resultados das diferentes etapas de caracterizações ao longo do ensaio. As caracterizações são etapas onde é realizada uma frenagem de 80 km/h para 30 km/h, com uma pressão de 30 bar e temperatura inicial do disco de 100 °C. São realizadas um total de seis caracterizações ao longo do método de ensaio AK-Master de avaliação de performance, sendo que nas primeiras duas caracterizações, são realizadas 6 frenagens e nas últimas quatro etapas, são realizadas 18 frenagens. A primeira etapa de caracterização é após a realização do assentamento, para avaliar a condição inicial do coeficiente de atrito com o freio ainda novo. A segunda é realizada logo após as etapas de maior velocidade, com o objetivo de analisar o comportamento de frenagem após ser exposto a frenagens de 180 km/h para 150 km/h. A terceira é realizada após frenagens que caracterizam uma rodovia, onde o veículo sai de uma velocidade inicial de 100 km/h até uma frenagem quase total de 5 km/h. Essa etapa também caracteriza o material logo antes de ser exposto a etapa de *fade*. A quarta caracterização é realizada logo após o *fade*, no qual *fade* são realizadas 15

frenagens com o aumento gradual da temperatura de 100 °C até 550 °C, redução da velocidade de 100 km/h para 5 km/h com uma desaceleração constante de 0,4 m/s. A quinta caracterização ocorre após a etapa de temperatura e logo antes do segundo *fade*, realizado no ensaio Ak-Master. A última caracterização e também última etapa do método, acontece após o *fade* e identifica o comportamento do coeficiente de atrito após todas as condições distintas do ensaio.

A Figura 44 mostra a curva de distribuição de probabilidade de cada um dos materiais de atrito investigados. Observa-se que o material de atrito contendo SiC A possui o menor coeficiente de atrito e a maior variação de resultados (maior desvio padrão encontrado entre os três materiais de atrito). Já o material de atrito contendo SiC B possui o maior coeficiente de atrito, porém com uma variação de resultados intermediária se comparado com os outros 2 materiais de atrito investigados. Por fim, o material contendo SiC C (maior granulometria) possui um coeficiente de atrito intermediário aos materiais de atrito contendo SiC A e contendo SiC B. Contudo, apresentou um menor desvio padrão e com isso a maior estabilidade do coeficiente de atrito das etapas de caracterização ao longo do ensaio de acordo (Tabela 8). Isso indica uma tendência de estabilidade do nível do coeficiente de atrito ao aumentar o tamanho médio de partícula dos abrasivos, mesmo após ser exposto a situações adversas.

**Tabela 8. Coeficiente de atrito médio das etapas de caracterização do ensaio de performance.**

	A	B	C
Média	0,41	0,48	0,44
Desvio Padrão	0,058	0,038	0,025

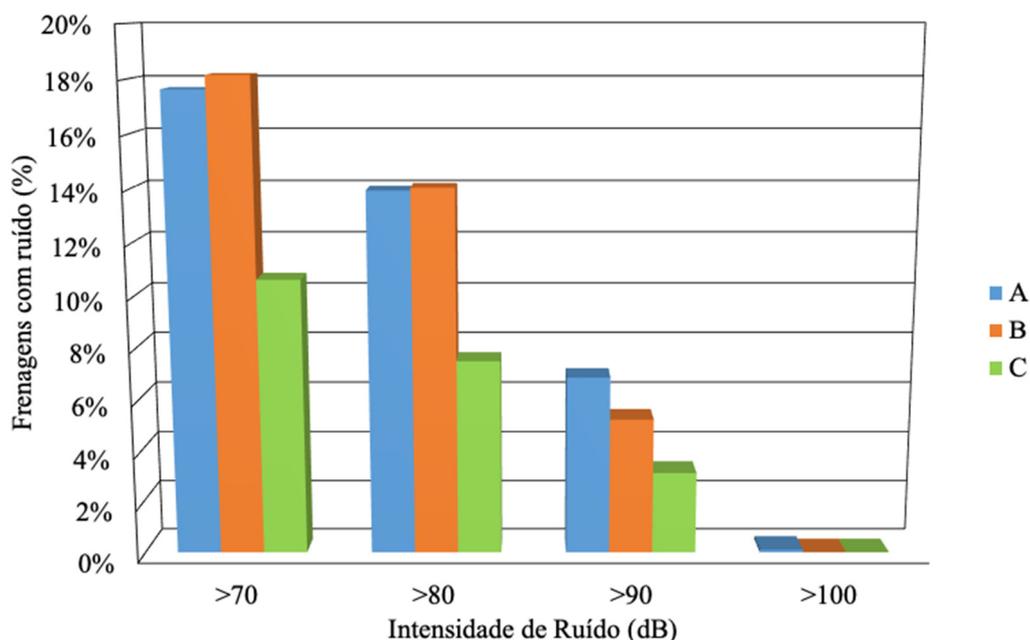


**Figura 44 Distribuição do coeficiente de atrito nas etapas de caracterização do ensaio de performance.**

Segundo Cho *et al.* (2008), comportamento semelhante de estabilização de coeficiente de atrito com o aumento do tamanho médio de partículas foi observado em experimentos com zirconitas. Tal fenômeno é explicado, utilizando a teoria de aumento da área de contato através da formação de platôs na superfície da pastilha, conforme é aplicada pressão. Sendo assim, uma maior área de contato é adquirida com platôs mais firmes, que não se desfazem rapidamente, e com maiores áreas. Contudo, a formação dos platôs primários é atrelada às fibras metálicas que servem como âncoras impedindo que a área se desfaça. Além disso, formam-se platôs secundários localizados logo após os platôs primários, formados por detritos de desgaste que ficam acumulados durante o movimento do disco e da pastilha, na extremidade do platô primário, tratando-se de uma extensão do mesmo. Todavia, também se relaciona esse mesmo comportamento com o aumento do tamanho do abrasivo, sendo que partículas maiores fazem a função das fibras, formando os platôs primários e aumentando a área de contato. Já as partículas menores dos abrasivos encontram-se somente nos platôs secundários. Esse comportamento também faz com que a superfície da pastilha com abrasivo de menor tamanho possua, durante o ensaio, uma superfície menos uniforme.

## 5.5. RÚIDO

A Figura 45 apresenta a variação da quantidade de frenagens com ruído em função da intensidade do ruído, na forma de percentual de frenagens com ruído superiores a 70 dB, observadas em função da sua intensidade de ruído em decibéis. Observa-se que os materiais de atrito contendo SiC A e contendo SiC B (tamanho médio de partícula fino e intermediário respectivamente) apresentam quantidade de frenagens com ruído semelhantes, com a distribuição em função da intensidade de forma equivalente. Já o material de atrito contendo SiC C, com maior tamanho de partículas, apresenta comportamento distinto, possuindo menor quantidade de frenagens com ruído do que os outros materiais de atrito investigados.



