

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

**LORENA MARIA SOUZA GOMES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA MICROESTRUTURA, DA  
COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DA CARGA NORMAL NO CONTROLE DO ATRITO NOS  
FREIOS A DISCO**

Cachoeiro de Itapemirim

2022

**LORENA MARIA SOUZA GOMES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA MICROESTRUTURA, DA  
COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DA CARGA NORMAL NO CONTROLE DO ATRITO NOS  
FREIOS A DISCO**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Ma. Karla Dubberstein Tozetti.

Cachoeiro de Itapemirim

2022

(Biblioteca do Campus Cachoeiro de Itapemirim)

G633e Gomes, Lorena Maria Souza.

Estudo da influência da variação da microestrutura, da composição química e da carga normal no controle do atrito nos freios a disco / Lorena Maria Souza Gomes. - 2022.

59 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Karla Dubberstein Tozetti

TCC (Graduação) Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Cachoeiro de Itapemirim, Engenharia Mecânica, 2022.

1. Freios. 2. Engenharia mecânica. 3. Atrito. I. Tozetti, Karla Dubberstein. II. Título III. Instituto Federal do Espírito Santo.

CDD: 629.246

Bibliotecário/a: Jacqueline Machado Silva CRB-ES nº 640

**LORENA MARIA SOUZA GOMES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA MICROESTRUTURA, DA  
COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DA CARGA NORMAL NO CONTROLE DO ATRITO NOS  
FREIOS A DISCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica  
do Instituto Federal do Espírito Santo, como  
requisito parcial para a obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 19 de dezembro de 2022

**COMISSÃO EXAMINADORA**

Prof.<sup>a</sup> Ma. Karla Dubberstein Tozetti  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Orientadora

Prof. Dr. Carlos Eduardo Gomes Ribeiro  
Instituto Federal do Espírito Santo

Prof. Me. Marcelo Chagas  
Instituto Federal do Espírito Santo



*Emitido em 20/12/2022*

**FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC Nº 19/2022 - CAI - CCEM (11.02.18.01.08.02.05)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 20/12/2022 19:07 )*

**CARLOS EDUARDO GOMES RIBEIRO**

*PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO*

*CAI - CCEM (11.02.18.01.08.02.05)*

*Matrícula: 1983337*

*(Assinado digitalmente em 20/12/2022 17:35 )*

**KARLA DUBBERSTEIN TOZETTI**

*PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO*

*CAI - CCEM (11.02.18.01.08.02.05)*

*Matrícula: 1051448*

*(Assinado digitalmente em 21/12/2022 16:03 )*

**MARCELO CHAGAS**

*PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO*

*CAI-CCTME (11.02.18.01.08.02.14)*

*Matrícula: 1086397*

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ifes.edu.br/documentos/> informando seu número: **19**, ano: **2022**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC**, data de emissão: **20/12/2022** e o código de verificação: **cec6b9ffc6**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me guiar e abençoar durante a caminhada, tornando esse sonho possível.

Aos meus pais que me apoiam e incentivam nos estudos e por não medirem esforços para que esse objetivo fosse alcançado.

Aos familiares e amigos pelos momentos divertidos e prazerosos de descontração e por me encorajarem e acreditarem no meu potencial.

À professora Karla Dubberstein Tozetti pelo apoio e orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo pela formação recebida e aos professores por todo conhecimento transmitido.

## RESUMO

O trabalho desenvolvido trata-se de uma revisão integrativa e qualitativa, aplicando o método comparativo, sobre como determinados parâmetros, tais como: microestrutura, composição química e carga normal influenciam no controle do atrito nos freios, realizado por meio de pesquisa bibliográfica na biblioteca virtual da USP, nos portais de revistas Science Direct e SciELO e na plataforma Google Acadêmico, publicadas no período de 2000 a 2022. Foram selecionadas 4 literaturas, com um total de 16 ensaios de desgaste analisados. De todos os trabalhos analisados foram retiradas as seguintes propriedades em comum para a aplicação do método comparativo: microestrutura, composição química, velocidade, carga normal e/ou pressão de frenagem, dureza, resistência à tração, taxa de desgaste, força de atrito e coeficiente de atrito, bem como a análise da tribografia e do tribocontato. O estudo comparativo foi realizado com o uso de gráficos e tabelas organizados no Microsoft Excel 2016 e base teórica. No final deste trabalho, constatou-se que de fato a modificação de alguns parâmetros tribológicos podem ajudar no controle da força de atrito na frenagem e também, no controle do desgaste do disco, como por exemplo, o teor de grafita e perlita presente na microestrutura, a adição de elementos de ligas na composição química e a variação da carga normal.

Palavras-chaves: Discos de freio. Ferro fundido cinzento. Freios automotivos. Força de atrito.

## **ABSTRACT**

The work developed is an integrative and qualitative review, applying the comparative method, on how certain parameters, such as: microstructure, chemical composition and normal load influence the control of friction in the brakes, carried out through bibliographical research on the virtual library from USP, on the journal portals Science Direct and SciELO and on the platform Google Scholar, published from 2000 to 2022. 4 literatures were selected, with a total of 16 wear tests analyzed. From all the works analyzed, the following common properties were selected for the application of the comparative method: microstructure, chemical composition, speed, normal load and/or braking pressure, hardness, tensile strength, wear rate, friction force and coefficient of friction, as well as the analysis of tribography and tribocontact. The comparative study was carried out using graphs and tables organized in Microsoft Excel 2016 and theoretical basis. At the end of this work, it was verified that in fact the modification of some tribological parameters can help in the control of the friction force in the braking and also, in the control of the disk wear, as for example, the percentage of graphite and pearlite present in the microstructure, the addition of alloying elements in the chemical composition and the variation of the normal load.

Keywords: Brake discs. Grey cast iron. Automotive brakes. Friction force.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos tipos de grafita dos ferros fundidos cinzentos.....	23
Tabela 2: Tipos de artigos de revisão utilizados.....	33
Tabela 3: Literaturas analisadas. ....	34
Tabela 4: Relação de autores e materiais ensaiados.....	34
Tabela 5: Composição química dos discos de freio estudados.....	36
Tabela 6: Microestrutura dos discos de freio estudados. ....	37
Tabela 7: Propriedades analisadas. ....	40
Tabela 8: Propriedades mecânicas dos materiais analisados.....	41
Tabela 9: Forças de atrito e coeficientes de atritos dos materiais analisados.....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais fatores influenciadores nas taxas de desgastes.....	4
Figura 2 - Classificação do desgaste abrasivo (a) a dois corpos (b) a três corpos. ....	4
Figura 3 - Tipos de mecanismos de desgaste.....	5
Figura 4 - Mecanismo de desgaste abrasivo de microindentação.....	6
Figura 5 - Freio por alavanca. ....	8
Figura 6 - Freio de cinta. ....	9
Figura 7 - Sistema de freio automotivo.....	12
Figura 8 - Sistema de freio a disco ventilado.....	14
Figura 9 - Sistema de freio a disco (a) com pinça fixa (b) com pinça flutuante. ....	15
Figura 10 - Pastilhas de freio e suas camadas.....	16
Figura 11 - Geometrias dos discos de freio: (a) Disco sólido (b) Disco Ventilado (c) Disco perfurado (d) Disco ranhurado. ....	17
Figura 12 - Amostra de pastilhas de freio.....	19
Figura 13 - Disco de freio ventilado, produzido em ferro fundido cinzento.....	22
Figura 14 - Tipos de grafita presentes nos ferros fundidos cinzentos. ....	23
Figura 15 - Transporte de calor em ferro fundido com grafita (a) nodular; (b) vermicular; (c) lamelar. ....	24
Figura 16 - Microestrutura do ferro fundido cinzento (A), vermicular (B) e nodular (C). .	27
Figura 17 - Mecanismo de formação trincas térmicas.....	29
Figura 18 - Dinamômetro inercial. ....	31
Figura 19 - Ensaio de desgaste por deslizamento.....	32
Figura 20 - Desgaste do discos de freio.....	42
Figura 21 - Desgaste das pastilhas de freio. ....	43

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Largura do veio
ABS	<i>Anti-Lock Braking System</i>
ASTM	American Society for Testing and Materials
c	Comprimento do veio
CE	Carbono equivalente
Fe250	Ferro fundido cinzento da classe 250
FeAc	Ferro fundido cinzento alto teor de carbono
FeTi	Ferro fundido cinzento ligado com titânio
H	Dureza
K	Coeficiente de desgaste
LOI	Quantidade do conteúdo orgânico obtido através da calcinação do material em estufa, a 800 °C em ar (perda ao fogo)
Q	Volume de desgaste por distância de deslizamento
W	Carga normal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>2</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>2</b>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1	DESGASTE .....	3
2.1.1	<b>Desgaste Abrasivo</b> .....	<b>3</b>
2.1.2	<b>Desgaste Térmico e Oxidativo</b> .....	<b>6</b>
2.1.3	<b>Desgaste Adesivo</b> .....	<b>7</b>
2.1.4	<b>Desgaste por Fadiga Superficial</b> .....	<b>7</b>
2.2	HISTÓRIA DOS SISTEMAS DE FREIOS .....	7
2.3	SISTEMA DE FRENAGEM .....	11
2.4	SISTEMA DE FREIOS A DISCO .....	13
2.4.1	<b>Pinça de Freio</b> .....	<b>14</b>
2.4.2	<b>Pastilhas de Freio</b> .....	<b>15</b>
2.4.3	<b>Disco de Freio</b> .....	<b>16</b>
2.5	MATERIAIS DE PASTILHAS DE FREIO .....	18
2.6	MECANISMOS DE DESGASTE NAS PASTILHAS DE FREIO .....	20
2.7	MATERIAIS DE DISCOS DE FREIO .....	21
2.8	MECANISMOS DE DESGASTE NOS DISCOS DE FREIO.....	28
2.9	ENSAIOS DE DESGASTE NOS FREIOS A DISCO .....	30
2.9.1	<b>Dinanômetros inerciais</b> .....	<b>30</b>
2.9.2	<b>Pino sobre disco</b> .....	<b>31</b>
2.10	PROKNOW-C E MÉTODO COMPARATIVO .....	32
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>34</b>
3.1	MATERIAIS.....	34
3.2	MÉTODOS.....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>41</b>
4.1	ANÁLISE DOS DESGASTES .....	42

4.2	ANÁLISE DAS FORÇAS DE ATRITO E DOS COEFICIENTES DE ATRITO ..	47
4.3	ANÁLISE DAS TRIBOGRAFIAS E DOS TRIBOCONTATOS .....	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>52</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	53
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Embora o assunto da tribologia seja mais amplo do que um estudo de atrito, o controle do atrito atua como papel importante no desempenho de muitos sistemas mecânicos. Em alguns casos, o baixo atrito é desejável, como em rolamentos e engrenagens de máquinas. Entretanto, o baixo atrito não é necessariamente benéfico em todas as situações, por exemplo, freios e embreagens, em que o atrito adequado e controlado é essencial para dissipar a energia cinética (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Segundo Neis (2012), diversos autores procuram modelar o atrito e o desgaste dos materiais durante as frenagens, no entanto, o atrito e o desgaste são fenômenos complexos, governados principalmente pelas relações entre diversas variáveis operacionais e material, o que faz com que não se tenha conhecimento preciso sobre o papel de cada variável. Portanto, os modelos de atrito e desgaste dos materiais descrevem o comportamento de apenas um determinado material para condições bem específicas de aplicação.

Em um freio a disco, por exemplo, existem diversos componentes envolvidos para garantir a frenagem do veículo, sendo o principal processo a interação entre as pastilhas e o disco. Com base nisso, muitos estudos são realizados em relação a essa interação, através de suas constituições metalúrgicas e químicas, por modelagem matemática ou por meio de experimentos laboratoriais (ABREU, 2013).

Com esse conhecimento em mente, esse trabalho pretende estudar e organizar alguns desses estudos sobre controle de atrito nos sistemas de freios e com base no estudo de tribologia concluir sobre como a variação de determinados parâmetros operacionais e materiais influenciam no controle do atrito.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as contribuições científicas realizadas na área de freios a disco automotivos, no que se refere a análise microestrutural e tribológica dos materiais da pastilha e do disco de freio e entender como a variação de alguns parâmetros, tais como: carga normal, microestrutura e composição química influenciam no controle do atrito.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico e estudar as metodologias para ensaio de desgaste e os parâmetros utilizados para simulação de freio a disco;
- Compreender as análises microestrutural e tribológica dos diversos materiais empregados nas pastilhas e discos de freio automotivos contidos na literatura;
- Aplicar o editor de planilhas *Microsoft Excel 2016*, para realizar análise comparativa dos resultados dos trabalhos utilizados no estudo, por meio de tabelas e gráficos;
- Comparar os dados de taxas de desgaste e coeficientes de atrito, bem como a análise da tribografia e do tribocontato;
- Prever as tendências dos resultados de desempenho das pastilhas e discos de freio utilizados no estudo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Devido à alta empregabilidade dos freios a disco automotivos, uma revisão bibliográfica criteriosa com organização dos dados e análise dos resultados dos ensaios podem auxiliar o entendimento de como alguns parâmetros influenciam no controle do atrito e como se pode usar esses conhecimentos no desenvolvimento de novos materiais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DESGASTE

O desgaste é caracterizado como a perda progressiva de material que se deve ao movimento relativo entre a superfície e as substâncias em contato ou a outra superfície de contato, no qual uma ou ambas as superfícies podem sofrer danos (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Segundo Menezes (2016), os mecanismos de desgaste que atuam nos materiais de atrito do par tribológico quando os freios automotivos estão em serviço são: desgaste abrasivo, desgaste térmico e oxidativo, desgaste adesivo e desgaste por fadiga superficial.

#### 2.1.1 Desgaste Abrasivo

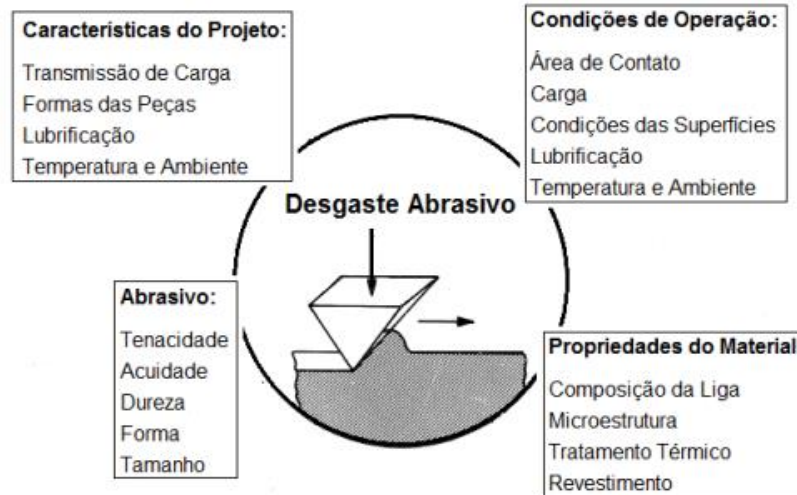
O desgaste abrasivo é definido como o desgaste causado por partículas duras ou por asperezas da superfície de um contra corpo mais duro deslizando sobre uma superfície sólida mais macia, expondo ou removendo material (ZUM GAHR, 1998).

Apesar de ainda não existir uma teoria fundamental sobre desgaste abrasivo que seja aceita por completo, o conceito base da maioria é que a abrasão é um processo de riscamento, no qual o formato do penetrador é limitado geralmente ao cônico. Dentre as diversas equações utilizadas para correlacionar o desgaste e outras propriedades, existe a equação de Archard, que ainda é utilizado como ponto de partida para a elaboração de equações mais complexas, dada por (SERBINO, 2005; HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017):

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (1)$$

Onde, Q é o volume de desgaste por distância de deslizamento, K a constante adimensional conhecida usualmente como coeficiente de desgaste, W a carga normal e H a dureza da superfície mais macia. Na equação 1 apresentada acima, a constante K representa a influência de diversos parâmetros no desgaste abrasivo, e esses diversos parâmetros são representados na Figura 1 adaptado do livro do Zum Gahr (1987).