**Figura 45** Variação da quantidade de frenagens com ruído em função da intensidade do ruído.

Sendo assim, considerando as definições normativas é possível afirmar que o material com menor ocorrência de ruído *squeal* é o material de atrito contendo SiC C de granulometria mais grosseira. Já os materiais de atrito contendo SiC A e contendo SiC B possuem níveis de ruído semelhantes, sendo o primeiro com incidência levemente menor. Tal comportamento é visualizado nas diferentes intensidades de ruído.

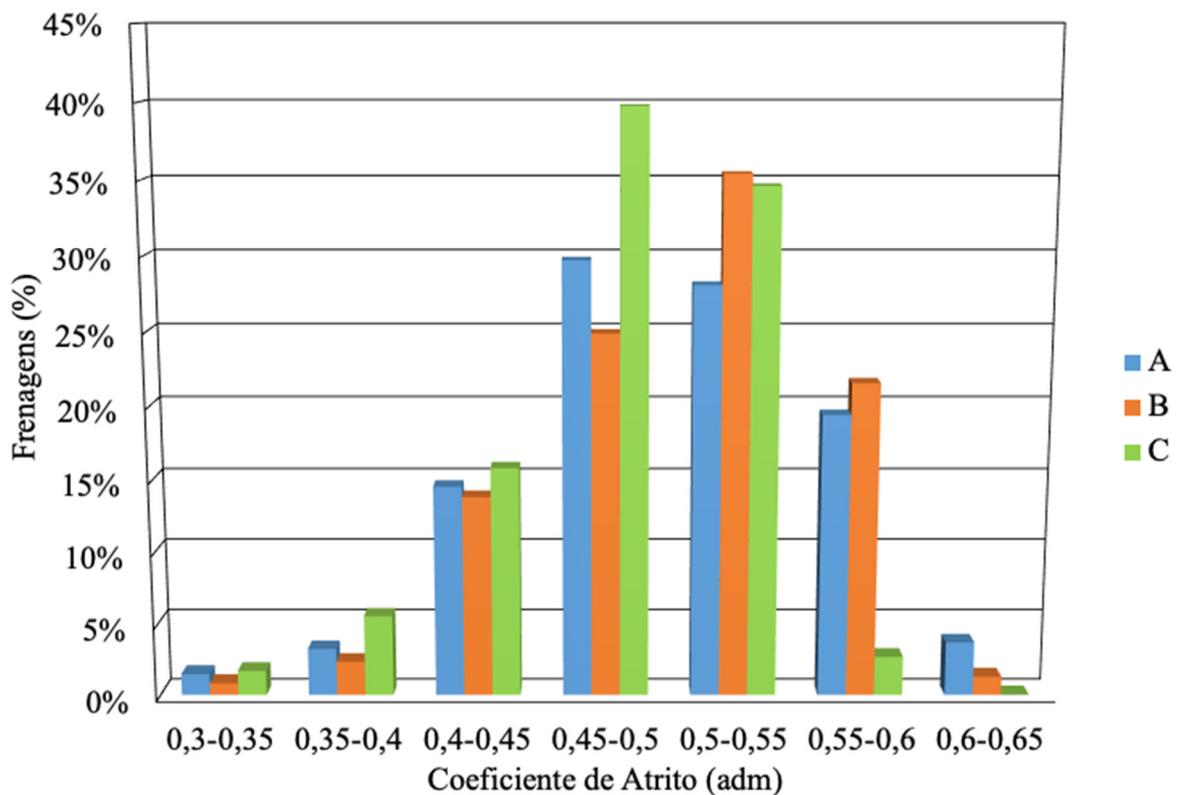
MATOZO (2012) propôs um índice de excitação, o qual é um indicativo da propensão ao ruído. A equação proposta leva em consideração os seguintes parâmetros: concentração do abrasivo, dureza do abrasivo, diâmetro de partícula, dureza do abrasivo zirconita e as compressibilidades das pastilhas de freio.

Sendo assim, para esse trabalho, visto que a concentração foi mantida constante, bem como a dureza dos abrasivos e a compressibilidade, entende-se que o fator de maior influência seja o tamanho das partículas abrasivas.

MATOZO (2012) ainda considera que o aumento do diâmetro das partículas influencia de forma proporcional a ocorrência de ruído, ou seja, quanto maior o tamanho de partícula, maior será o desconforto sonoro. Entretanto, em seu estudo foram considerados apenas tamanhos inferiores a 16  $\mu\text{m}$ . Entende-se que exista uma inversão do comportamento, visto que o tamanho elevado da partícula altera o mecanismo de desgaste observado conforme discutido anteriormente no item 5.3.2.

Além disso, cabe ressaltar que outras variáveis como coeficiente de atrito e distribuição das frenagens ruidosas por pressão também apresentaram diferenças entre o resultado para o material de atrito contendo SiC C e os resultados dos materiais de atrito contendo SiC A e contendo SiC B.

A Figura 46 apresenta a distribuição de todas as frenagens realizadas no ensaio, incluindo as frenagens com e sem ruído, em função do coeficiente de atrito medido para cada material. Observa-se que os materiais de atrito contendo SiC A e contendo SiC B apresentam distribuições semelhantes, tendo aproximadamente 90% das frenagens com coeficiente de atrito entre 0,4 e 0,6. Já o material de atrito contendo SiC C apresentou 90% das frenagens entre 0,4 e 0,55. Tal comportamento indica que este material de atrito apresentou um coeficiente de atrito mais baixo e mais estável, confirmando o resultado indicado no ensaio de performance (item 5.4.1).

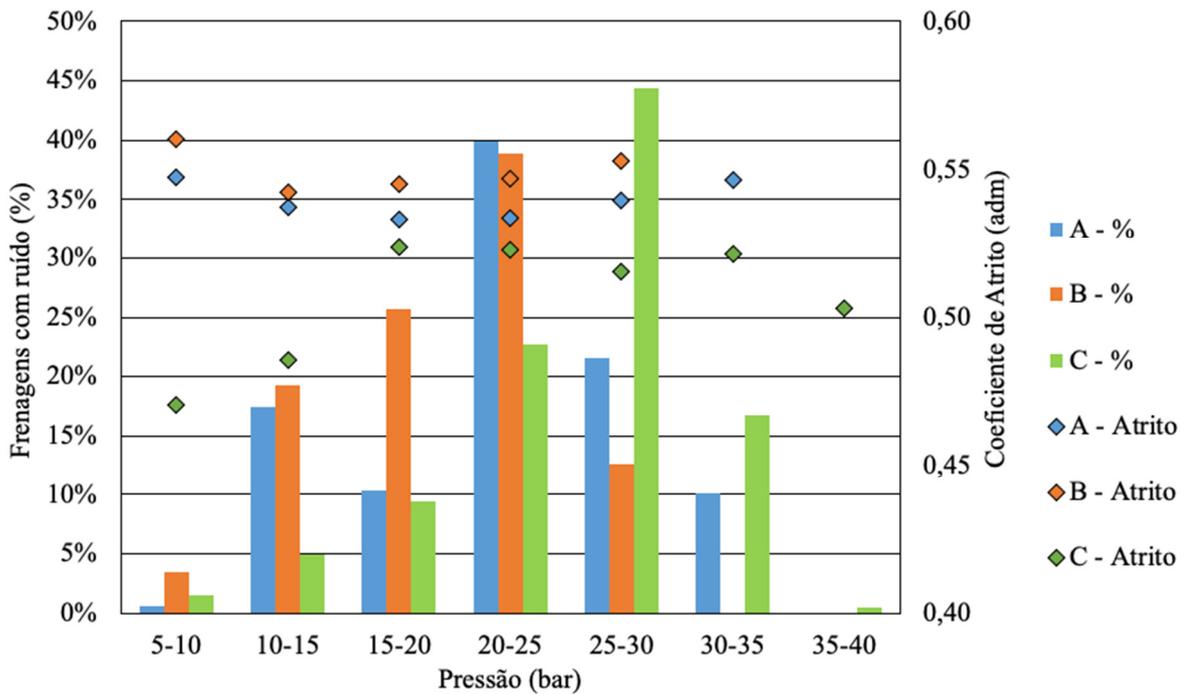


**Figura 46 Distribuição da quantidade total de frenagens do ensaio em função dos coeficientes de atrito.**

A Figura 47 apresenta em forma de colunas a distribuição das frenagens ruidosas em função da pressão aplicada, já os losangos identificam os coeficientes de atrito médios para essas frenagens. É importante salientar que o teste possui pressão definida para todas as etapas,

portanto não existe diferença de pressões utilizadas entre os materiais de atrito, bem como a temperatura inicial e as velocidades iniciais e finais são constantes para todos os testes, tendo como variável apenas a desaceleração devido ao coeficiente de atrito dos materiais envolvidos.

As pastilhas de freio contendo SiC A e contendo SiC B possuem novamente um comportamento semelhante, onde a incidência de ruído aumenta com o aumento da pressão até aproximadamente 25 bar. Porém, ao ultrapassar essa pressão, ela estabiliza e começa a apresentar tendência de queda. Já para o ensaio que utilizou as pastilhas de freio contendo SiC C (mais grosseiro), o aumento em função da pressão inicia mais suave, porém continua aumentando, mesmo ao ultrapassar a pressão de 20 bar, iniciando a tendência de queda apenas em 30 bar. Todos os materiais de atrito investigados não apresentam ruído com pressões superiores à 35 bar. Também na Figura 47 estão sendo exibidos através da forma de losango os coeficientes de atrito médios para as frenagens com ruído distribuídos pelas pressões do ensaio, confirmando que inclusive nessas frenagens, o coeficiente de atrito do material contendo SiC C é ligeiramente mais baixo que o dos demais materiais de atrito.



**Figura 47 Distribuição da quantidade de frenagens com ruído e dos coeficientes de atrito médios em função da pressão aplicada.**

## 6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no trabalho investigativo, é possível inferir as seguintes conclusões:

Quanto às **propriedades físicas e propriedades químicas dos carbetos de silício**: foram realizadas as medições e comparados os efeitos de suas propriedades físicas e químicas na abrasividade dos carbetos de silício investigados. Foi identificado que existe relação entre o tamanho médio de partícula e o resultado de abrasividade, visto que ocorre um aumento da abrasividade proporcional ao aumento do tamanho médio de partícula dos carbetos de silício.

Para as **resistências mecânicas das pastilhas** de freio contendo os diferentes carbetos de silício, foi conferida a correlação logarítmica da dureza Gogan com o tamanho médio das partículas dos SiC investigados. Tal correlação evidencia que ao aumentar o tamanho médio de partícula, a pastilha de freio tende a apresentar característica de maior rigidez.

Com o ensaio de **desgaste de disco**, concluiu-se que ao aumentar o tamanho de partícula do abrasivo, aumenta-se também o desgaste do disco devido à profundidade de penetração da partícula de carbeto de silício. Foi possível também identificar uma alteração do mecanismo de desgaste de três corpos para dois corpos. Também foi possível concluir que o material de atrito com o carbeto de silício com maior tamanho médio de partícula resulta em uma maior rugosidade no disco ao final do ensaio.

Já a **durabilidade de pastilha** evidenciou uma correlação inversa ao tamanho médio de partícula dos carbetos de silício investigados. Relaciona-se esse efeito à necessidade de pressões maiores para materiais de atrito com carbeto de silício com tamanhos de partículas menores devido aos mecanismos de desgaste. Ou seja, a pressão está diretamente relacionada ao desgaste e inversamente relacionada ao tamanho de partícula do SiC empregado.

Não foi observada correlação do **coeficiente de atrito médio** com o aumento do tamanho de partícula do carbeto de silício. Porém, observou-se correlação com a **estabilidade de coeficiente de atrito**, evidenciando que, ao aumentar o tamanho médio de partículas, diminui-se a variação do coeficiente de atrito durante o ensaio.

Houve diminuição do **nível de ruído** para o material de atrito contendo o SiC C, de maior tamanho médio de partícula. Os dois materiais de atrito com carbetos de silício com menores tamanhos médios de partícula apresentaram valores semelhantes. Tal fenômeno também foi relacionado ao mecanismo de formação de platôs nas superfícies sob desgaste.

Ao escolher o melhor carbetto de silício para pastilhas de freio é necessário entender as particularidades e os requisitos de cada projeto. A Fras-le trabalha com diferentes níveis de aplicação, desde o mercado de reposição de pastilhas automotivas, projetos com montadoras como Honda, Jeep, Fiat e Toyota, até aplicações em veículos de corrida sendo o fornecedor da Stock Car.

Para cada aplicação é necessário entender quais os requisitos principais que devem ser ponderados. O carbetto de silício B é indicado para aplicações que possuem altos requisitos de performance e que aceitam uma agressividade intermediária ao disco, tais como aplicações para veículos com maior inércia.

Materiais que não possuem metais ferrosos, classificados como NAO, demandam a diminuição de sujeira na roda. A decorrência do menor desgaste do disco irá diminuir a quantidade desse tipo de sujeira, dessa forma, o carbetto de silício A é o mais indicado, devido ao seu menor desgaste e agressividade ao disco.

Entretanto em aplicações para carros de competição é possível aplicar o carbetto C, pois irá auxiliar em um alto nível de coeficiente de atrito desde o princípio da sua utilização e maior estabilidade no coeficiente de atrito nas diferentes condições do ensaio. Para esse tipo de aplicação o desgaste do disco não é um ponto crucial e a utilização desse carbetto acaba auxiliando na redução do desgaste da pastilha.