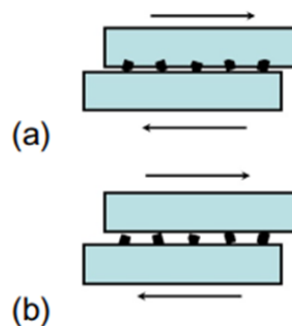
Figura 1 - Principais fatores influenciadores nas taxas de desgastes.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

De acordo com Hutchings; Shipway (2017), o desgaste abrasivo pode ser classificado como: desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos, conforme apresentado na Figura 2. A abrasão a dois corpos é causada pela penetração de protuberâncias duras da superfície da contra face ou de partículas duras aderidas a esta, em uma superfície com menor dureza. Já na abrasão a três corpos, as partículas duras estão livres para se mover, podendo rolar ou deslizar, entre o corpo e o contra-corpo, no qual o grau de penetração varia de acordo com os ângulos entre as extremidades destas partículas e as superfícies de contato.

Figura 2 - Classificação do desgaste abrasivo (a) a dois corpos (b) a três corpos.

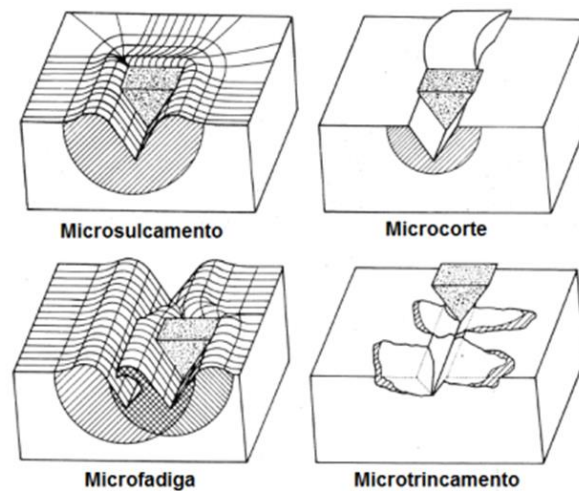


Fonte: Hutchings e Shipway (2017).

O dano ou a remoção de material da superfície de menor dureza, resultado da interação entre partículas abrasiva e material desgastado no desgaste abrasivo, acontece por

diferentes mecanismos de desgaste, sendo que Zum Gahr (1987) propôs quatro diferentes tipos de mecanismos de desgaste: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincamento. Estes mecanismos mostram o resultado de deslocamento, fratura ou destacamento de material da superfície mais macia, e são apresentados na Figura 3 adaptado de Zum Gahr (1987).

Figura 3 - Tipos de mecanismos de desgaste.



Fonte: Adaptado de Zum Gahr (1987).

O microsulcamento é caracterizado por um único passe que não resulta no destacamento do material da superfície desgastada, mas há a geração de sulcos (deformação plástica). A microfadiga é causada por dois ou mais passes nos sulcos gerados ou próximo a eles, que podem gerar o destacamento de partículas por fadiga (ZUM GAHR, 1987).

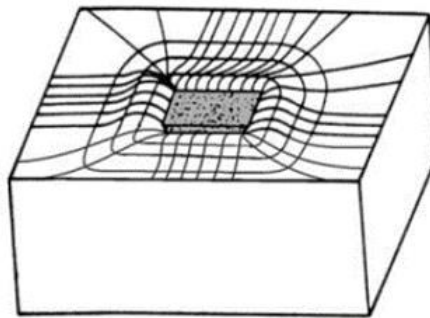
No microcorte há o destacamento de material com perda de debris do mesmo volume do sulco ou ranhura produzida pela partícula abrasiva. Por fim, o microtrincamento ocorre devido às grandes tensões geradas pela partícula abrasiva na superfície do material, que excedem o limite crítico de ruptura do material, proporcionando destacamento de grandes debris (ZUM GAHR, 1998).

Enquanto o microsulcamento e a microfadiga prevalecem em regime de desgaste abrasivo moderado, o microcorte e o microtrincamento prevalecem em regime de desgaste abrasivo severo (GATES, 1998). Além disso, o microsulcamento e o microcorte

são processos predominantes em materiais dúcteis, enquanto microtrincamento em materiais frágeis (ZUM GAHR, 1998).

Estes mecanismos de desgaste ocorrem em desgaste abrasivo a dois corpos, ou seja, quando ocorre o deslizamento da partícula abrasiva contra a superfície. Quando a partícula rola entre corpo e contra corpo, o mecanismo de desgaste é o de indentações múltiplas, conforme Figura 4 (SILVA, 2008; SILVA; COSTA; MELLO, 2011).

Figura 4 - Mecanismo de desgaste abrasivo de microindentação.



Fonte: Silva (2008).

A microindentação acontece quando a partícula abrasiva entra em contato com a superfície com uma determinada carga sem se deslizar, causando deformação plástica localizada, no qual a perda de massa ocorre através de várias deformações simultâneas (SILVA, 2008; SILVA; COSTA; MELLO, 2011).

### 2.1.2 Desgaste Térmico e Oxidativo

O desgaste oxidativo acontece em condições de deslizamento sem lubrificação ou quando a espessura do filme de lubrificante é menor que a rugosidade das superfícies em contato, formando óxidos nas áreas reais de contato quando na presença de atmosfera, sob altas temperaturas (SERBINO, 2005).

As camadas de óxidos que são formadas nas superfícies metálicas atuam impedindo o contato entre metais. Porém o calor gerado pelo atrito entre as superfícies provoca a formação e o crescimento de camadas de óxidos, inicialmente em regiões isoladas e de diferentes espessuras, que com o aumento gradativo do carregamento térmico, podem levar a formação de óxido de modo generalizado na superfície (HUTCHINGS, 1992).

As regiões que manifestam as camadas de óxidos diferentes podem trincar de maneira abrupta ou em fadiga, causadas pelas altas concentrações de tensões oriundas do contato entre superfícies, o que originam microfaturas e desprendem partículas de desgaste não metálicas (SERBINO, 2005).

### 2.1.3 Desgaste Adesivo

O desgaste adesivo é gerado pela união pontual entre superfícies sólidas em contato, o que acarreta em material de transferência entre as superfícies ou perda de uma das superfícies. No mecanismo adesivo a área de contato entre asperezas é pequena, o que causa altas pressões pontuais, ocorrendo deformação plástica e provocando interação e união entre as asperezas, geradas por forças de atração de caráter iônico, metálico ou ligações fracas de Van der Waals (OLIVEIRA, 2015).

### 2.1.4 Desgaste por Fadiga Superficial

O desgaste por fadiga ocorre quando as partículas são desprendidas por variações de tensões cíclicas. Neste mecanismo, o carregamento cíclico gerado por movimento relativo entre as superfícies acarreta em um nível de concentração de tensões provocando deformação plástica pontual e, por consequência, a possibilidade de nucleação de trincas superficiais ou subsuperficiais, sendo estas responsáveis por contribuir no destacamento de fragmentos de material por delaminação (STACHOWIAK e BATCHELOR, 2005).

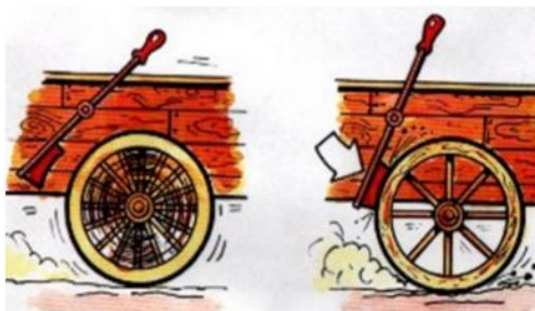
## 2.2 HISTÓRIA DOS SISTEMAS DE FREIOS

Em 1769, Nicolas Joseph Cugnot desenvolveu o primeiro veículo automotivo do mundo, que continha três rodas e destinava-se a transportar cargas. Na apresentação, Nicolas acabou batendo em um muro, devido à falta de um mecanismo responsável pela parada do veículo, o importante sistema de freio (FERRETO, 2018).

No início do desenvolvimento, os sistemas de freio consistiam de uma alavanca com pivotagem e um bloco de madeira fixado na outra extremidade junto à roda, em que ao puxar a alavanca o bloco era pressionado contra a roda, proporcionando a frenagem do veículo, conforme apresentado na Figura 5. As primeiras rodas dos veículos eram de

madeira envolta de um aro metálico, mas em pouco tempo apareceram os pneus de borracha, no qual o atrito entre pneu e bloco de madeira gerava um grande desgaste dos pneus, o que tornou este sistema de freio inviável (DIULGHEROGLO, 2010; FERRETO, 2018).

Figura 5 - Freio por alavanca.

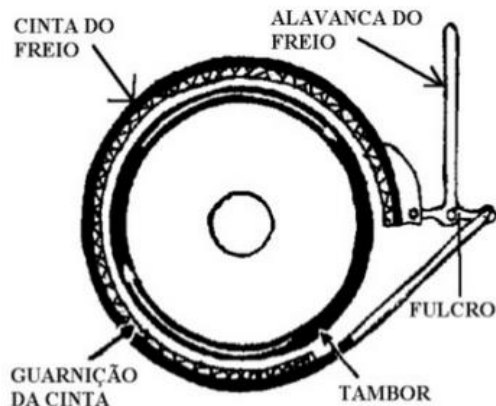


Fonte: Marques (2012).

A seguir, surgiram os freios de cinta, que consistiam de uma roda montada no centro do eixo traseiro do veículo, envolta por uma cinta que continha sob ela um material atritante capaz de impedir o movimento da roda quando acionada a alavanca presa a um suporte, conforme apresentado na Figura 6. Inicialmente, o material atritante era o couro, porém este apresentava perda das propriedades de atrito por conta da degradação térmica do material. Com isso, posteriormente começou a se utilizar crina, cabelo ou tecido de algodão umedecido em betumem (DIULGHEROGLO, 2010).

Por se tratar de um sistema de freio aberto, os freios de cinta estavam expostos aos elementos encontrados no meio ambiente, tais como água e barro, o que acarretavam a contaminação do sistema e, conseqüentemente, perda de sua eficiência. Além disso, outro problema era a necessidade do alto esforço mecânico para o condutor sobre a alavanca, o que dificultava a frenagem em alta velocidade (DIULGHEROGLO, 2010).

Figura 6 - Freio de cinta.



Fonte: Marques (2012).

Com a evolução dos veículos automotivos, os sistemas de freio também foram aperfeiçoados. Em 1902, o francês Louis Renault desenvolveu o conceito de freios a tambor por expansão interna, composto de um sistema fechado e mais limpo, mas que sofria maior influência da temperatura (DIULGHEROGLO, 2010).

O acionamento das sapatas sobre o tambor era totalmente mecânico, através de alavancas, o que continuava a demandar grandes esforços mecânicos na ação da frenagem. Em meados de 1930, os freios a tambor passaram a ser acionados por pressão hidráulica e, em 1950 surgiram os primeiros reguladores automáticos (FERRETO, 2018).

No início, os tambores eram de aço estampado e os materiais de atrito eram sapatas de ferro. Por conta da flexão e altos níveis de ruído, o material dos tambores logo progrediu para os ferros fundidos. Já o material atritante, graças aos estudos de Herbert Froad e Ferodo, em 1908, evoluiu para resina impregnado de amianto e reforçado com arames de latão, o que foi um grande avanço no desempenho da frenagem dos veículos (SERBINO, 2005).

Os primeiros veículos automotivos fabricados no mundo, Ford modelo T, consistiam de freios a tambor somente no eixo traseiro, já que na época se acreditava que freios nas rodas dianteira ocasionavam desvio ou instabilidade, como a capotagem do veículo. Mais tarde, descobriram que o que acontecia era o oposto, foi então nos anos 20 em que surgiram freios nas quatro rodas (DIULGHEROGLO, 2010; SERBINO, 2005).

Também em 1902, o inglês Frederick Lanchester desenvolveu o primeiro freio a disco para automóveis, inspirado no conceito dos ingleses Browett e Harrison de 1876, originalmente idealizado para bicicletas, cujo sistema possuía um mecanismo simples em balanço, em que as sapatas localizadas em cada lado do aro da roda eram atuadas. Este sistema, chamado de Caliper Brake, foi então patenteado e aplicado no eixo traseiro do Lanchester 1910 20 HP, possibilitando uma frenagem eficiente em velocidades mais elevadas. Somente nos anos 50 este sistema começou a ser utilizado em escalas industriais pelos ingleses e franceses, e nos anos 60, pelos americanos (DIULGHEROGLO, 2010; SERBINO, 2005).

O problema dos freios a disco era o ruído, isso porque as pastilhas da época eram constituídas basicamente por materiais metálicos, com fator de amortecimento muito baixo. Então por essa e outras razões, no início da indústria automobilística, o sistema de freio a disco não foi amplamente aplicado (FERRETO, 2018).

Atualmente, existe uma combinação entre freio a disco e freio a tambor, na qual são utilizados na dianteira e traseira, respectivamente. Esta combinação proporcionou melhorias no desempenho da frenagem e foi seguida de um dispositivo, chamado de válvula sensível a carga, introduzido nos anos 70 pela Fiat e responsável por controlar de modo variável a pressão exercida no eixo traseiro, em que quanto mais peso no veículo, mais pressão é destinada ao freio traseiro (SERBINO, 2005).

Por fim, no final dos anos 60, surgiu outra grande evolução no sistema de frenagem para carros de passeio comuns: a frenagem assistida por ABS (*Anti-Lock Braking System*), sistema eletrônico complementar ao sistema de freio, que monitora a velocidade de cada roda, onde caso uma delas reduza a velocidade, são acionados pulsos de pressão hidráulica prevenindo o travamento da roda (SERBINO, 2005). Em 1971, a Chrysler fez a primeira aplicação do sistema na configuração computadorizada com um sensor para cada roda no modelo Chrysler Imperial, desenvolvido em parceria com a Bendix (FERRETO, 2018).

### 2.3 SISTEMA DE FRENAGEM

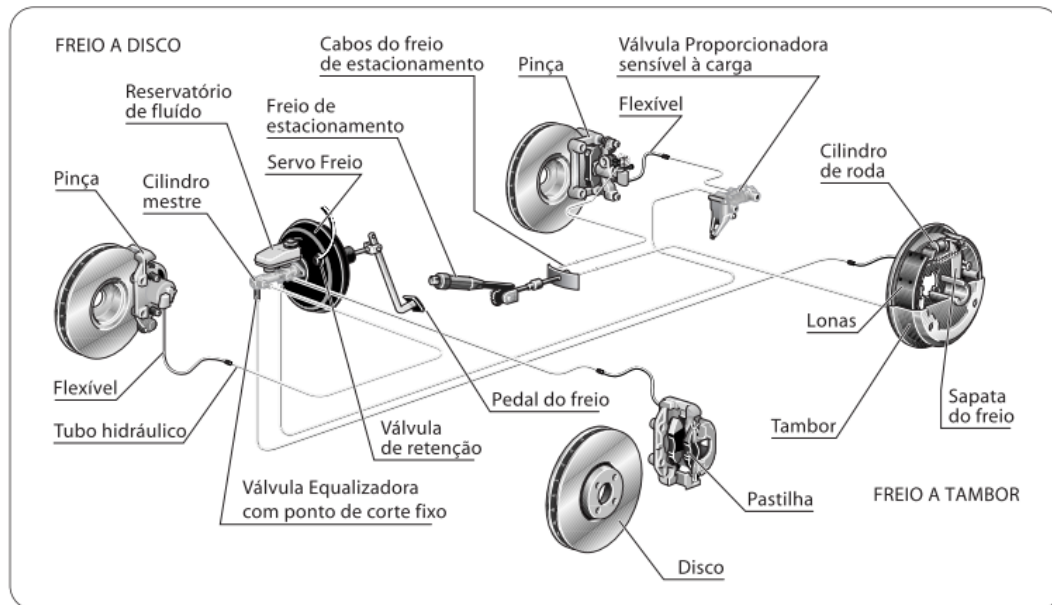
O sistema de frenagem é um item crítico no projeto de um automóvel, já que exerce influência direta na segurança veicular. De acordo com a norma ABNT NBR 10966-1:2015, o sistema de freio é uma combinação de peças que possibilita o controle do movimento de rotação das rodas de um veículo, de modo a desacelerar progressivamente ou mesmo cessar esse movimento, e também impossibilita que o movimento seja retomado.