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos neste trabalho permitem sugerir os seguintes tópicos para trabalhos futuros, visando compreender melhor os fenômenos estudados:

- Desenvolver melhoria no método de abrasividade, alterar uma etapa da metodologia para reproduzir mais adequadamente uma condição de desgaste real;

- Conduzir uma medição *in-situ* durante os testes de tribologia. Possibilitando observar a diferença de formação de filme, conforme o tamanho médio de partícula do abrasivo;

- Estudar influência da alteração do tamanho de partícula no desempenho das pastilhas de freio com outros abrasivos de menor dureza, com o objetivo de validar se os comportamentos observados nesse trabalho são dependentes da dureza do abrasivo;

- Avaliar a dureza do disco depois da tribologia.

## 8 ANEXOS

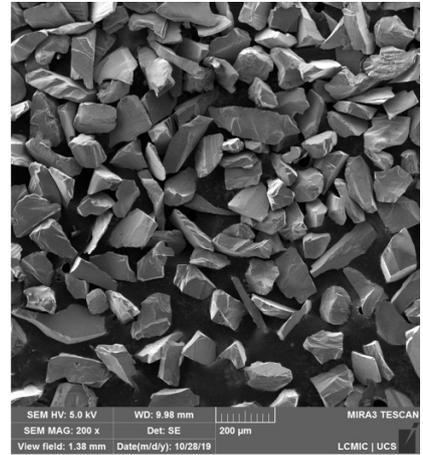
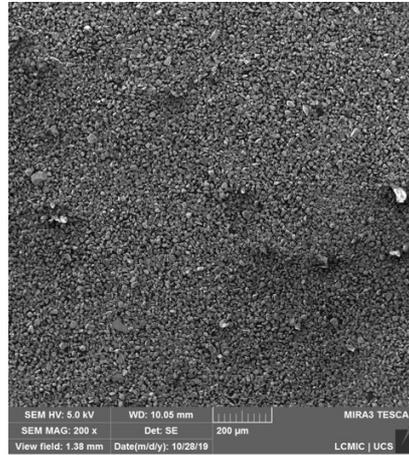
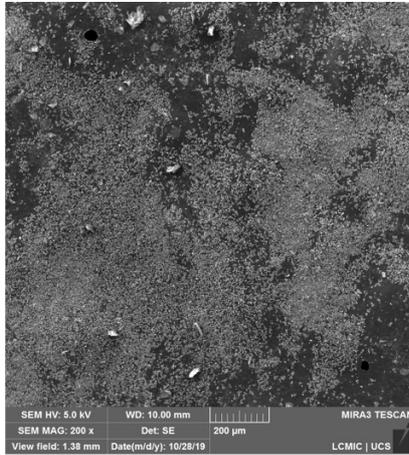
### 8.1. MEV CARBETOS DE SILÍCIO

A

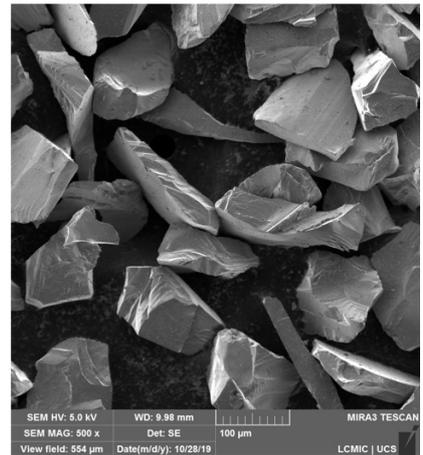
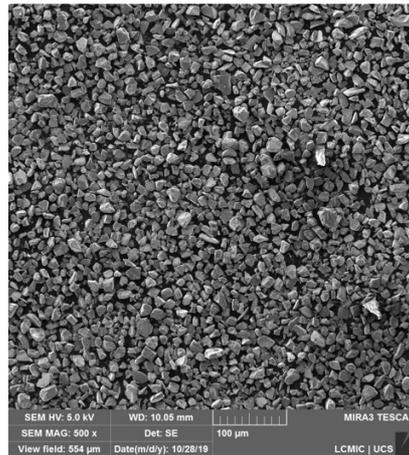
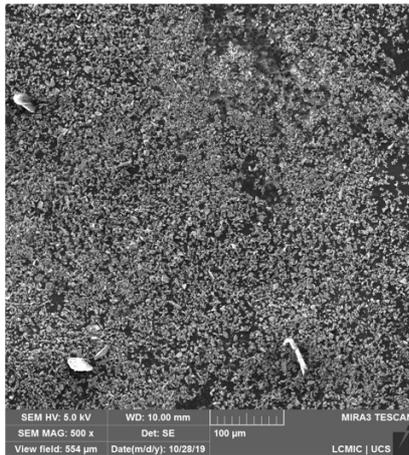
B

C

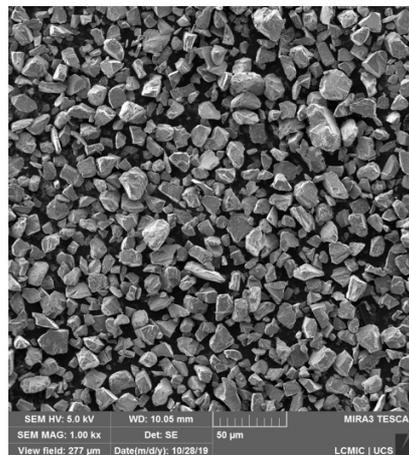
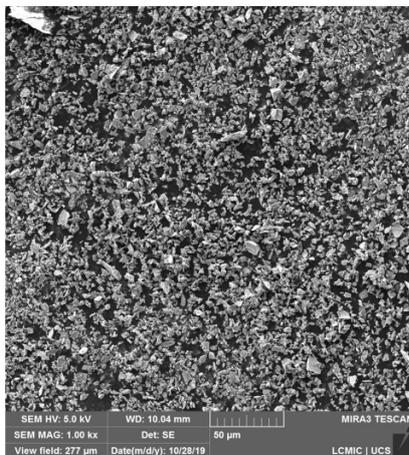
200 vezes de aumento



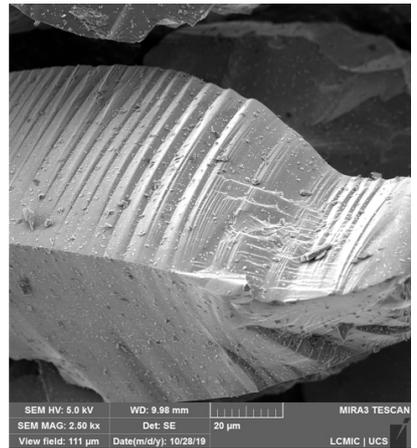
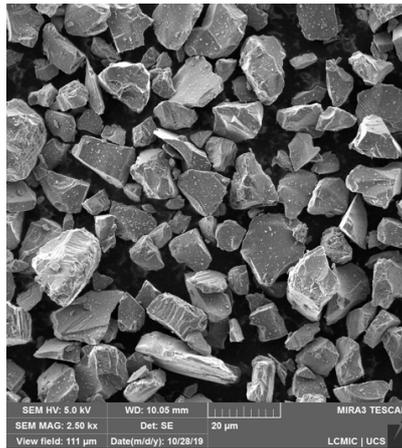
500 vezes de aumento