O sistema de freio é composto por vários componentes, que juntos formam seu layout, conforme Figura 7. Os componentes vão desde a montagem do pedal até o freio, sendo estes normalmente: pedal de freio, servo freio, cilindro mestre, tubulações e mangueiras, reservatório do fluido, e o freio, que pode ser freio a disco e/ou freio a tambor (CROLLA, 2009).

O freio automotivo funciona transformando energia cinética do veículo em energia térmica, ou seja, transforma a energia proveniente do movimento do veículo em dissipação de calor. Durante a frenagem, a energia térmica é primeiro transferida para as superfícies de contato do freio, tais como o disco de freio e as pastilhas de freio no freio a disco, e o tambor e as lonas no freio a tambor, e depois é então transferido para os componentes de contato do freio, como as pinças do freio e os arredores (CHAN e STACHOWIAK, 2004).

Os sistemas de freio possuem diversas geometrias, porém os freios a disco e freios a tambor foram consagrados pela indústria automobilística, e corresponde quase todos os freios empregados em veículos de passeio (MATOZO, 2012). Apesar da geometria distinta, os dois freios possuem o mesmo princípio de funcionamento, no qual o material atritante (pastilha ou lona) é pressionado contra o rotor (disco ou tambor), originando uma força de atrito resultante (GALÁRRAGA, 2002).

Figura 7 - Sistema de freio automotivo.



Fonte: Nakata (2006).

A configuração de acionamento de sistemas de freio mais utilizada em veículos de passeio consiste nos freios hidráulicos, operando segundo o Princípio de Pascal, que diz que a pressão exercida num ponto de um fluido em equilíbrio se transmite integral e uniformemente a todos os pontos desse líquido (GALÁRRAGA, 2002).

Portanto, quando acionado o pedal de freio, uma pressão é aplicada no fluido de freio através do êmbolo do cilindro-mestre onde o fluido se localiza, e essa pressão será transmitida na mesma intensidade para todo o sistema de freio, por meio de mangueiras e tubulações. A intensidade da pressão vai ser determinada de acordo com a força aplicada no pedal do freio, sendo que o diâmetro do cilindro-mestre, do servofreio e o tamanho da pinça também têm influência na pressão exercida (NAKATA, 2006).

Aplicada a pressão no fluido, esta será transmitida até os cilindros de roda e pinças, no qual as lonas no freio a tambor e as pastilhas no freio a disco serão comprimidas sobre o tambor e o disco, respectivamente, e, conseqüentemente, reduzirá ou cessará o movimento de rotação das rodas do veículo (NAKATA, 2006).

## 2.4 SISTEMA DE FREIOS A DISCO

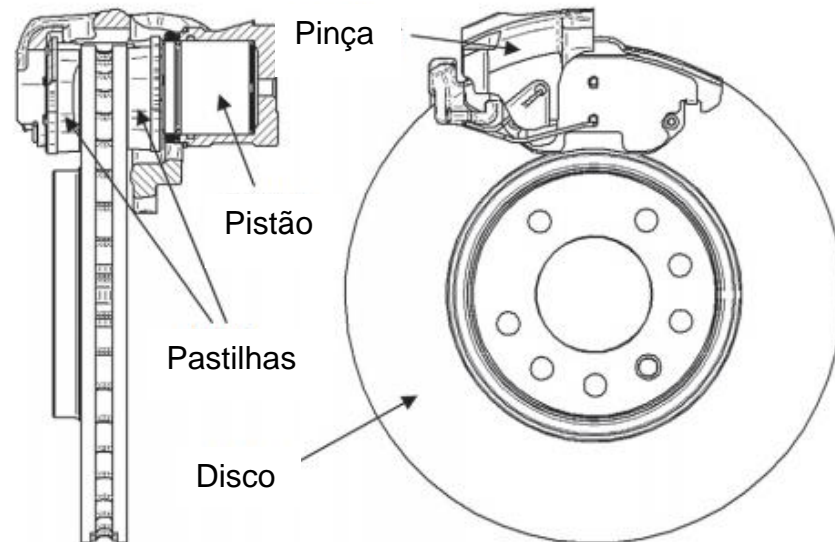
De acordo com Limpert (1999), os freios a disco usam pastilhas que são pressionadas axialmente contra um rotor, sendo este o disco que está fixado sobre o eixo que liga à roda. Para o travamento do disco em movimento, é acoplado uma pinça que contém um ou mais cilindros hidráulicos, responsáveis por comprimir as pastilhas de freio contra o disco, que ao entrarem em contato, geram o atrito necessário para a ação da frenagem (ABREU, 2013).

O funcionamento da frenagem ocorre quando o pedal de freio é pressionado, no qual ao soltá-lo, a pressão hidráulica é então aliviada e os êmbolos dos cilindros se retraem com o auxílio do anel de vedação do êmbolo, que atua como uma mola, liberando a folga original entre as pastilhas e o disco (NAKATA, 2006).

Para o travamento de rodas de carros de passeio é necessário um esforço do motorista no pedal, que gere uma pressão entre 80 e 95 atm no sistema hidráulico. Estas pressões de travamento dependem de diversos fatores, podendo variar consideravelmente de acordo com os mesmos, tais como carga total, tamanho e tipo dos discos de freio e pastilhas, dimensão do conjunto roda, etc. (SERBINO, 2005).

O sistema de freio a disco é o mais utilizado atualmente, podendo ser encontrado em automóveis, caminhões, aviões e locomotivas ferroviárias, e é composto basicamente por três componentes: o disco, a pinça e as pastilhas de freio, conforme ilustrado na Figura 8 abaixo (GONÇALVES, 2004).

Figura 8 - Sistema de freio a disco ventilado.



Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017).

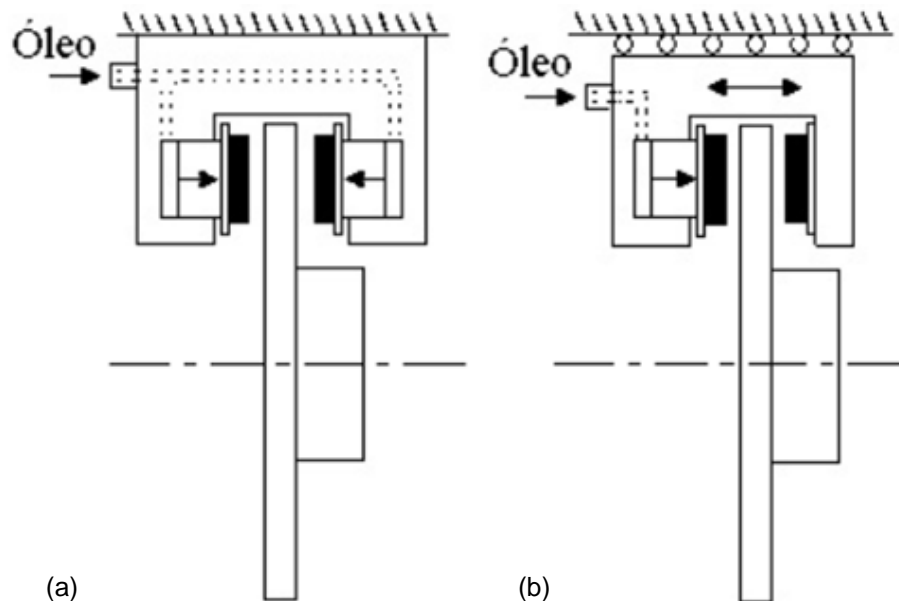
#### 2.4.1 Pinça de Freio

A pinça, ou caliper, é um dispositivo fixado na estrutura do veículo constituído por um ou mais pistões que realizam a compressão das pastilhas no disco de freio. Quanto ao acionamento, a pinça pode ser classificada como pneumática, presente em veículos ferroviários e em alguns freios de caminhões e ônibus; hidráulica, empregada na maioria dos veículos de passeio; ou elétrico, magnético e por esforço centrífugo (JUNIOR, 2012).

Quanto à forma que os pistões são alojados na pinça, ela pode ser classificada como pinça fixa e pinça flutuante (GONÇALVES, 2004). De acordo com Limpert (1999), a quantidade e posição dos pistões e o funcionamento da pinça se dá da seguinte maneira:

- Pinça fixa: É constituída de dois ou quatro pistões, que estão posicionados um oposto ao outro (Figura 9(a)). Neste sistema a pinça encontra-se estacionária e os pistões ao serem acionados exercem força nas pastilhas dos dois lados do disco;
- Pinça flutuante: É constituída de um ou dois pistões posicionados apenas no lado interno da pinça (Figura 9 (b)). Neste sistema a pinça é móvel, no qual a ação da força aplicada pelo pistão na pastilha interna, faz com que a pinça tenha uma reação se deslocando por meio de guias, pressionando a pastilha externa contra o disco.

Figura 9 - Sistema de freio a disco (a) com pinça fixa (b) com pinça flutuante.



Fonte: Adaptado de Infantini (2008).

O sistema de pinça fixa é bastante utilizado em veículos esportivos de alto desempenho em decorrência de sua construção mais robusta. Já o sistema de pinça flutuante apresenta menor número de componentes, menor massa e reduzido custo de fabricação, sendo assim aplicados na grande parte dos veículos leves produzidos na atualidade (MATOZO, 2012).

#### 2.4.2 Pastilhas de Freio

As pastilhas são os componentes de sacrifício do freio a disco, responsáveis por provocar atrito contra a superfície do disco de freio, convertendo energia cinética do veículo em energia térmica (BREZOLIN, 2007).

Segundo Brembo (1997), as pastilhas de freio são constituídas das seguintes camadas:

- Material de atrito: Parte que entra em contato com o disco de freio. Suas características construtivas e propriedades físico-químicas determinam o comportamento do atrito quando estes forem aplicados, onde as taxas de desgaste dependem do sistema tribológico (SERBINO, 2005);

- Substrato ou material de fundo: Responsável em melhorar a ancoragem mecânica entre o adesivo e o material de atrito, além de proporcionar maior absorção de vibrações originadas pela ação da frenagem;
- Adesivo: Tem como função unir o material de atrito ao suporte metálico;
- Suporte metálico: Tem como finalidade absorver a força proveniente do pistão de freio e repassar para o material de atrito, e, conseqüentemente, ao disco de freio.

A Figura 10 abaixo mostra uma pastilha de freio e suas respectivas camadas.

Figura 10 - Pastilhas de freio e suas camadas.



Fonte: Brezolin (2007).

### 2.4.3 Disco de Freio

O disco de freio é o elemento rotativo de um sistema de freio a disco, que tem como função interagir com as pastilhas, suportando a força de atrito resultante dessa interação e absorvendo grande parte do calor gerado durante a frenagem. Sua estrutura aberta permite a passagem de fluxo de ar e facilita o seu resfriamento, sendo que a quantidade de calor gerada depende da massa do veículo, da velocidade no momento em que os freios são aplicados, da pressão de contato e do tempo de atuação (ABREU, 2013).

De acordo com Abreu (2013), os discos assumem algumas geometrias afim de melhorias nas condições térmicas, sendo as principais soluções apresentadas a seguir:

- Disco de freio sólido: Possuem superfície maciça e é a solução mais simplificada e utilizada entre os veículos de passeio com freio a disco, visto que estes possuem baixo peso bruto total e potência de motor. Estes apresentam menor capacidade de troca de calor. Figura 11 (a);

- Disco de freio ventilado: Dissipam calor mais rapidamente, devido às aletas internas existentes, por isso são usados em automóveis com maior peso bruto total e potência de motor. Figura 11 (b);
- Disco de freio perfurado: Os discos de freio de alto desempenho eram muito afetados pela liberação de gases e de resíduos proveniente das pastilhas de freio, o que gerou dificuldade para liberar o calor, além das partículas dispersas comprometerem a boa aderência entre disco e pastilha. Como forma de solucionar estes problemas, apareceram os furos nos discos, que iriam permitir a troca de gases e a limpeza e renovação da superfície de contato pelo par tribológico (DIULGHEROGLO, 2010). Porém, se acredita que a presença destes furos gera estresse mecânico, o que o deixa propício às trincas, além de fazer com que a superfície de contato seja reduzida e, conseqüentemente, reduz as forças de atrito. Figura 11 (c);
- Disco de freio ranhurado: Possuem ranhuras usinadas no disco, afim de melhorar a limpeza da superfície de atrito, eliminar filme de água e gases proveniente das altas temperaturas. Tem o mesmo princípio de aplicação de veículos de alta performance, sendo que, assim como o disco de freio perfurado, também sofre de estresse mecânico. Figura 11 (d).

Figura 11 - Geometrias dos discos de freio: (a) Disco sólido (b) Disco Ventilado (c) Disco perfurado (d) Disco ranhurado.



Fonte: Menezes (2016).

## 2.5 MATERIAIS DE PASTILHAS DE FREIO

As propriedades físico-químicas e as características construtivas das pastilhas determinam o comportamento do atrito durante a atuação destas peças, no qual as taxas de desgaste dependem do sistema tribológico (BRANDÃO, 2014).

De acordo com Infantini (2008), os materiais de atrito são elaborados para obter boa resistência mecânica e térmica, e, com isso, suportar as condições exercidas sobre os mesmos quando pressionado contra uma superfície em movimento. Eriksson, Bergman e Jacobson (2002) e Zimmer (1982) salientam ainda que os materiais de atrito devem manter um coeficiente de atrito suficientemente alto, consistente e estável sob diferentes condições de temperatura, umidade, carregamento, meio ambiente, e níveis de desgaste e corrosão. Além disso, outras características desejáveis são a baixa sensibilidade à presença de sujeiras e/ou água das estradas e o bom conforto durante o uso, evitando vibrações e ruídos.

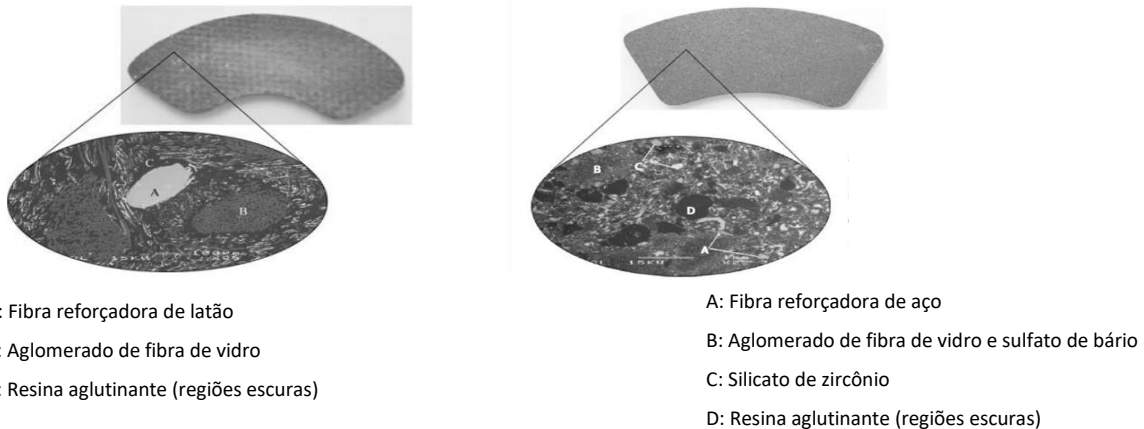
De acordo com Eriksson (2000), os materiais de atrito são compostos de muitos componentes diferentes, sendo que estes incluem:

- **Materiais estruturais:** Responsáveis por fornecer a resistência mecânica, geralmente são utilizadas fibras metálicas, carbono, vidro, e/ou kevlar. Antes de sua proibição, o amianto era o material estrutural mais utilizado no passado, por conta de suas propriedades satisfatórias;
- **Aditivos:** Garante a lubrificação e estabilidade das propriedades dos materiais de atrito. Lubrificantes sólidos como grafita ou sulfetos metálicos são utilizados para estabilizar o coeficiente de atrito. E as partículas abrasivas como alumina e sílica, aumentam o coeficiente de atrito e o desgaste do disco, sendo utilizadas para promover uma melhor superfície de atrito, limpando as superfícies dos discos por abrasividade;
- **Carga:** Para reduzir o custo e aperfeiçoar a capacidade de fabricação, frequentemente são utilizados óxido a base de silício e sulfeto de bário;
- **Aglomerantes:** Responsáveis por manter a união e preenchimento dos materiais da pastilha, formando um composto termicamente estável, comumente são utilizadas resinas fenólicas, no qual frequentemente são adicionados elastômeros.