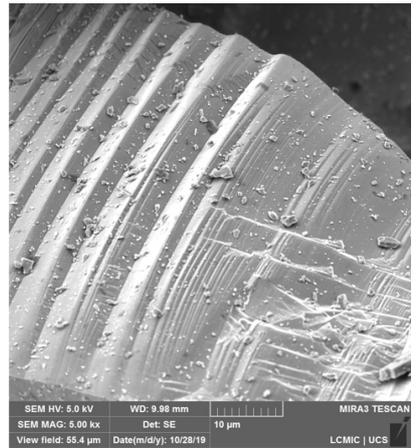
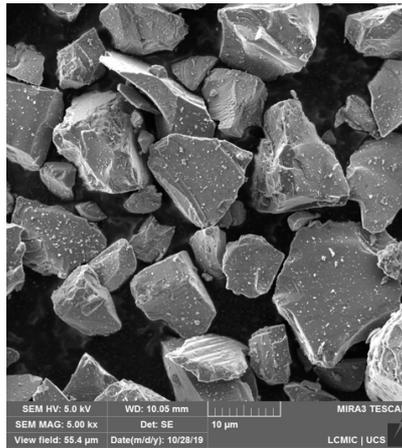
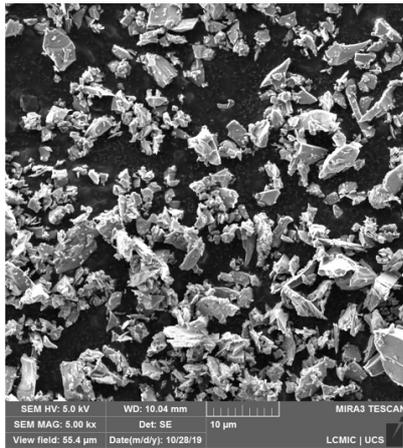
1000 vezes de aumento



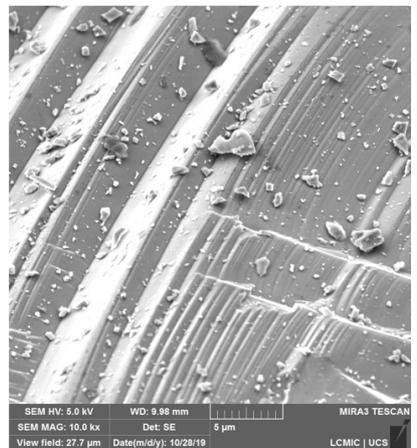
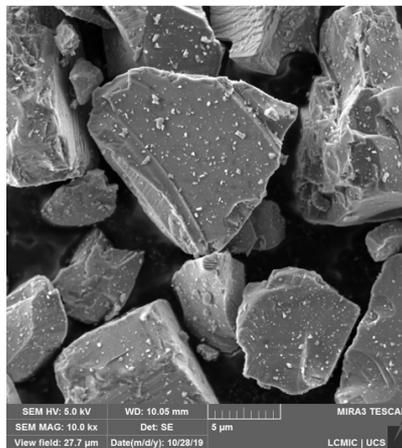
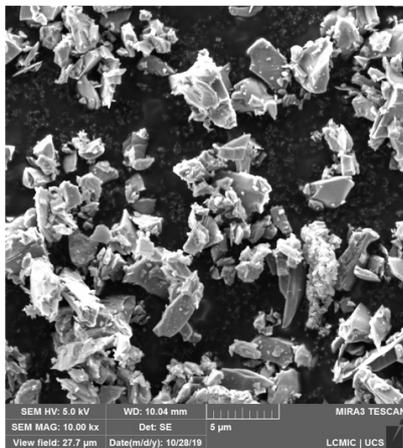
2500 vezes de aumento



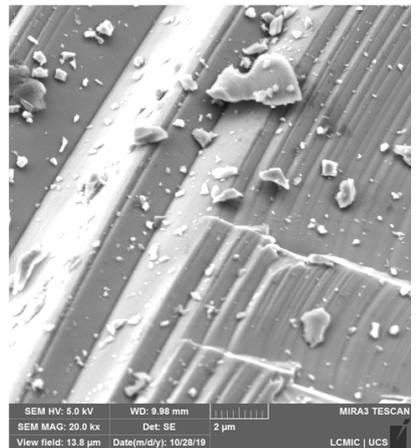
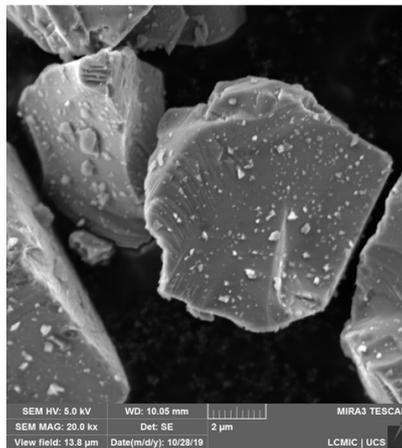
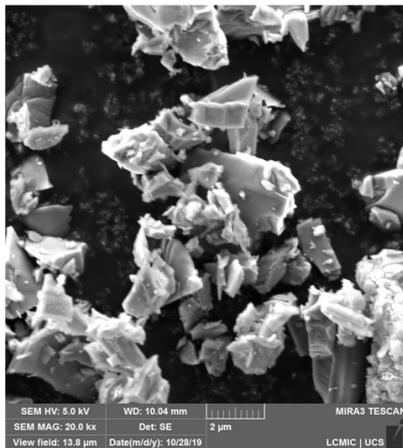
5000 vezes de aumento