Dentre estes componentes existem diversas matérias primas empregadas em diferentes materiais de atrito, sendo que o volume da participação de cada um destes componentes será diferente para cada fórmula e obedecerá às particularidades do uso do sistema de freio (CANALI, 2002).

Chan e Stachowiak (2004) mostram duas pastilhas de freio diferentes que contém constituintes distintos, no qual uma das amostras foi formulada para usos em motos e se destina a ter um coeficiente de atrito moderado, já a outra amostra de pastilha de freio foi formulada para uso em trens e tem como objetivo desenvolver um coeficiente de atrito mais alto. Portanto, a primeira amostra contém fibras mais macias feitas de latão, enquanto a segunda amostra contém ingredientes mais duros, como partículas de silicato de zircônio e fibras de aço, conforme mostrado na Figura 12 abaixo.

Figura 12 - Amostra de pastilhas de freio.



Fonte: Adaptado de Chan e Stachowiak (2004).

Segundo Hodel (2010), a fórmula básica dos materiais de atrito é composta de, aproximadamente, 40 a 50% de kevlar, 15 a 20% de resinas, 15 a 30% de barita, 4 a 6% de lubrificantes e 2 a 6% de abrasivos.

De acordo com Serbino (2005), em relação à classificação, os materiais utilizados em pastilhas também podem ser divididos em 3 subclasses:

- **Materiais de atrito orgânicos:** É uma mistura de distintas fibras e agentes de reforço, sendo usualmente adotados fibra de vidro, metais (ferro, latão e cobre), cerâmica, kevlar e celulose, rocha e diversos minerais. As resinas aglutinantes são normalmente polímeros termofixos (não sofrem alteração de formato e se

decompõem apenas a temperaturas mais elevadas que da faixa de uso por degradação) e também eventualmente resinas fenólicas;

- Materiais de atrito metálicos: O elemento de base pode ser cobre ou ferro, geralmente sintetizado e aditivado com compostos orgânicos, a fim de obter melhorias em seu desempenho. Estes são mais utilizados em veículos de competição;
- Materiais de atrito a base de carbono: Produzido a base de fibras de carbono junto com carbono amorfo, preparados com resinas orgânicas obtendo produto com baixa porosidade. Este material é leve e possui elevada resistência ao atrito, porém com alto custo. São utilizados em aeronaves, veículos militares e em veículos de competição.

## 2.6 MECANISMOS DE DESGASTE NAS PASTILHAS DE FREIO

Ostermeyer (2001) diz que as superfícies tribológicas das pastilhas geralmente possuem o coeficiente de atrito entre 0,1 a 0,9, no qual apresenta redução quando aumenta o nível de calor e força de atrito, o que gera o efeito de *fading*. Este efeito se caracteriza pela perda da eficiência da frenagem, causado pela queda do coeficiente de atrito com o aumento da força de frenagem.

O efeito de *fading* é considerado em frenagem como problema de fadiga térmica, que consiste na diminuição do coeficiente de atrito por aumento cíclico de temperatura, gerado pelo início de degradação dos componentes orgânicos presentes na formulação, como por exemplo, borrachas, resina, grafites e mudança de fase de sulfetos (SERBINO, 2005).

Nas taxas de desgaste em baixas temperaturas de frenagem, predominam-se os mecanismos de desgaste abrasivos e adesivos. Já em altas temperaturas, as taxas de desgaste aumentam exponencialmente por conta da degradação térmica do aglomerante e outros componentes, frequentemente acompanhado de perda de eficiência da frenagem (RHEE, 1971).

## 2.7 MATERIAIS DE DISCOS DE FREIO

De acordo com Blau (1996) e Galárraga (2002), o material utilizado nos discos de freio deve operar com coeficiente de atrito alto e uniforme, minimizar as oscilações com ruídos e trepidação e que são induzidas pelo atrito, ter boa resistência ao desgaste, ter boa difusividade térmica e ter boa resistência mecânica e térmica.

Atualmente a composição encontrada nos discos de freio podem variar bastante devido a diversos fatores, como a disponibilidade de materiais, desempenho, custo-benefício, especificação do cliente, etc. Diversos materiais já foram testados para compô-los, tal como: aço, ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, ferro fundido vermicular e materiais compósitos de alumínio e de carbono. Porém, até hoje, o material que melhor atende as propriedades mecânicas e térmicas para a fabricação dos discos de freio é o ferro fundido cinzento, contendo grafita do tipo A e baixos teores de ferrita e carbonetos, conforme apresentado na Figura 13 (COSTA, 2014).

O ferro fundido cinzento apresenta diversas vantagens ao ser utilizado em discos, pois é fácil de produzir em grande quantidade mantendo suas propriedades, é relativamente leve, resistente, possui boa usinabilidade, apresenta excelente capacidade de amortecimento de vibrações e boa condutividade térmica. Também apresenta maior calor específico com o aumento da temperatura, o que melhora a capacidade de absorção de energia dos discos durante a frenagem (GALÁRRAGA, 2002).

As classes de ferro fundido cinzento dependem dos teores de carbono, sendo que quanto maior a quantidade de carbono, maior será a condutividade térmica e menor sua resistência à tração, isto por conta do aumento da área de dissipação, correspondente ao aumento do teor de grafita lamelar que favorece a condutividade térmica e prejudica a resistência à tração (SERBINO, 2005). Os ferros fundidos cinzentos da classe 150 possuem teores de carbono de 3,6 a 3,8 %C e os da classe 350 de 2,7 a 2,95 %C (GALÁRRAGA, 2002).

Figura 13 - Disco de freio ventilado, produzido em ferro fundido cinzento.



Fonte: Guessser *et al.* (2003).

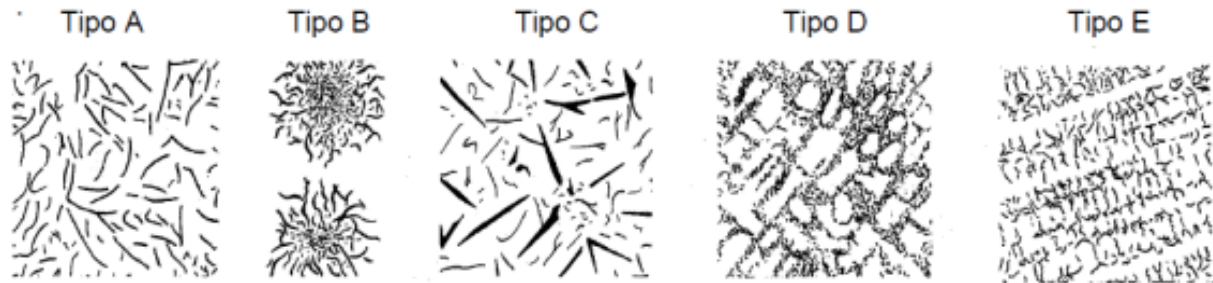
Na fabricação dos discos de freio também se utiliza mais o ferro fundido cinzento de alto carbono, por ser o que melhor atende as necessidades térmicas e mecânicas. Sendo assim, visando um melhor desempenho dos discos, foi desenvolvida uma classe de ferro fundido cinzento de alta condutividade térmica assegurada pela estrutura contínua da grafita dissipando calor de forma eficiente, associada ainda a bons valores de resistência mecânica e de resistência ao desgaste (GUESSER *et al.*, 2003; GUESSER e GUEDES, 1997).

De acordo com Cardoso (2005), existem o ferro fundido cinzento perlítico, caracterizado pela transformação da austenita em perlita quando em temperatura eutetóide, o que resulta em uma estrutura com lamelas de grafita envoltas por uma matriz perlítica; e o ferro fundido cinzento ferrítico, que quando no eutetóide o resfriamento ocorre em uma velocidade mais lenta, caracterizado pela transformação de austenita em grafita e ferrita, resultando em uma estrutura com lamelas de grafita envoltas por uma matriz ferrítica. Porém, normalmente as velocidades de resfriamento são intermediárias, o que resulta em estruturas híbridas, caracterizada na decomposição parcial da perlita e a estrutura é uma matriz perlítica com lamelas de grafita envolvidas por ferrita.

A temperatura eutetóide é quando durante o resfriamento uma fase sólida se transforma em duas outras fases sólidas. E austenita é a fase sólida não magnética constituída de ferro (CARDOSO, 2005).

De acordo com a norma ASTM A 247 (2019), a morfologia da grafita nos ferros fundidos cinzentos é subdividida em cinco tipos, como mostrada na Figura 14.

Figura 14 - Tipos de grafita presentes nos ferros fundidos cinzentos.



Fonte: Adaptado de Serbino (2005).

A norma ASTM A 247 (2019), refere-se ao método de teste padrão para avaliação da microestrutura da grafita em ferros fundidos, que se trata de um tipo de ensaio realizado para que se classifique a grafita em ferros fundidos em termos de tipo, distribuição e tamanho, abrangendo todas as ligas de ferro-carbono que contenham partículas de grafita. A Tabela 1 abaixo apresenta as características específicas de cada tipo de grafita ilustrada na Figura 14.

Tabela 1: Características dos tipos de grafita dos ferros fundidos cinzentos.

<b>Tipo</b>	<b>Característica</b>
A	Placas finas e uniformes, orientação randômica
B	Agrupados por rosetas (radial), orientação randômica
C	Lamelas grosseiras (primárias), orientação randômica
D	Segregada interdendricamente, orientação randômica
E	Segregada interdendricamente, orientação preferencial

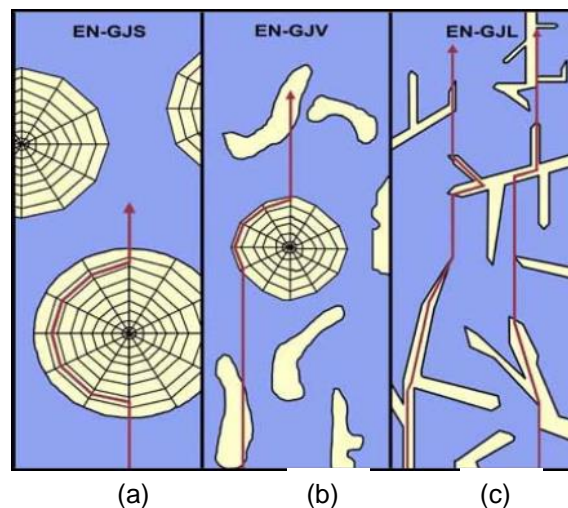
Fonte: Adaptado de Serbino (2005).

Existem mais condições favoráveis para se obter matrizes perlíticas quando a grafita presente for do tipo A, devido à maior distância de difusão do carbono. Já as matrizes ferríticas tendem a aparecer em grafita de maior super-resfriamento, como nos tipos D e

E, no qual a distância para difusão do carbono é menor. Neste caso, é a ferrita a responsável pela diminuição da resistência. Em grafita do tipo B pode conter ferrita no interior das rosetas de grafita, gerando pontos moles na estrutura, além da tendência à orientação radial das lamelas ser prejudicial à resistência da seção (SERBINO, 2005).

Ao dissipar calor de forma eficiente ocorre a diminuição do gradiente térmico da peça, com isso melhora-se o desempenho em âmbito da fadiga térmica. Isso pode ser explicado pela morfologia da grafita lamelar, pois a condutividade térmica é maior do que a matriz ferrítica ou perlítica e também maior do que a grafita nodular ou vermicular, pois a condutividade paralela ao seu plano basal é aproximadamente 4 vezes maior em relação ao seu plano prismático, conforme a Figura 15, além da conectividade do esqueleto da grafita, tipo lamelar (SERBINO, 2005).

Figura 15 - Transporte de calor em ferro fundido com grafita (a) nodular; (b) vermicular; (c) lamelar.



Fonte: Adaptado de Serbino (2005).

Costa (2014) diz ainda que, para aumentar as propriedades de resistência mecânica pode-se ainda adicionar elementos de liga. A introdução desses elementos e/ou a aplicação de tratamentos térmicos, influenciam na microestrutura da matriz metálica e, em alguns casos, pode-se originar a perlita fina, típica da martensita, e com isso melhorar as propriedades mecânicas do material.

De acordo com Minkoff (1983), o ferro fundido cinzento apresenta uma ampla faixa de composição química. Os teores de carbono (% em massa) estão usualmente entre (2,5 e 4,0) %; os de silício entre (1,0 e 3,0) %; os de manganês entre (0,2 e 1,0) %, e os de

cromo, entre (0,2 e 0,8) % e os teores máximos de fósforo e enxofre são geralmente menores que (0,02 e 1,0) %, respectivamente.

De acordo com Galárraga (2002), os automóveis são constituídos de discos de freio de três tipos de ferros fundidos cinzentos em sua produção:

- Ferros fundidos de baixo/médio carbono e alta resistência mecânica: Os ferros fundidos de baixo carbono contêm boa resistência ao trincamento, podendo conter ou não elementos de liga. Os discos sem elementos de liga são comumente utilizados nos carros de passeio e os de médio carbono são utilizados quando o espaço é limitado, por razões de condutividade térmica;
- Ferros fundidos de alto carbono e baixa resistência mecânica: Estes contêm maior condutividade térmica, podendo prevenir o aparecimento de trincas térmicas. São utilizados normalmente em carros de corrida, que por conta das altas velocidades e torques, possuem solicitações térmicas mais severas dos materiais;
- Ferros fundidos ligados: São adicionados elementos de liga, como Mo, Cr, Ni e Cu, no ferro fundido, com intuito de melhorar sua resistência à tração e a resistência a problemas de trincas térmicas.

Segundo Pompon (1997) e Chiaverin (1982) serão listadas algumas das propriedades mais importantes para discos de freios, propriedades estas que podem ser encontradas no ferro fundido cinzento o que justifica o grande uso desse material:

- Resistência térmica: O tipo de material utilizado no disco deve apresentar alta resistência à tensão térmica provocado pelo aquecimento e resfriamento no decorrer do uso do freio. Sendo assim, além da função da frenagem, o disco também se torna responsável por dissipar calor no sistema de freio de forma rápida e eficiente. Logo o material deve apresentar alta condutividade térmica. Portanto a melhor composição do material de um disco para atender esses requisitos seria um ferro fundido de alto carbono, baixo silício e de adição de molibdênio de forma a associar alta condutividade e excelente resistência a trincas térmicas;
- Resistência ao desgaste: Os pares tribológicos disco-pastilha devem apresentar uma alta durabilidade, mesmo quando submetidos a frenagens repetitivas, alta temperatura e alta velocidade. No decorrer do contato entre a superfície metálica

do disco com o material de atrito, estes devem suportar as tensões e resistir à abrasividade gerada pelo atrito dos materiais;

- Resistência mecânica: Os discos devem apresentar alta resistência mecânica e resistência à fadiga devido à grande repetitividade dos ciclos térmicos e mecânicos durante o uso;
- Usinabilidade: Após serem fundidos os discos necessitam de ajustes dimensionais, portanto quanto mais fácil para usinar esse material, maior será a produtividade e menor o custo, podendo ser a diferença entre a escolha de uso ou desuso de um determinado tipo de material;
- Capacidade de amortecimento: Este parâmetro está associado à capacidade do material de absorver vibração. Quando o material é sujeito a variações cíclicas de tensão interna, a propagação desta variação de tensão causa vibração. Se o material possuir capacidade de absorver parte dessa energia ao invés de simplesmente propagá-la, então estará atuando como amortecedor. Esta é uma das características mais importantes dos componentes de ferro fundido em relação aos aços forjados ou usinados, principalmente em situações em que, como no freio, existe a necessidade de absorção de vibrações como forma de amenizar problemas de ruído de alta frequência.