10000 vezes de aumento

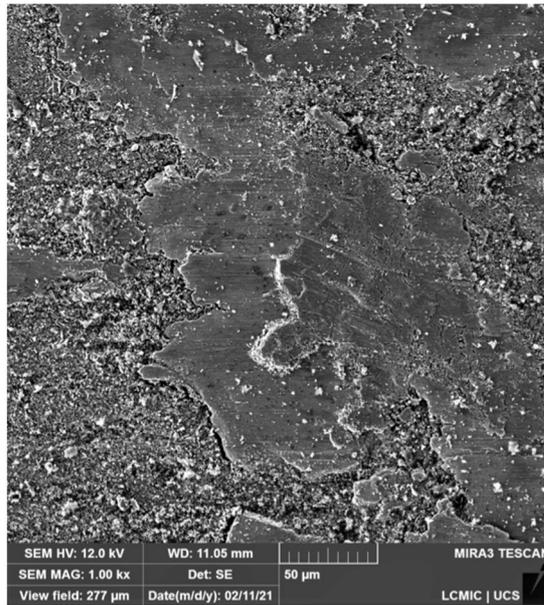


20000 vezes de aumento

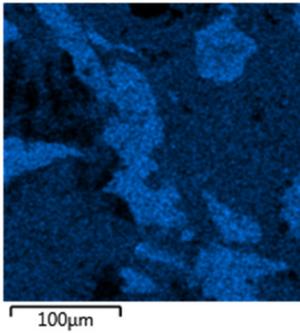


## 8.2. MAPA ESPECTROS SUPERFÍCIE PASTILHAS

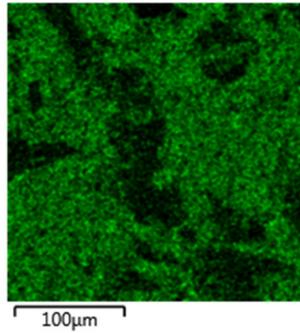
Superfície pastilha carbeto A



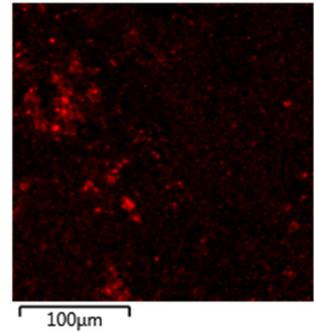
Fe K $\alpha$ 1



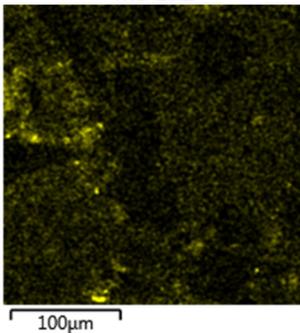
O K $\alpha$ 1



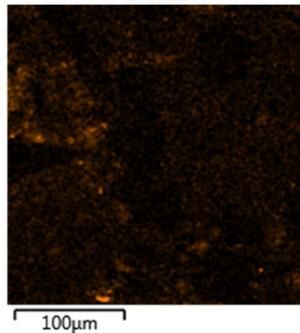
Si K $\alpha$ 1



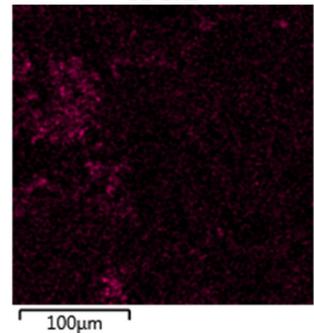
Mo L $\alpha$ 1



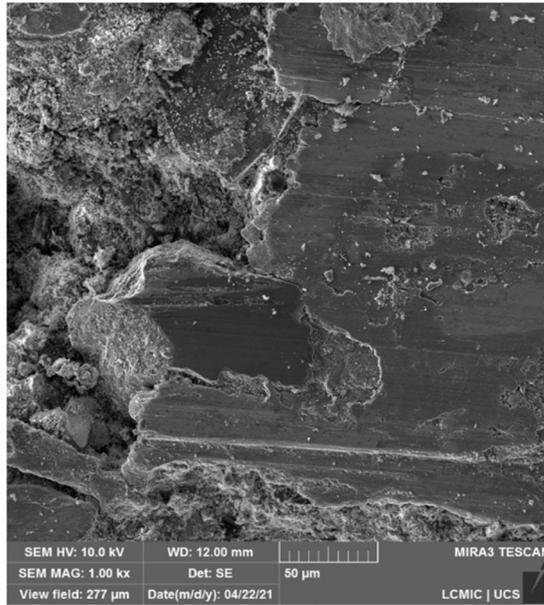
S K $\alpha$ 1



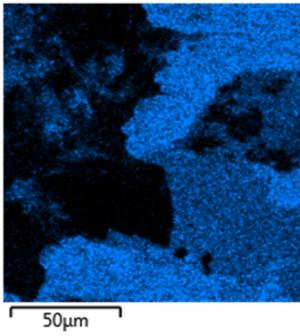
Sb L $\alpha$ 1



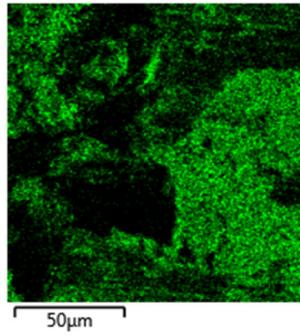
Superfície pastilha carbeto C



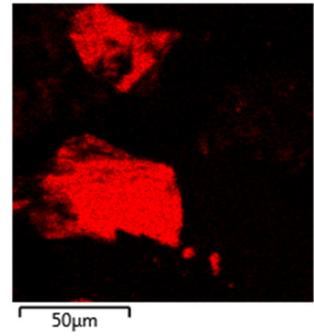
Fe Kα1



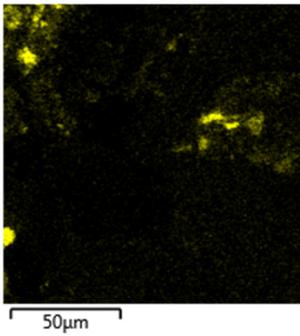
O Kα1



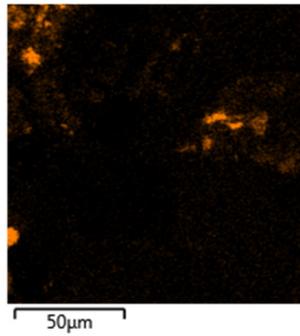
Si Kα1



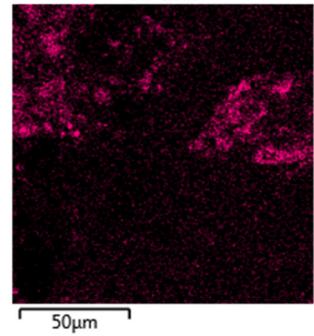
Mo Lα1



S Kα1



Sb Lα1

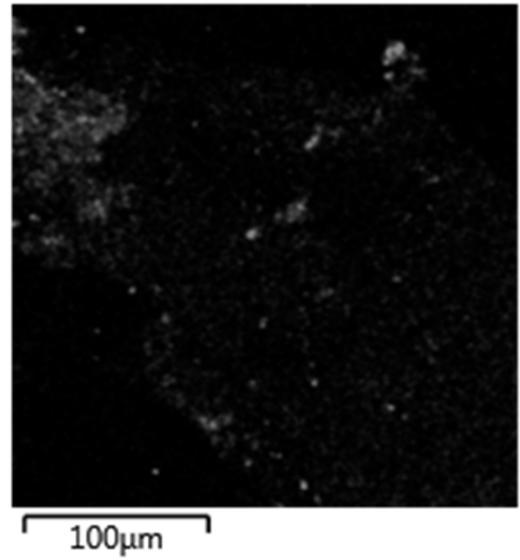
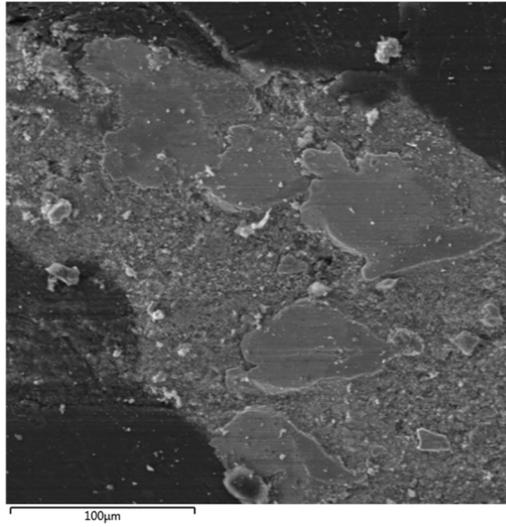


8.3. MEV SUPERFÍCIE PASTILHAS

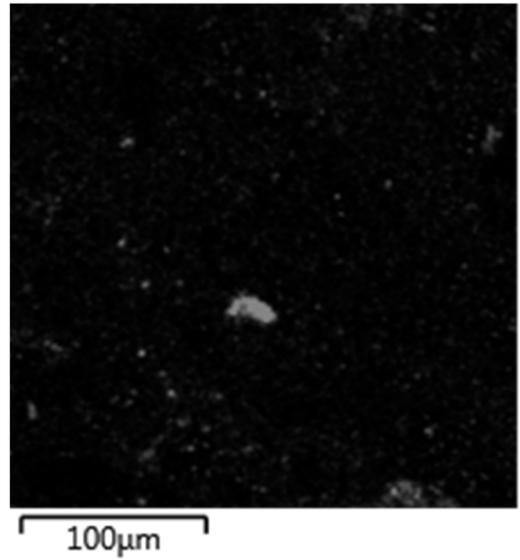
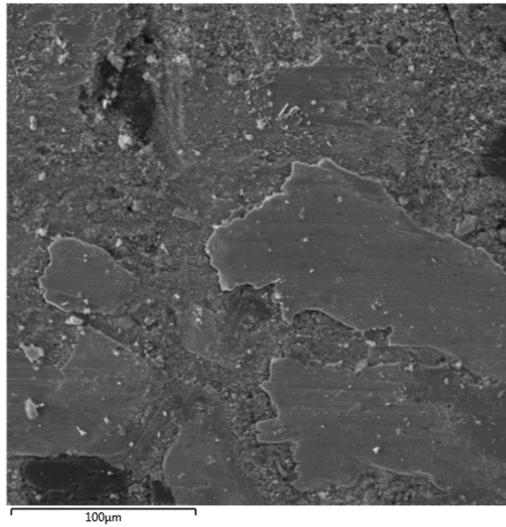
Carbeto MEV Elétrons Retroespalhados

MEV spectro Si K<sub>alfa</sub>

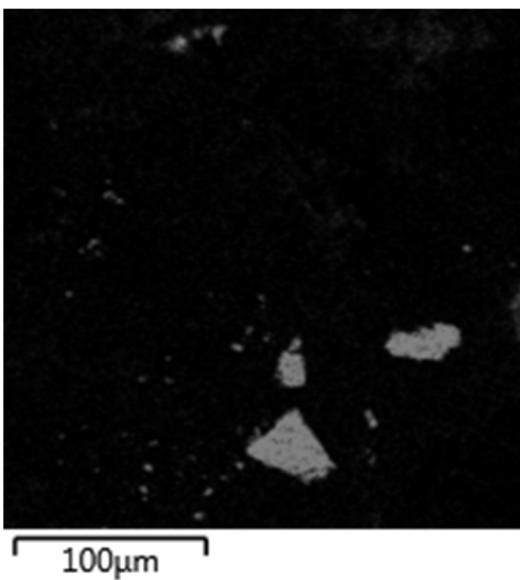
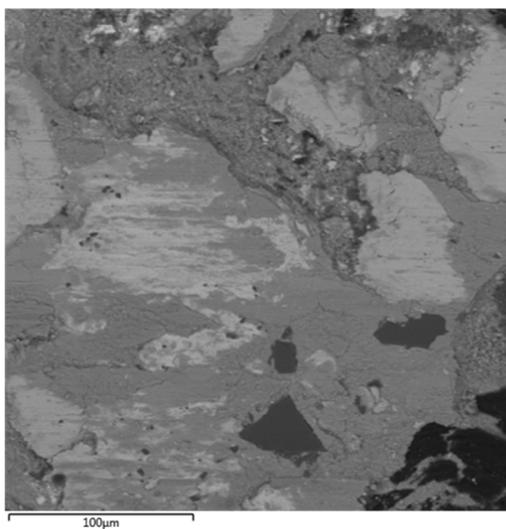
A



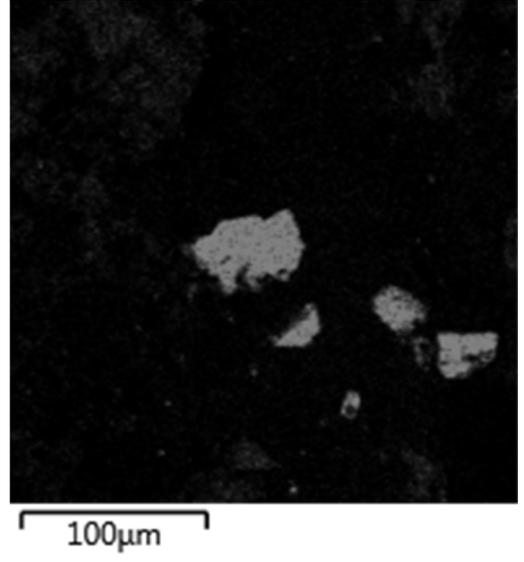
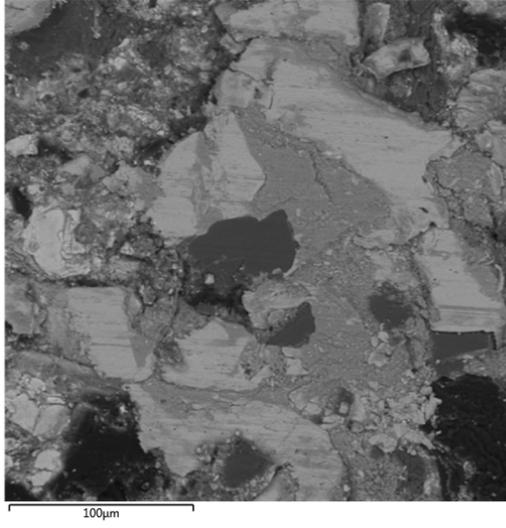
A