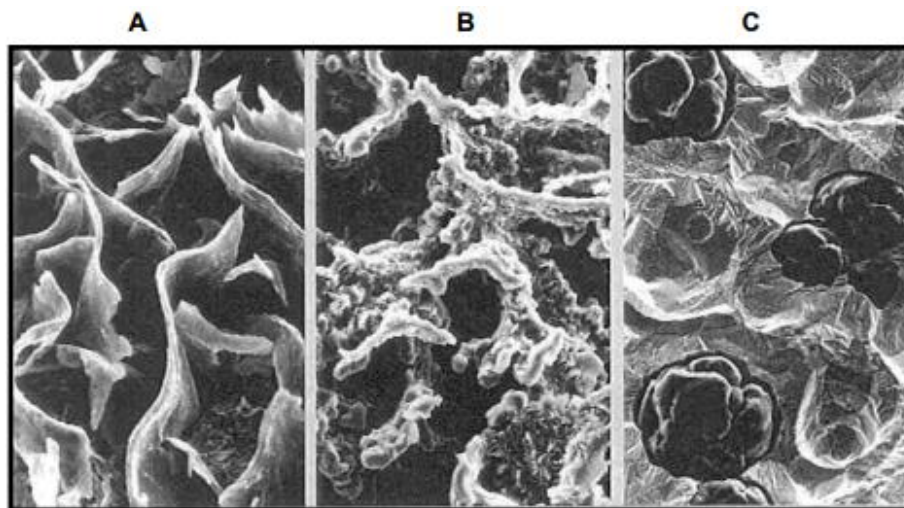
Além de ferros fundidos cinzentos, como já mencionado, outros materiais são opções de estudo para a produção de discos de freios automotivos, tais como ferros fundidos nodulares e vermiculares. Os ferros fundidos são basicamente ligas de ferro, silício e carbono contendo outros elementos de ligas tais como Mn, S e P, que influenciam rigorosamente nas propriedades das ligas resultantes (SANTOS e BRANCO, 1989).

Os ferros fundidos cinzentos possuem fases de austenita e grafita formadas na solidificação, no qual a grafita é em forma de veios. Já os ferros fundidos nodulares, a grafita se mostra em forma de nódulos no estado bruto de fusão, decorrente da adição de certos elementos químicos ou de condições particulares de fabricação, que influenciam a forma de crescimento da grafita. Por fim, nos ferros fundidos vermiculares a grafita se encontra na forma de vermes, representando uma forma intermediária entre a grafita em veios e em nódulos, obtidos no estado bruto de fusão, conseqüente da adição

de elementos de liga e controle do processo de solidificação (SANTOS e BRANCO, 1989).

O ferro fundido vermicular tem resistência à tração de no mínimo 75% maior e tenacidade 35% mais alta que o cinzento. Já comparado ao ferro fundido nodular, a resistência à tração e ductibilidade são similares ao vermicular e a condutividade térmica no nodular é bem inferior (PYE, 1992; GALÁRRAGA, 2002). Tais distinções se devem à morfologia da grafita como apresentado na Figura 16 abaixo.

Figura 16 - Microestrutura do ferro fundido cinzento (A), vermicular (B) e nodular (C).



Fonte: Marquard *et al.* (1998).

No ferro fundido cinzento os veios de grafita são todos interconectados e a razão de aspecto é elevada. No nodular as partículas de grafita estão isoladas, o que torna esta fase nula na colaboração da condutividade térmica e a razão de aspecto é próxima de 1, contribuindo de maneira significativa no aumento de suas propriedades mecânicas. E na vermicular apresenta-se um certo grau de conectividade e razão de aspecto intermediário entre cinzento e nodular (GALÁRRAGA, 2002).

$$\text{Razão de aspecto} = \frac{c}{a} \quad (2)$$

Sendo,  $c$  comprimento do veio e  $a$  largura do veio.

Como já mencionado, com a adição de elementos de liga é possível obter ferros fundidos cinzentos de alta qualidade. Os elementos de liga Si, Al, Ni e Cu são utilizados em ferros

fundidos e podem atuar como grafitizantes e os W, Mo, V e Cr possibilitam a formação de carbonetos eutéticos. A ação da maioria desses elementos fundamenta-se no aumento da quantidade de perlita na estrutura e na redução do espaçamento interlamelar deste microconstituente (obtenção de perlita mais fina) (BRANDÃO, 2014). À medida que o espaçamento diminui, o livre caminho médio da matriz para o deslocamento de discordâncias é reduzido, aumentando a dureza, o limite de resistência à tração e a resistência ao desgaste (OLIVEIRA, 2015).

Em concordância, Guessier *et al.* (2003) afirmam que o aumento da resistência ao desgaste nos ferros fundidos está associado a duas variáveis:

- O volume de grafita: O carbono funciona como um lubrificante sólido formando um filme sobre a superfície, reduzindo o coeficiente de atrito e o desgaste;
- A presença de uma matriz totalmente perlítica: Confere resistência mecânica ao material. O volume de grafita é limitado pela resistência mecânica que decresce com o aumento do volume de grafita. A obtenção da matriz 100% perlítica é garantida pelo uso de elementos de liga.

Segundo Canali (2002), com a adição de Ni, Cu e Mo pode-se melhorar a resistência à fadiga térmica dos discos de freio. Já com a adição de Cu e V, pode-se melhorar a resistência mecânica sem modificação da dureza (EN 1561, 1997). Com a adição de Cr e redução de Si é possível modificar a condutividade térmica dos discos de freio. E, por fim, o coeficiente de atrito pode ser modificado pela adição de Ti e a resistência ao desgaste e à corrosão é influenciada pela presença de Cr (SANTOS e BRANCO, 1989).

## 2.8 MECANISMOS DE DESGASTE NOS DISCOS DE FREIO

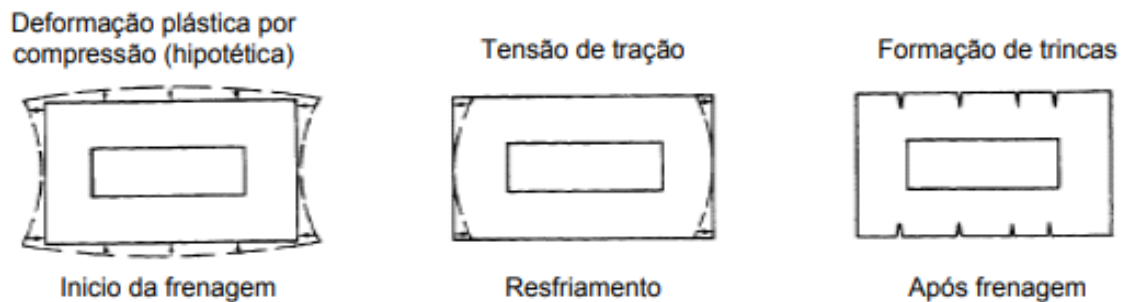
A pressão sob a interface da região de contato nos discos de freio, nas condições reais de frenagem, não se comporta de forma uniforme e varia com o tempo, modificada por uma combinação de distorções térmicas do calor de atrito, distorções mecânicas das forças atuantes, desgaste de material dos pares de contato e conseqüente formação de um filme de transferência, variação de espessura inicial da pista do disco e *runout* lateral. O *runout* lateral é o desalinhamento angular entre o acoplamento da pastilha e a pista do disco de freio. (SERBINO, 2005).

As distorções térmicas, geradas pelo calor de atrito, são mecanismos capazes de gerar desgaste, visto que a instabilidade termoelástica da superfície de deslizamento dos discos de freio acarreta na expansão de regiões contidas nesta superfície, e conseqüentemente expondo as mesmas ao desgaste, pelas variações de pressões de contato e atrito com elevação de temperatura pontuais (BARBER, 1967).

Segundo Maluf *et al.* (2006), os discos de freio são submetidos a três tipos de fadiga: a térmica, quando o componente está sujeito somente a variações bruscas de temperatura; a isotérmica, quando a temperatura é estável, porém a carga é variável; a termomecânica, quando a temperatura e a carga são variáveis.

Durante a frenagem do veículo, um mecanismo que também pode ocorrer é a formação de trincas geradas por fadiga térmica, conforme apresentado na Figura 17. Este mecanismo ocorre devido a geração de calor pelo atrito, que causa expansão na superfície do disco, onde seu núcleo permanece sob menor temperatura. Isto restringe a deformação desta região e permanece dentro de seu limite plástico do material. Em oposição, depois da superfície permanecer sob tensões compressivas, começa a contração térmica, o que resulta em tensões que trincam o material, no qual este fenômeno pode ser repetido por diversas vezes, gerando a propagação das trincas (SERBINO, 2005).

Figura 17 - Mecanismo de formação trincas térmicas.



Fonte: Fukano e Matsui (1986).

Yoshimoto e Tsukizoe (1957) observaram nos seus estudos que no desgaste moderado o mecanismo atuante é controlado pela oxidação da interface, resultando em partículas oxidadas e pistas de desgaste. Além disso, notou-se também que o desgaste severo, é causado pelo rompimento do filme de óxido protetivo formado durante o desgaste

moderado, o contato entre metais resulta em riscos grosseiros e eventuais trechos com microcavidades. Esta transição pode ser amenizada ou agravada de acordo com os elementos de liga utilizados.

No desgaste comum de discos, a superfície dos pares de contato fica impregnada de abrasivos do processo de desgaste. Em alguns casos, este ocorrido auxilia a limpeza da superfície de óxidos formados devido à longa não utilização (SERBINO, 2005).

## 2.9 ENSAIOS DE DESGASTE NOS FREIOS A DISCO

Para realizar ensaios de desgaste a fim de simular uma frenagem com aspectos reais dos sistemas de freios a disco, bem como analisar os materiais utilizados nos seus componentes de atrito, são utilizados os equipamentos dinamômetros inerciais e ensaios de desgaste do tipo pino sobre disco.

### 2.9.1 Dinamômetros inerciais

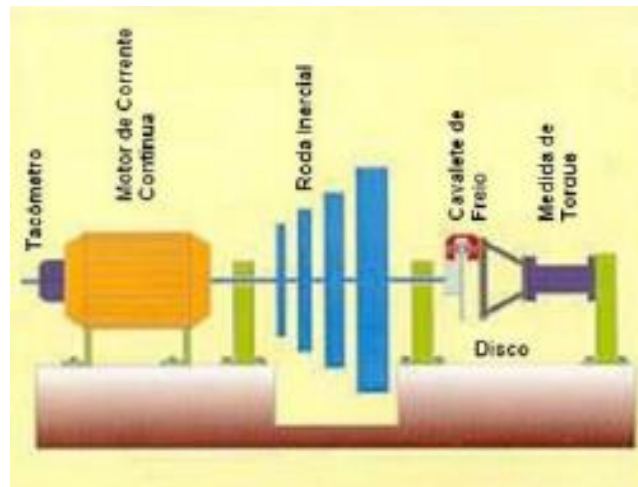
Os dinamômetros inerciais são equipamentos que simulam as condições de frenagem de um veículo, através do uso de rodas de inércia conectadas a um eixo. Na ponta do eixo gira o disco de freio como no veículo real, e acoplado a ele de forma fixa encontra-se o cavalete de freio, sendo que o mesmo está acoplado a uma célula de carga que mede o torque gerado na frenagem e que permite juntamente com outros parâmetros como pressão de frenagem e inércias utilizadas, determinar o coeficiente de atrito na frenagem (BREZOLIN, 2007).

Os dinamômetros inerciais funcionam basicamente acelerando os discos de inércia através do motor até a velocidade requerida e depois que o motor é desligado, o freio é acionado para atuar na desaceleração dos discos de inércia (ARRIECHE *et al.*, 2010).

Apesar dos dinamômetros inerciais serem os equipamentos para ensaios de materiais de freio que apresentam a melhor correlação com os resultados obtidos em caso real, sua desvantagem é que possuem um elevado custo (PRESTON e FORTHOFFER, 1971).

A Figura 18 apresenta o esquema de um dinamômetro inercial.

Figura 18 - Dinanômetro inercial.



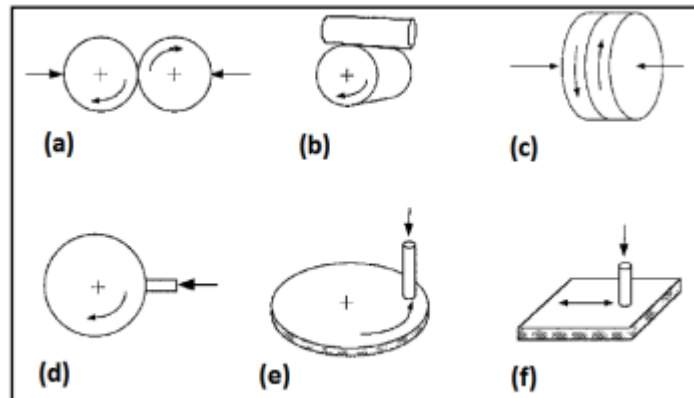
Fonte: Brezolin (2007).

### 2.9.2 Pino sobre disco

De acordo com Hutchings (1992), existem as formas geométricas de testes de desgaste por deslizamento conforme apresentado na Figura 19. Porém, é usual diferenciar as amostras do ensaio quanto à classificação de elementos simétricos ou assimétricos. A Figura 19a e Figura 19c ilustram ensaios utilizando amostras simétricas e as Figura 16d, Figura 19e e Figura 19f ilustram ensaios utilizando amostras assimétricas, que são mais comumente utilizados por conta do contato não ser uma característica dominante, por produzirem resultados diferentes até mesmo no próprio posicionamento da amostra durante o ensaio.

Por conta da simplicidade e flexibilidade empregadas nas condições do teste e das formas das amostras, a configuração assimétrica da metodologia de determinação do desgaste do tipo pino sobre disco (Figura 19e), é uma das metodologias de ensaio mais utilizadas para analisar o desgaste deslizante (AXÉN, HOGMARK e JACOBSON, 2001).

Figura 19 - Ensaio de desgaste por deslizamento.



Fonte: Adaptado de Hutchings (1992).

Na avaliação do comportamento do desgaste dos materiais, os parâmetros são controlados de forma a reproduzir, sem interferências externas, as condições de aplicabilidade do material. Na determinação de desgaste e atrito, um bom método adotado é o ensaio de desgaste de pino sobre disco, que consiste em introduzir uma força controlada exercida por um pino estático deslizando sobre um disco em giro constante de velocidade uniforme (ASTM G 99, 2004).

## 2.10 PROKNOW-C E MÉTODO COMPARATIVO

O ProKnow-C (*Knowledge Development Process - Constructivist*) é uma metodologia que possibilita realizar a seleção do portfólio bibliográfico, a análise bibliométrica e sistêmica do portfólio bibliográfico e a elaboração dos objetivos de pesquisa, feita por meio de pesquisa das principais palavras-chaves em diferentes bases de dados (AFONSO *et al.*, 2011). Esta metodologia é reconhecida como uma boa ferramenta de seleção de artigos e estes artigos selecionados podem fazer parte da composição da bibliografia de revisão, que tem como objetivo a elaboração de um artigo de revisão (SANTOS, 2015).

A metodologia ProKnow-C possibilita aprofundar o conhecimento sobre um determinado tema, bem como, auxilia na formação dos objetivos específicos e do objetivo geral. O emprego deste método possibilita direcionar a busca de artigos em periódicos qualificados, economizando o tempo de pesquisa e proporcionando um procedimento

estruturado, rigoroso e que minimiza o uso de aleatoriedade e subjetividade no processo de revisão bibliográfica (VILELA, 2011; AFONSO *et al.*, 2011).

Segundo Alves-Mazzoti (2002), a revisão de literatura ou revisão bibliográfica teria dois propósitos: a construção de uma contextualização para o problema e a análise das possibilidades presentes na literatura consultada para a concepção do referencial teórico da pesquisa, sendo que de acordo com Botelho, Cunha e Macedo (2011), o artigo de revisão pode ser do tipo integrativo, qualitativo, metanálise e sistemático, no qual os dois primeiros são o foco deste presente trabalho, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Tipos de artigos de revisão utilizados.

<b>Tipo</b>	<b>Definição</b>	<b>Propósito</b>
Revisão integrativa	Um sumário da literatura, num conceito específico ou numa área de conteúdo, em que a pesquisa é resumida, analisada e as conclusões totais são extraídas.	Revisar métodos, teorias, e/ou estudos empíricos sobre um tópico particular.
Revisão qualitativa	Um sumário de pesquisas passadas, que combina as descobertas de múltiplos estudos qualitativos.	Informar pesquisas ou práticas pelo resumo de processos ou experiências.

Fonte: Adaptado de Botelho, Cunha e Macedo (2011).

O método comparativo fundamenta-se na investigação de fenômenos, visando evidenciar as diferenças e semelhanças entre eles. Este método é amplamente utilizado na ciência pelo fato de possibilitar o estudo comparativo (GIL, 2008).