C



C



## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABMACO. **Compósitos 1 - Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. [s.l.] : ABMACO, 2008.
- ADACHI, K.; HUTCHINGS, I. M. Sensitivity of wear rates in the micro-scale abrasion test to test conditions and material hardness. **Wear**, [s. l.], v. 258, n. 1- 4 SPEC. ISS., p. 318–321, 2005.
- ASHBY, Michael F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 4. ed. Burlington: Elsevier Ltd, 2011.
- BHUSHAN, Bharat (ED.). **Modern Tribology Handbook**. [s.l.] : CRC Press, 2001.
- BHUSHAN, Bharat. **Introduction to Tribology**. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- BIJWE, Jayashree *et al.* Nano-abrasives in friction materials-influence on tribological properties. **Wear**, [s. l.], v. 296, n. 1–2, p. 693–701, 2012.
- BLAU, Peter J. **Friction science and technology: From concepts to applications, second edition**. 2. ed. New York: CRC Press, 2008.
- BREZOLIN, André. **Estudo de geração de trincas térmicas em discos de freios de veículos comerciais**. 2007. Universidade de Caxias do Sul, [s. l.], 2007.
- CHO, K. H. *et al.* The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials. [s. l.], v. 264, p. 291–297, 2008.
- COLOMBO, Douglas Cristiano Oro; FARIAS, María Cristina Moré; BERTI, Julio Cesar. **Estudo do desgaste e corrosão de hastes de cilindros hidráulicos revestidas com cromo duro**. 2011. Universidade de Caxias do Sul, [s. l.], 2011.
- CORONADO, John J.; SINÁTORA, Amilton. Particle size effect on abrasion resistance of mottled cast iron with different retained austenite contents. **Wear**, [s. l.], v. 267, n. 11, p. 2077–2082, 2009.

COZZA, Ronaldo Câmara. **Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante**. 2011. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2011.

DIN 50320. **Wear terms systematic analysis of wear processes classification of wear phenomena** Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN), 1979.

ERIKSSON, Mikael; BERGMAN, Filip; JACOBSON, Staffan. On the nature of tribological contact in automotive brakes. **Wear**, [s. l.], v. 252, n. 1–2, p. 26–36, 2002.

FORELAND, S. *et al.* Exposure to Fibres, Crystalline Silica, Silicon Carbide and Sulphur Dioxide in the Norwegian Silicon Carbide Industry. **The Annals of Occupational Hygiene**, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 317–336, 2008.

HALLIDAY, David; WALKER, Jearl; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física**. 9. ed. [s.l.] : LTC, 2012.

HOKKIRIGAWA, Kazuo; KATO, Koji. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. **Tribology International**, [s. l.], v. 21, n. 51–57, 1988.

HOLMBERG, Kenneth *et al.* Friction and wear of coated surfaces: Scales, modelling and simulation of tribomechanisms. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 202, n. 4–7, p. 1034–1049, 2007.

HOLMBERG, Kenneth; ANDERSSON, Peter; ERDEMIR, Ali. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, [s. l.], v. 47, p. 221–234, 2012.

HOLMBERG, Kenneth; ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 263–284, 2017.

HOLMBERG, Kenneth; MATHEWS, Allan. Coatings tribology: a concept, critical aspects and future directions. **Thin Solid Films**, [s. l.], v. 253, p. 173–178, 1994.

HUTCHINGS, Ian M. **Tribology : friction and wear of engineering materials**. Boca Raton: CRC Press, 1992.

JOST, Hans Peter. **Lubrication (tribology), education and research a report on the present position and industry's needs**. Londres.

KELLY, D. A.; HUTCHINGS, I. M. A new method for measurement of particle abrasivity. **Wear**, [s. l.], v. 250, n. 1–12, p. 76–80, 2001.

KIEFFER, R.; BENESOVSKY, F. **Hartstoffe**. Vienna: Springer Vienna, 1963.

LAMB, Ricardo Gilberto. **Estudo do comportamento de desgaste de materiais de atrito em função de variáveis de aplicação**. 2008. Universidade de Caxias do Sul, [s. l.], 2008.

**Link**. 2022. Disponível em: < <https://www.linkeng.com>>. Acesso em: 3 abril 2022.

LOMBARDI JR., Arley de Barros; URBANO ÁVILA, Paulo; DEZIDERIO PRIETO, Ronaldo. **Dinâmica e desempenho veicular**. São Paulo: SENAI São Paulo, 2018.

MALUF, O.; ANGELONI, M.; SANTOS, J. C.; COLÓRIO, M. A.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W. W. Desenvolvimento histórico e tecnológico dos discos de freio automotivos. In: 7º INTERNATIONAL BRAKE COLLOQUIUM E ENGINEERING DISPLAY SAE 2005, **Anais...** [s.l: s.n.]

MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliméricos : fundamentos e tecnologia**. São Paulo: Artliber, 2011.

MATĚJKA, Vlastimil *et al.* Semimetallic Brake Friction Materials Containing ZrSiO<sub>4</sub>: Friction Performance and Friction Layers Evaluation. **Journal of Composite Materials**, [s. l.], v. 43, n. 13, p. 1421–1434, 2009.

MATOZO, Luciano T.. **Estudo da relação entre propriedades do compósito de fricção aplicado a sistemas de freio a disco e a propensão à ocorrência de *squal noise***. 2012. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2008.

MISRA, Amrish; FINNIE, Iain. On the size effect in abrasive and erosive wea. **Wear**, [s. l.], v. 65, n. 3, p. 359–373, 1981.

MOTORIST ASSURANCE PROGRAM, Auto Braking Systems. Disponível em: <<http://motorist.org/articles/auto-braking-systems>>. Acesso em: 21 out 2015. NICHOLSON,

Geoffrey. **Facts about friction: a friction material manual almost all you need to know about manufacturing.** Croydon: P&W Price Enterprises, 1995.

OPARIN, Viktor N.; TANAINO, Alexander S. A new method to test rock abrasiveness based on physico-mechanical and structural properties of rocks. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 250–255, 2015.

RIEDEL, Ralf (ED.). **Handbook of Ceramic Hard Materials.** [s.l.] : Wiley, 2000.

RODRIGUES GOMES, Thais; FARIAS SOARES, Marcos Roberto; PÉREZ BERGMANN, Carlos. The Size Effect of Silicon Carbide Particles on the Wear of Brake Pad Materials. **Eurobrake**, [s. l.], p. 1–6, 2020.

**Refractory Metal.** 2022. Disponível em: <<https://www.refractorymetal.org/how-to-produce-silicon-carbide/>>. Acesso em: 10 abril 2022.

RUSS, John C.; NEAL, F. Brent. **The Image Processing Handbook.** 4. ed. Raleigh: CRC Press, 2017.

SEDRICKS, Aristide John; MULHEARN, T. O. Mechanics of cutting and rubbing in simulated abrasive processes. **Wear**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 457–466, 1963.

SHIBATA, Katsuhiro *et al.* Development of brake Friction Material. **ABS/TCS and BrakeTechnology**, [s. l.], p. 149, 1993.

**Science Direct.** 2022. Disponível em: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>. Acesso em: 10 abril 2022.

SURFACE VEHICLE RECOMMENDED PRACTICE. **SAE J2521: Disc and Drum Brake Dynamometer Squeal Noise Test Procedure.** 2006.

TREZONA, Rob I.; ALLSOPP, David N.; HUTCHINGS, Ian M. Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test. **Wear**, [s. l.], v. 205–214, 1999.

VAN VLACK, Lawrence Hall. **Propriedades dos Materiais Cerâmicos.** [s.l.] : Edgar Blücher Ltda, S. Paulo, Brasil, 1973.