Sendo assim, pretende-se aplicar a metodologia ProKnow-C para selecionar literaturas e executar o método comparativo nas mesmas, com o intuito de realizar uma revisão do tipo integrativa e qualitativa, para observar se existem tendências de comportamento no controle do atrito com a variação dos parâmetros: carga normal, composição química e microestrutura.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais necessários para desenvolver a análise da influência da microestrutura, composição química e carga normal no controle de atrito nos sistemas de freios a disco são as literaturas obtidas através de pesquisa bibliográfica e o editor de planilhas *Microsoft Excel 2016*. Estas literaturas utilizadas como base obtiveram resultados experimentais por meio de ensaios realizados, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Literaturas analisadas.

<b>Autor</b>	<b>Ensaio Realizado</b>	<b>Tipo de trabalho</b>
Cueva <i>et al.</i> (2000)	Pino sobre disco	Artigo nacional
Serbino (2005)	Dinanômetro inercial	Trabalho acadêmico
Brandão (2014)	Dinanômetro inercial	Trabalho acadêmico
Oliveira (2015)	Dinanômetro inercial Pino sobre disco	Trabalho acadêmico

Fonte: Próprio autor (2022).

Na Tabela 4 encontram-se numerados os autores e seus materiais utilizados nos experimentos.

Tabela 4: Relação de autores e materiais ensaiados.

<b>Nº</b>	<b>Autor</b>	<b>Material</b>
1	Cueva <i>et al.</i> (2000)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Fe250
2	Cueva <i>et al.</i> (2000)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar FeAc
3	Cueva <i>et al.</i> (2000)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar FeTi

<b>4</b>	Cueva <i>et al.</i> (2000)	Ferro fundido vermicular matriz perlita e ferrita com grafita vermicular e traços nodular
<b>5</b>	Serbino (2005)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar
<b>6</b>	Oliveira (2015)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Sb (0) Dinanômetro inercial
<b>7</b>	Oliveira (2015)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Sb (0,010) Dinanômetro inercial
<b>8</b>	Oliveira (2015)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Sb (0,025) Dinanômetro inercial
<b>9</b>	Oliveira (2015)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Sb (0,040) Dinanômetro inercial
<b>10</b>	Oliveira (2015)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Sb (0) Pino sobre disco
<b>11</b>	Oliveira (2015)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Sb (0,010) Pino sobre disco
<b>12</b>	Oliveira (2015)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Sb (0,025) Pino sobre disco
<b>13</b>	Oliveira (2015)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Sb (0,040) Pino sobre disco
<b>14</b>	Brandão (2014)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Fe250
<b>15</b>	Brandão (2014)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar FeTi
<b>16</b>	Brandão (2014)	Ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar FeAc

De acordo com esses estudos pode-se observar as diferentes composições químicas e microestruturas usadas para a confecção do disco de freios automotivos, conforme Tabela 5 e Tabela 6 como numerado na Tabela 4.

Tabela 5: Composição química dos discos de freio estudados.

	<b>%C</b>	<b>%S</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%Cu</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Ti</b>	<b>%Sn</b>	<b>%Mo</b>	<b>%Ni</b>	<b>%Sb</b>	<b>%CE</b>
<b>1</b>	3,54	0,1	2,15	0,51	0,054	0,69	0,034	0,012	0,061	-	-	-	4,27
<b>2</b>	3,73	0,085	2,07	0,78	0,058	0,56	0,27	0,014	0,039	-	-	-	4,44
<b>3</b>	3,49	0,09	2,27	0,53	0,052	0,71	0,06	0,028	0,064	-	-	-	4,26
<b>4</b>	3,63		2,6	0,51	-	0,47	-	< 0,1	-	-	-	-	4,49
<b>5</b>	3,36	0,10	2,11	0,53	0,049	0,030	0,062	-	-	0,014	0,022	-	4,08
<b>6</b>	3,45	0,041	1,94	0,73	0,05	-	-	-	-	-	-	0,0053	4,11
<b>7</b>	3,40	0,037	1,94	0,73	0,05	-	-	-	-	-	-	0,012	4,06
<b>8</b>	3,41	0,044	1,93	0,73	0,05	-	-	-	-	-	-	0,021	4,07
<b>9</b>	3,38	0,041	1,93	0,73	0,049	-	-	-	-	-	-	0,043	4,04
<b>10</b>	3,45	0,041	1,94	0,73	0,05	-	-	-	-	-	-	0,0053	4,11
<b>11</b>	3,40	0,037	1,94	0,73	0,05	-	-	-	-	-	-	0,012	4,06
<b>12</b>	3,41	0,044	1,93	0,73	0,05	-	-	-	-	-	-	0,021	4,07
<b>13</b>	3,38	0,041	1,93	0,73	0,049	-	-	-	-	-	-	0,043	4,04

Fonte: Próprio autor (2022).

Tabela 6: Microestrutura dos discos de freio estudados.

	1	2	3	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>% Grafita</b>	10,5	13,5	12,5	20	23	21	20	21	23	23	18	16,5	15,5	12,5
<b>Tipo de Grafita</b>	IA3	IA3	IA3	IVA	VA	VA	IVA	VA	VA	IVA	VA	IA	IA	IA
<b>% Perlita</b>	88	85	86	64	67	71	72	59	60	63	73	84	85	88
<b>% Ferrita</b>	<1	<1	<1	16	10	-	-	20	10	-	-	<1	<1	<1
<b>% Cementita</b>	-	-	-	-	-	8	8	-	-	14	9	-	-	-

Fonte: Próprio autor (2022).

Cueva *et al.* (2000) utilizaram o ensaio de pino sobre disco em 4 materiais para disco diferentes: ferros fundidos cinzentos perlíticos com grafita lamelar Fe250, FeAc e FeTi e ferro fundido vermicular matriz perlita e ferrita com grafita vermicular e traços nodular, cujo a composição química e microestrutura são apresentadas nas Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. A microestrutura do seu material de numeração 4, conforme numerado na Tabela 4, é 7,0% de grafita, sendo 90% do tipo IIIA5 e 10% do tipo VIA6, 78% de perlita e 14% de ferrita. Já sobre o pino utilizado como pastilha, o autor expôs que as análises químicas deste exibiram a predominância do ferro e pequenas proporções de alumínio, enxofre, silício, cálcio, magnésio e bário.

Os ensaios de desgaste de Cueva *et al.* (2000) foram realizados com o disco girando a 500 rpm por 3 minutos e sujeito a uma pressão cíclicas de 4 MPa por 1 minuto, com um total de 500 ciclos de frenagem (carregamento-descarregamento) em um tempo total de ensaio de 34 horas e medição da quantidade de perda de massa após 7, 20 e 34 horas de ensaio.

Serbino (2005) focou em analisar disco apenas de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar, no qual a composição química é mostrada na Tabela 5. Já a microestrutura do seu material é 97% I A  $\frac{4}{5}$  + 2% I C  $\frac{4}{5}$  + 1% grafita com forma não

definida. E a composição química da pastilha é constituída de 20,68% LOI, 18,5% Ba, 16,3% Al, 12,8% Fe, 9,2% Cu, 6,2% Si, 6,1% S, 3,7% Ca, 3,5% Sb, 1,3% Zn e 1,2% Mg.

O ensaio de desgaste de Serbino (2005) no simulador dinanométrico inercial foi realizado com velocidade inicial de 100 km/h e sujeito a uma pressão cíclica de 2 a 10 MPa, o que resultou em uma força normal aplicada nas pastilhas de 650 a 3300N.

De acordo com a metodologia de Brandão (2014), foi realizado ensaios com 3 materiais de disco diferentes: ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar Fe250, FeTi e FeAc, no qual as composições químicas não foram divulgadas por se tratar de segredo industrial e a microestrutura é apresentada na Tabela 6. Já a pastilha era constituída de 25% de grafita, 12% de fibra de ferro e 5% de latão.

Os parâmetros utilizados por Brandão (2014) nos ensaios dos materiais respeitam a norma SAE J2522 e foram de velocidade fixa de 80 km/h do dinanômetro inercial e pressão hidráulica de frenagem fixa de 2 MPa até alcançar 30 km/h. No total foram realizados 200 ciclos de frenagem em cada disco e a medição de perda de massa a cada 50 ciclos.

O material utilizado no disco por Oliveira (2015) foi o ferro fundido de classe FC25, sendo 1 amostra de referência sem adição de antimônio e 3 amostras com 0,010%, 0,025% e 0,040% de antimônio, sendo que os 4 materiais passaram pelos 2 tipos de ensaio: pino sobre disco e dinanômetro inercial. A composição química e microestrutura destes materiais de referência são apresentadas nas Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente. Nos materiais de atrito, o autor limitou-se a informar que eram pastilhas sinterizadas e pino de metal duro.

No ensaio de pino sobre disco, Oliveira (2015) utilizou uma rotação de 500 rpm e carga normal de 50N. Já o ensaio no dinanômetro inercial, foram divididos em 6 etapas:

- Primeira etapa: Temperatura: 80 °C; Ciclo: 60 frenagens; Pressão: 6 MPa;
- Segunda à sexta etapa: Temperatura: 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C e 100 °C; Ciclo: 500 frenagens; Desaceleração:  $2 m/s^2$ .

## 3.2 MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, o primeiro procedimento realizado foi um levantamento bibliográfico, utilizando a metodologia ProKnow-C, que consiste em pesquisar palavras-chave em diferentes bases de dados, sendo que foram utilizados a biblioteca virtual da USP, portais de revistas Science Direct e SciELO (Biblioteca Eletrônica Científica Online) e a plataforma Google Scholar (Google Acadêmico), com publicações no período de 2002 a 2022.

As palavras-chave aplicadas na pesquisa bibliográfica foram: discos de freio, ferro fundido cinzento, freios automotivos e força de atrito. Através desta pesquisa, foram selecionadas no total 15 literaturas, entre artigos nacionais, artigos internacionais e trabalhos acadêmicos, que posteriormente foram filtradas, devido a riqueza e complexibilidade de dados necessários para a revisão bibliográfica integrativa e qualitativa empregada neste trabalho, restando 4 literaturas para a análise (Tabela 3), com um total de 16 ensaios de desgaste analisados (Tabela 4).

Com as literaturas selecionadas, foi elaborada uma planilha de dados no *Microsoft Excel 2016*, que consiste dos tópicos semelhantes mais relevantes encontrados na leitura aprofundada das mesmas e que, posteriormente, foram organizados em forma de texto para embasar o referencial teórico do trabalho.

Afim de analisar como os parâmetros de microestrutura, composição química e carga normal influenciam no controle do atrito nos freios a disco, bem como, o comportamento das variáveis força de atrito, coeficiente de atrito e taxa de desgaste, será aplicado o método comparativo nos resultados dos experimentos das literaturas apresentadas no capítulo de materiais deste trabalho.

Dos trabalhos analisados foram extraídas as seguintes propriedades para a aplicação do método comparativo: microestrutura, composição química, velocidade, carga normal e/ou pressão de frenagem, dureza, resistência à tração, taxa de desgaste, força de atrito e coeficiente de atrito. Além destas, também foram comparadas as análises da superfície de desgaste (tribografia) e das camadas superficiais dos discos resultante do tribocontato (região de tribocontato).

Para o desenvolvimento da análise comparativa foram elaborados gráficos dos resultados de desgaste dos discos e das pastilhas dos trabalhos estudados, tabela de propriedades mecânicas dos materiais e tabela de forças de atrito e coeficientes de atritos provenientes do contato, organizados no *Microsoft Excel 2016*, e utilizado como ferramenta de comparação o embasamento teórico adquirido.

Este presente trabalho visa elaborar uma revisão integrativa e qualitativa, aplicando o método comparativo, com base nas propriedades disponibilizadas nas literaturas utilizadas, conforme apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades analisadas.

<b>Autor</b>	<b>Ensaio Realizado</b>	<b>Propriedades Analisadas</b>
Cueva <i>et al.</i> (2000)	Pino sobre disco	Desgaste dos pinos e discos (perda de massa) Força de atrito Coeficiente de atrito Tribografia
Serbino (2005)	Dinanômetro inercial	Desgaste das pastilhas e discos (perda de massa) Tribografia Microestrutura após frenagem Força de atrito Coeficiente de atrito
Brandão (2014)	Dinanômetro inercial	Desgaste das pastilhas e discos (dimensional) Força de atrito Coeficiente de atrito
Oliveira (2015)	Pino sobre disco	Desgaste dos discos (perda de massa) Força de atrito Coeficiente de atrito Tribografia
Oliveira (2015)	Dinanômetro inercial	Desgaste das pastilhas e discos (dimensional) Coeficiente de atrito

Fonte: Próprio autor (2022).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas dos materiais usados para a confecção do disco dos trabalhos analisados conforme Tabela 4, que serão utilizados para as discussões dos resultados obtidos.

Tabela 8: Propriedades mecânicas dos materiais analisados.

<b>Nº</b>	<b>Dureza</b>	<b>Unidade</b>	<b>Resistência à Tração</b>	<b>Unidade</b>	<b>Grafita (%)</b>
1	190	HB	255	MPa	10,5
2	180	HB	240	MPa	13,5
3	190	HB	255	MPa	12,5
4	230	HB	460	MPa	7
5	Superfície 215-234 Núcleo 200-220	HB5/750 HB5/750	Pista 289-300 Cubo 226-238	MPa MPa	3
6	229	HV	230	MPa	20
7	231	HV	254	MPa	23
8	249	HV	264	MPa	21
9	273	HV	272	MPa	20
10	172	HV	230	MPa	21
11	198	HV	254	MPa	23
12	213	HV	264	MPa	23
13	221	HV	272	MPa	18
14	203	HB	-	-	16,5

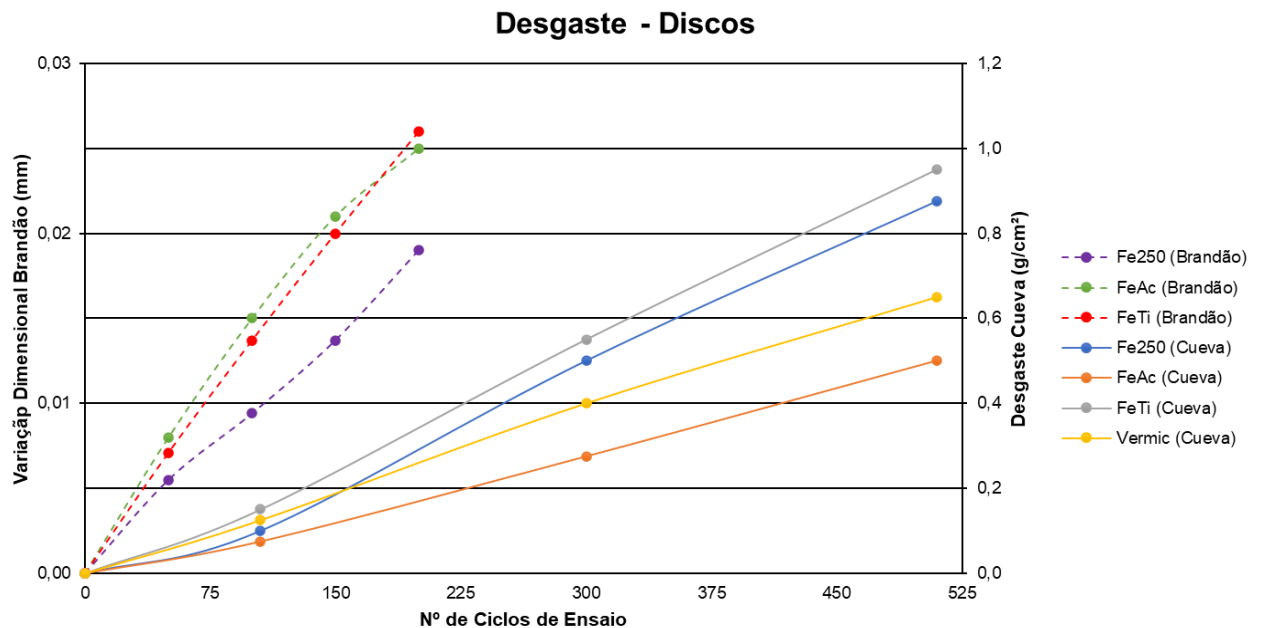
15	237	HB	-	-	15,5
16	215	HB	-	-	12,5

Fonte: Próprio autor (2022).

#### 4.1 ANÁLISE DOS DESGASTES

A Figura 20 ilustra o desgaste dos discos ensaiados por Cueva *et al.* (2000) e Brandão (2014), sendo apresentados no eixo secundário (à direita) e no eixo principal (à esquerda), respectivamente.

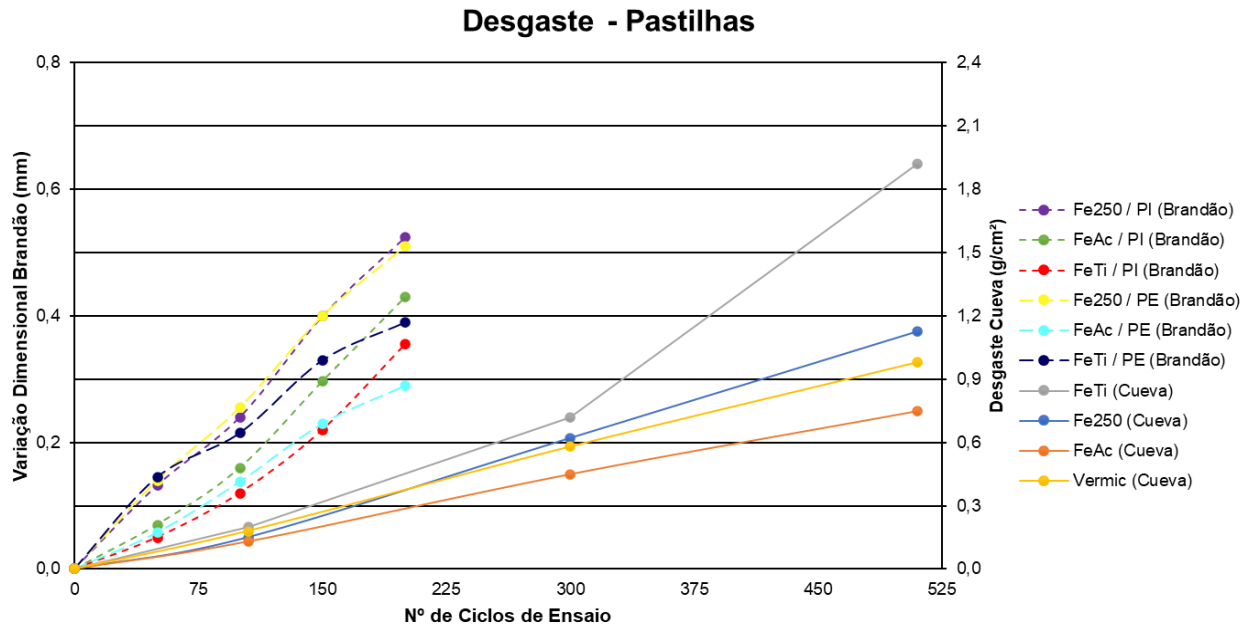
Figura 20 - Desgaste do discos de freio.



Fonte: Próprio autor (2022).

A Figura 21 ilustra o desgaste das pastilhas ensaiadas por Cueva *et al.* (2000) e Brandão (2014), apresentados no eixo secundário (à direita) e no eixo principal (à esquerda), respectivamente.

Figura 21 - Desgaste das pastilhas de freio.



Fonte: Próprio autor (2022).

Com os ensaios, Cueva *et al.* (2000) notaram que nos discos e nos pinos, o desgaste apresentou um aumento aproximadamente uniforme com o aumento do tempo de ensaio, Figura 20 e Figura 21. Nos discos, a resistência ao desgaste foi maior no FeAc, seguido do vermicular, Fe250 e FeTi, ou seja, disco de FeAc obteve o menor desgaste e disco de FeTi o maior, apresentado na Figura 20.

Cueva *et al.* (2000) observaram que o comportamento do desgaste dos pinos foi condizente ao comportamento do desgaste dos discos, ou seja, os pinos ensaiados com discos de FeAc obtiveram menor desgaste, seguido por pinos ensaiados com vermicular, Fe250 e FeTi (Figura 21), afirmando que quanto maior a resistência ao desgaste do material do disco, menor será o desgaste do pino.

Os pinos ensaiados com discos de FeTi sofreram desgastes mais severos comparados aos outros, fato que foi justificado pela presença de carbonitretos de titânio na microestrutura destes discos, caracterizados como partículas duras dispersas na matriz metálica (consideravelmente macia). Deste modo, no processo de frenagem estas partículas se soltam dos discos e se fixam na superfície do pino, atuando como partículas abrasivas e acelerando o desgaste dos discos (desgaste abrasivo por deslizamento,

conforme seção 2.1.1). Isto explica o maior desgaste tanto dos discos de FeTi quanto dos pinos ensaiados sobre os mesmos.

Chapman e Mannion (1982) e Pye (1992), afirmam que teores de Ti menores que 0,015% formam no material menos de 40 partículas duras por mm<sup>2</sup>, provocando altos desgastes, enquanto teores maiores que 0,025%, formam mais de 60 partículas duras por mm<sup>2</sup>, promovendo baixos desgastes. Isto é, o comportamento do desgaste de FeTi depende do teor de Ti presente na sua composição química, onde no processo de desgaste, estas quantidades menores de partículas duras dificultam a distinção entre matriz e carboneto de titânio, gerando maior desgaste. Já as quantidades maiores dessas partículas protegem a matriz (ZUM GAHR, 1987).

Apesar de menores dureza e resistência à tração (Tabela 8), dentre os materiais de Cueva *et al.* (2000), o menor desgaste do FeAc se deve à maior teor de grafita (Tabela 6 e Tabela 8), caracterizado como lubrificante sólido, o que diminui o atrito entre disco e pino e facilita a dissipação de calor (conforme seção 2.7).

Já o ferro fundido vermicular apresentado em Cueva *et al.* (2000), mesmo com dureza e resistência mais elevadas, obteve resistência ao desgaste menor que o FeAc, por conta do menor teor de grafita (Tabela 6 e Tabela 8), resultando em camadas de grafita lubrificantes mais finas ou descontínuas que expõem mais a matriz ao desgaste e promovem maiores perdas de massa e pelo maior teor de ferrita, fase muito macia que se solta ligeiramente da superfície dos discos, facilitada ainda pelas altas temperaturas e tardia dissipação de calor.

Brandão (2014) mostra que, como o desgaste variou a cada 50 ciclos de ensaio, no desgaste acumulado dos discos e das pastilhas houve um aumento praticamente uniforme com o aumento do número de ciclos, com uma pequena inclinação (Figura 20 e Figura 21), comportamento também apresentado em Cueva *et al.* (2000).

Em Brandão (2014), independentemente do tipo de material, o desgaste dos discos foi praticamente o mesmo, onde há uma leve superioridade na resistência ao desgaste do Fe250, seguidos dos FeAc e FeTi (desgastes iguais). Como particularidades, Brandão (2014) justificou a maior resistência ao desgaste do Fe250 pelo maior teor de grafita, Tabela 6 e Tabela 8, o que como já visto serve como lubrificante sólido protegendo a

superfície do disco do desgaste, justificativa também adotada nas discussões dos resultados de Cueva *et al.* (2000).

Apesar de Cueva *et al.* (2000) e Brandão (2014) trabalharem com os mesmos materiais, podemos perceber que o comportamento do desgaste dos discos não foi totalmente igual, isto possivelmente se justifica pelos diferentes teores de grafita para o mesmo material em cada trabalho, Tabela 6 e Tabela 8.

Por conta das pastilhas de freio serem compostas de material heterogêneo, com baixa dureza e fácil de se desintegrar, foi difícil realizar a análise precisa do desgaste das pastilhas, o que fez Brandão (2014) concluir que o desgaste foi basicamente igual independente do material de disco de freio utilizado ou da posição da pastilha (interna ou externa).

Em Brandão (2014), o desgaste semelhante dos discos de ferro fundido cinzento estudados possivelmente pode ser explicado pelas microestruturas parecidas, com matrizes praticamente 100% perlítica e com grafita de tamanhos e formas similares. Esta perspectiva, juntamente com a justificativa apresentada no parágrafo anterior, consequentemente explicaria porque as pastilhas ensaiadas também obtiveram desgastes semelhantes entre si, visto que todos os pares discos-pastilhas utilizaram pastilhas de mesma composição química e mesmos parâmetros de ensaio, conforme capítulo de materiais e métodos.

Em discordância ao afirmado por Cueva *et al.* (2000), pode-se perceber, pelas Figura 20 e Figura 21, que em Brandão (2014) o comportamento do desgaste das pastilhas não foi condizente ao comportamento do desgaste dos discos, mostrando que não há como afirmar uma correlação entre a resistência ao desgaste do material do disco com o desgaste da pastilha.

Cueva *et al.* (2000) e Brandão (2014) focaram em mostrar o desgaste de 3 materiais a uma força normal constante. Já em Serbino (2005), foi ensaiado 1 material de disco em forças normais variáveis, onde notou-se que sua resistência ao desgaste tem uma relação inversamente proporcional à força normal aplicada, apresentando maiores valores de desgaste quanto maior esta força, porém com transições em seu regime por conta da alteração dos mecanismos predominantes.

No ensaio de Serbino (2005), ocorreu os seguintes comportamentos do desgaste com a mudança de força normal:

- Cargas normais baixas (620 a 1600N): A taxa de desgaste se manteve praticamente constante, pela formação da camada de lubrificação (camada de óxidos), sendo observado na superfície dos discos um aumento da profundidade dos riscos, caracterizando o regime de microsulcamento;
- Cargas normais intermediárias (1600 a 2600N): A taxa de desgaste aumenta de forma abrupta, evidenciando uma mudança no regime de desgaste de microsulcamento para desenvolvimento de proa ou microcorte;
- Cargas normais elevadas (2600 a 3300N): Ocorre uma pequena redução nas taxas de desgaste, motivado pela degradação da parte orgânica das pastilhas (conforme seção 2.5 e 3.1), que atuam como lubrificantes e também pelo endurecimento superficial, devido surgimento de uma fina camada mais resistente à abrasão. Esta camada representa uma transformação de fase típica martensítica, devido a um processo termomecânico, em concordância ao abordado na seção 2.7.

Nos seus ensaios, Serbino (2005) reparou que o sistema tribológico causou severas condições de carregamento térmico e deformação plástica, que influenciam na atuação dos mecanismos de desgaste nas superfícies dos discos, sendo os principais: abrasivos, oxidativos e de fadiga, conforme apresentados no parágrafo anterior e na seção 2.1.

No ensaio de pino sobre disco de Oliveira (2015), constatou-se que Sb(0) e Sb(0,010) (com ferrita na matriz) sofreram maior perda de massa que Sb(0,0250) e Sb(0,040) (perlíticas), isto porque nestas a ferrita se solta facilmente da superfície dos discos e deixa vazios que podem acelerar o desgaste, assim como observado nos resultados de Cueva *et al.* (2000). Já em maiores teores de antimônio, a ferrita se ancora pela cementita, o que proporciona maior resistência ao desgaste. Em concordância a esse comportamento, quanto maior o teor de antimônio, maior a resistência ao desgaste e menor a profundidade de desgaste.

Nos resultados dos ensaios de pino sobre disco de Oliveira (2015), apesar do aumento de cementita nas amostras Sb(0,0250) e Sb(0,040), Tabela 6, a perda de massa dos

discos se manteve constante, justificado pela grande influência da perlita na resistência ao desgaste dos ferros fundidos cinzentos.

Pelo ensaio com dinamômetro inercial de Oliveira (2015), os parâmetros de ensaio apresentados no capítulo de materiais deste presente trabalho, foram determinados para analisar o desgaste das pastilhas, onde os discos resultaram em desgastes desprezíveis. Nas pastilhas observou-se que com o aumento do teor de antimônio do disco de freio, ocorreu a redução do desgaste da pastilha, onde as pastilhas ensaiadas com Sb(0,025) e Sb(0,040) sofreram desgaste inferior ao desgaste da pastilha ensaiada com Sb(0). Deste modo, resultado semelhante ao ensaio pino sobre disco, reconhecendo então a influência do antimônio nas taxas de desgaste.

#### 4.2 ANÁLISE DAS FORÇAS DE ATRITO E DOS COEFICIENTES DE ATRITO

A Tabela 9 apresenta as forças de atrito e os coeficientes de atrito encontrados nos ensaios de desgaste dos pares disco-pastilha dos trabalhos analisados, conforme Tabela 4.

Tabela 9: Forças de atrito e coeficientes de atritos dos materiais analisados.

<b>Nº</b>	<b>Força de Atrito (N)</b>	<b>Coefficiente de Atrito</b>
<b>1</b>	307 ± 15	0,51 ± 0,03
<b>2</b>	259 ± 11	0,43 ± 0,02
<b>3</b>	309 ± 22	0,52 ± 0,04
<b>4</b>	278 ± 13	0,47 ± 0,02
<b>5</b>	235,6 a 608 960 a 1560 988 a 1254	0,38 0,60 0,38
<b>6</b>	≅ 20	≅ 0,35
<b>7</b>	≅ 25	≅ 0,40

<b>8</b>	$\cong 30$	$\cong 0,50$
<b>9</b>	$\cong 35$	$\cong 0,60$
<b>14</b>	460	-
<b>15</b>	420	-
<b>16</b>	520	-

Fonte: Próprio autor (2022).

Cueva *et al.* (2000), verificaram que a força de atrito e coeficiente de atrito tiveram uma relação diretamente proporcional com o desgaste dos discos e uma relação inversamente proporcional com a resistência ao desgaste dos discos, ou seja, quanto maior a força de atrito e o coeficiente atrito, maior o desgaste medido e menor a resistência ao desgaste e vice-versa.

Em Cueva *et al.* (2000), no par pino-disco de FeTi, os maiores valores de coeficiente de atrito e forças de atrito (como mostrado na seção 2.7), juntamente com a influência dos carbonitreto de titânio, explicariam o maior desgaste apresentado por estes discos, visto que as forças de atrito estão concernentes à quebra da camada de grafita lubrificante por conta da ação das partículas de carbonitreto de titânio, que removem esta camada e expõem a matriz metálica aos abrasivos.

Conforme já mencionado, Chapman e Mannion (1982) e Pye (1992), afirmam que teores de Ti menores que 0,015% provocam altos valores de atrito, enquanto teores maiores que 0,025% provocam baixos valores de atrito.

Em Cueva *et al.* (2000), de acordo com o coeficiente de atrito, força de atrito e desgaste medidos nos discos de Fe250, este possui o melhor conjunto de propriedades de frenagem, isto porque mesmo com maior desgaste que o FeAC e o ferro fundido vermicular, possui um desempenho bem uniforme durante todos os ciclos, agregado à alta força de atrito e baixas temperaturas de funcionamento.

Quanto à força de atrito obtida em Brandão (2014), é possível observar que os valores foram semelhantes para todos os discos, justificado pelas suas semelhanças na

microestrutura, como já mencionado, sendo que a maior força de atrito foi do FeAC, seguidos dos Fe250 e do FeTi. Estes resultados poderiam ser justificados pelo teor de grafita presente em cada material, Tabela 6 e Tabela 8.

De acordo com Brandão (2014), sobre o comportamento da força de atrito, temos:

- O disco de FeAC possui o menor teor de grafita dentre os seus materiais, Tabela 6 e Tabela 8, o que sugere que possuem mais superfície metálica (matriz perlítica) em contato com a pastilha, acarretando em maior força de atrito;
- O disco de Fe250 possui o maior teor de grafita, Tabela 6 e Tabela 8, que funcionaria como bom lubrificante e diminuiria a força de atrito, era esperado que este alcançasse menores forças de atrito;
- O disco de FeTi possui teor de grafita intermediário, o que sugeriria que a força de atrito também fosse intermediária. Em contrapartida, o FeTi mostrou-se o material com menor força de atrito, no qual explica que isto se dá por conta da maior dureza deste material, afirmando que maior dureza conduz a menor coeficiente de atrito e força de atrito.

Entretanto, segundo Zum Gahr (1987) e Hutchings; Shipway (2017), não existe uma correlação de influência significativa entre coeficiente de atrito e dureza que possa confirmar uma tendência entre os mesmos. Portanto, isto mostra que também não é possível afirmar o que foi relatado no ensaio de pino sobre disco de Oliveira (2015), que observou que quanto maior a dureza do disco maior o coeficiente de atrito.

Porém, a adição de antimônio é acompanhada do aumento do percentual de perlita, que influencia diretamente na dureza e na resistência dos ferros fundidos. Por consequência, no ensaio de pino sobre disco, Oliveira (2015) diz que:

- No Sb(0) e Sb(0,010) (com ferrita na matriz), com menor resistência mecânica e menor dureza, Tabela 8, a ferrita se solta com mais facilidade da superfície e deixa vazios que facilitam o progresso do desgaste;
- No Sb (0,025) e Sb (0,040) (perlítica), com maior resistência à tração e maior dureza, Tabela 8, a ferrita se ancora pela cementita, promovendo maior resistência ao desgaste. À medida que acontece este desgaste, a área de contato e a resistência ao deslizamento aumentam, aumentando o coeficiente de atrito.

Ou seja, Oliveira (2015) verificou que o coeficiente de atrito e a força de atrito aumentam com o aumento do teor de antimônio (Tabela 9), agregado ao aumento do teor de perlita (Tabela 6) e, conseqüentemente, da dureza e da resistência mecânica (Tabela 8).

Em seu ensaio de dinamômetro inercial, Oliveira (2015) observou que o coeficiente de atrito aumenta com o acréscimo da temperatura de ensaio. Após o resfriamento, o coeficiente de atrito da pastilha retorna ao seu valor original, comportamento conhecido como recuperação.

Serbino (2005) notou que os valores de coeficiente de atrito médio são modificados com o aumento da força normal, devido às alterações nos mecanismos de desgaste predominantes, sendo que o seu maior valor foi encontrado em forças normais intermediárias. Isto porque, há um aumento da força de atrito para gerar maior desgaste de material do disco por microcorte. Já nas cargas normais elevadas, o incremento na força de atrito foi menor por conta da redução da taxa de desgaste e riscamento, ou seja, houve uma lubrificação por degradação da pastilha e formação de camada superficial dura (fase martensítica).

#### 4.3 ANÁLISE DAS TRIBOGRAFIAS E DOS TRIBOCONTATOS

Nas superfícies dos discos, após os ensaios de desgaste, Cueva *et al.* (2000) observaram aderências provenientes de restos de pino desprendidos na frenagem. Estas funcionam como uma camada isolante ou filme lubrificante entre as superfícies de contato, protegendo do desgaste e diminuindo a força de atrito, comportamento também observado em Serbino (2005). De todos os materiais de Cueva *et al.* (2000), a quantidade de aderências nas superfícies foi maior no ferro fundido vermicular.

Cueva *et al.* (2000) também verificaram que grande número de veios ou vermes de grafita foram recobertas por camadas de matriz metálica deformadas plasticamente. Os extremos das lamelas de grafita funcionam como concentradores de tensões que facilitam a nucleação e propagação de trincas.

De acordo com Serbino (2005), a deformação plástica gerou o escoamento da matriz metálica, que atua de forma a comprimir e extrudar a lamela de grafita em direção à superfície, com posterior colapso do volume anteriormente ocupado por esta fase e o

selamento por tensões residuais compressivas nas camadas superficiais. Serbino (2005) percebeu então que a plastificação fez com que ocorresse um encobrimento da grafita pela matriz metálica, confirmando o fato também observado em Cueva *et al.* (2000), conforme parágrafo anterior.

Após o ensaio de pino sobre disco de Oliveira (2015), foi observado que o desgaste das pistas se deu de forma homogênea e que na pista de desgaste havia material laminado (desgaste adesivo, conforme seção 2.1) movido de um local para outro, por conta do esforço compressivo do ensaio. Isto porque, a matriz perlítica junto ao intenso esforço compressivo do ensaio gera fragmentos em forma de placas que se aderem à superfície da pista de ensaio.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos na revisão integrativa e qualitativa, aplicando o método comparativo, dos parâmetros tribológicos que influenciam no controle do atrito, foi possível chegar às seguintes constatações:

- Os FeTi possivelmente são influenciados pela presença de carbonitretos de titânio na microestrutura destes discos, mostrando uma tendência de redução do atrito e do desgaste em valores acima de 0,02% de Ti;
- A presença de grafita na microestrutura influencia a força de atrito e o desgaste, por funcionar como lubrificante sólido. Ou seja, há uma tendência de que quanto maior o teor de grafita, menor a perda de massa e a força de atrito;
- Os Fe250, FeAc e FeTi possuem microestruturas parecidas, resultando em propriedades mecânicas e desempenho de frenagem muito semelhantes. Logo, o Fe250 possui o melhor conjunto de propriedades de frenagem e custo benefício, porque mesmo não possuindo o melhor desempenho em todas as variáveis, se mantém uniforme durante os ciclos, o que não justifica o custo e tempo adicional para obter o FeAc ou o FeTi;
- Apesar de não existir correlação direta entre dureza e coeficiente de atrito, é comum que materiais frágeis tenham superfície com menos asperezas, devido ao acabamento da superfície e, por isso, menor coeficiente e força de atrito;
- De modo geral, a taxa de desgaste e a força de atrito são diretamente proporcionais à carga normal, apresentando transições de regime ligadas à modificação de mecanismos de desgaste, sendo os principais: abrasivos, oxidativos e de fadiga;
- Há uma tendência de presença de aderências provenientes dos pinos/pastilhas após frenagem, que funcionam como filme lubrificante, protegendo do desgaste e diminuindo a força de atrito;
- A adição de antimônio é acompanhada do aumento do percentual de perlita, que diminui a perda de massa e a profundidade de desgaste dos discos e aumenta a resistência ao desgaste, o coeficiente de atrito e a força de atrito, bem como, reduz o desgaste das pastilhas;

- O par tribológico pastilha-disco com a melhor combinação de propriedades de frenagem foi o do ferro fundido cinzento da classe 250. E, de modo geral, o com comportamento menos interessante foi o do ferro fundido vermicular, justificando a preferência do uso de ferros fundidos cinzentos nos discos de freio.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- A análise da influência da rugosidade superficial e da temperatura nos processos de frenagem;
- O aumento da quantidade de bibliografia de revisão, para ampliar o estudo integrativo e qualitativo;
- A realização de revisão bibliográfica quantitativa, aplicando o método estatístico.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, R. M. **Simulação e Ensaio de Mecanismo de Freio Automotivo**. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.
- AFONSO, M. H. F.; SOUZA, J. V.; ENSSLIN, S. R.; ENSSLIN, L. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo ProKnow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental – RGSA**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 47-62, mai./ago., 2011.
- ALVES-MAZZOTTI, A. J. A “revisão de literatura” em teses e dissertações: meus tipos inesquecíveis – o retorno. In: BIANCHETTI, L.; MACHADO, A. M. N. (Org.). **A bússola do escrever: desafios e estratégias na orientação de teses e dissertações**. São Paulo: Cortez, 2002, p. 25-44.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings**. ASTM A 247. 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. ASTM G 99. 2004.
- ARRIECHE, F. E.; LORINI, F. J.; FERREIRA, N. F.; NEIS, P. D. **Análise térmica comparativa de frenagens realizadas em um tribômetro e um dinamômetro visando estabelecer correlação de resultados do coeficiente de atrito**. In: CONEM - Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010, Campina Grande. CONEM - Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro: ABCM, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10966-1:2015 – Veículos rodoviários automotores: Sistema de freio**. Rio de Janeiro. 2015.
- AXÉN, N.; HOGMARK, S.; JACOBSON, S. Friction and Wear Measurement Techniques **Modern tribology Handbook**, London, v. 1, p. 493-510, CRC press LLC, 2001.
- BARBER, J. R. The influence of thermal expansion on the friction and wear process. **Wear**, v. 10, p. 155-159, 1967.
- BLAU P. J. **Friction Science and Technology**. New York: Marcel Dekker, 1996.

- BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. A.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**, Belo Horizonte, v. 5, n. 11, p. 121-136, maio-ago., 2011.
- BRANDÃO, S. M. **Construção de um Dinamômetro Inercial Para Analisar o Desempenho de Ferros Fundidos Cinzentos Utilizados em Sistemas de Frenagem de Veículos Leves**. Dissertação de Mestrado (Integridade de Materiais da Engenharia) - Universidade de Brasília. Gama – DF. 2014.
- BREMBO, S. P. A. **The Brake Disc Manual**. 1ª. ed. Curno: Manual, 1997.
- BREZOLIN, A. **Estudo de Geração de Trincas Térmicas em Discos de Freios de Veículos Comerciais**. Dissertação de Mestrado (Materiais) - Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul – RS. 2007.
- CANALI, R. J. **Determinação de Propriedades Físicas de Diferentes Materiais para Discos e Pastilhas de Freio e Relação Destas Propriedades Com Ruído**. Dissertação de Mestrado (Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2002.
- CARDOSO, A. V. **Ciência dos Materiais Multimídia**, 2005. Disponível em: <<https://cienciadosmateriais.org/>>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- CHAN, D.; STACHOWIAK, G. W. Review of automotive brake friction materials. **J. Automobile Engineering**, Austrália, v. 218, p. 953-966, 2004.
- CHAPMAN, B. J.; MANNION, G. Titanium-bearing cast iron for automotive braking applications. **Foundry Trade Journal**, 1982, v.25, p. 232 – 246.
- CHIAVERIN, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metais. 5ª. ed. 1982.
- COSTA, S. M. C. **Investigação Da Resistência À Corrosão De Ferros Fundidos Com Microestrutura Bainítica E Perlítica Em Meio De Condensado Sintético**. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2014.
- CROLLA, D. A. **Automotive Engineering: Powertrain, chassis system and vehicle body**. 1ª. ed. Oxford: Elsevier Inc., 2009.
- CUEVA, G.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; SINATORA, A.; GUESSER, W. L. Desgaste de Ferros Fundidos Usados em Discos de Freio de Veículos Automotores. **Congresso SAE Brasil**, São Paulo, 2001.

DIULGHEROGLO, P. A. Apostila de Freios. **Docsity**, 25 de maio de 2010. Disponível em: < <https://www.docsity.com/pt/apostila-de-freios/4775412/>>. Acesso em: 10 de abril de 2022.

ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S. On the nature of tribological contact in automotive brakes. **Wear**, v. 252. p. 26-36, 2002.

ERIKSSON, M. **Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal**. Tese de Doutorado - Faculty of Science and Technology. 2000.

FERRETO, C. J. **Ruídos em Sistemas de Freio a Disco: Correlação da Análise de Autovalores Complexos com Métodos Experimentais**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. 2018.

FUKANO, A. MATSUI, H. **Development of disc brake design method using computer simulation of heat phenomena**; SAE Technical Paper, 1986.

GALÁRRAGA, E. G. C. **Estudo do desgaste em materiais utilizados em discos de freio de ferro fundido com grafita lamelar e vermicular**. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo. São Paulo. 2002.

GATES, J. D. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. **Wear**, v. 214, p. 139-146, jan., 1998.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2008.

GONÇALVES, J. **Otimização de Parâmetros de Materiais de Atrito de Sistemas de Freio Usando Algoritmos Genéricos**. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC. 2004.

GUESSER, W. L.; BAUMER, I.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; CUEVA, G.; SINATORA, A. Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio. Brake Colloquium, SAE Brazil, Gramado RS, 2003.

GUESSER, W. L.; GUEDES L.C. Desenvolvimentos recentes em ferros fundidos aplicados à indústria automobilística. **IX Simpósio de Engenharia Automotiva, AEA**. São Paulo, 1997.

HODEL, M. N. **Análise comparativa entre ensaios controlados e aplicações reais de pastilhas de freios de caminhões**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2010.

- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 7ª. ed. London: Edward Arnold, 1992.
- HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2ª. ed. London: Butterworth-Heinemann, 2017.
- INFANTINI, M. B. **Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freio**. Dissertação de Mestrado (Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2008.
- JUNIOR, A. A. S. **Freios e Embreagens por Atrito**. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. 2012.
- LIMPERT, R. **Brake Design and Safety**. 2ª. ed. SAE USA, 1999.
- MALUF, O.; ANGELONI, M.; MILAN, M. T.; SPINELLI, D.; FILHO, W. W. D. Development of materials for automotive disc brake. **Revista Minerva - Pesquisa & Tecnologia**, São Carlos, p. 149-158, 2006.
- MARQUARD, R.; SORGER, H.; AVL List, Austria e MAC DONALD, M., Sintercast, Germany. **Engine Technology International**, 1998.
- MARQUES, V. J. Sistema de Freio; Princípio de Funcionamento e Componentes do Sistemas Freio Hidráulico Automotivo. **Slide Share**, 05 de abril de 2012. Disponível em: < <https://pt.slideshare.net/automobilisticafoz/sistema-de-freio-principio-de-funcionamento-componentes-e-sistemas-12291560>>. Acesso em: 10 de abril de 2022.
- MATOZO, L. T. **Estudo Da Relação Entre Propriedades de Compósitos de Fricção Aplicados a Sistemas de Freio a Disco e a Propensão à Ocorrência de Squeal Noise**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre 2012.
- MENEZES, R. C. **Avaliação da Influência da Pressão de Contato, da Velocidade de Escorregamento e da Temperatura no Desgaste e Coeficiente de Atrito do Par Pastilha-Disco de um Mecanismo de Freio Veicular**. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG. 2016.
- MINKOFF, I. **The Physical Metallurgy of Cast Iron**. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1983.
- NAKATA. **Manual NAKATA para Sistemas de Freios**. Osasco, 2006.

- NEIS, P. D. **Projeto e Construção de Um Tribômetro com Controle Independente da Temperatura do Disco**. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 2012.
- OLIVEIRA, I. **Avaliação do Comportamento de Desgaste do Ferro Fundido Cinzento FC25 com Adição de Antimônio**. Dissertação de Mestrado (Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma – SC. 2015.
- OSTERMEYER, G. P. Friction and wear of brake systems. **Forschung im Ingenieurwesen**, v. 66, 2001.
- POMPON, J. P. **The Brake Disc Manual**. Brembo S.p.A, 1997.
- PRESTON, J. D.; FORTHOFFER, R. J. Correlation of Vehicle, Dynamometer and Other Laboratory Tests for Brake Friction Materials. **Society of Automotive Engineers**, 1971.
- PYE, A. M. Technical Report. Applications of Some of the News Cast Irons. **Materials & Design**, v. 3, p. 534-537, 1992.
- RHEE, S. K. Influence of rotor metallurgy on the wear of friction materials in automotive brakes. **SAE transactions**, v. 80, 1971.
- SILVA, W. M. **Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas**. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2008.
- SILVA, W. M.; COSTA, H. L.; MELLO, J. D. B. Transitions in abrasive wear mechanisms: Effect of the superimposition of interactions. **Wear**, v. 271, p. 977 - 986, 2011.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **AK-Master Standard, In Brake German Procedures**. SAE J2522. 1998.
- SANTOS, A. B. S.; BRANCO, C. H. C. **Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares**. 3ª. ed. São Paulo: IPT, 1989.
- SANTOS, R. B. P.; ISATON, C.; JUNGLES, A. E. Fatores de influência na troca de conhecimento: Um estudo de caso em uma construtora de médio porte. In: SIGRAGEC ELAGEC, 2015, São Carlos. **Proceedings** [...] São Carlos, 2015, p. 316-324.
- SERBINO, E. M. **Um Estudo dos Mecanismos de Desgastes em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico com Grafita Lamelar**. Dissertação de Mestrado (Engenharia) - Universidade de São Paulo. São Paulo – SP. 2005.

- SLOVENSKI STANDARD. **EN 1561:1997- Founding - Grey cast irons**. Slovenia.1997.
- STACHOWIAK, G., W., BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. 3<sup>a</sup>. ed. Elsevier Inc., 2005.
- VILELA, L. O. Aplicação do Proknow-C para seleção de um portfólio bibliográfico e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho da gestão do conhecimento. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 8, n. 1, p. 76-92, 2012.
- YOSHIMOTO, G.; TSUKIZOE, T. **Wear**, v. 1, p. 472, 1957.
- ZIMMER, D. ATE Friction Test Machine and Other Methods of Lining Screening. **Society of Automotive Engineers**, 1982.
- ZUM GAHR, K. H. **Microestruure and wear of materials**. New York: Elsevier, 1987.
- ZUM GAHR, K. H. Wear by hard particles. **Tribology International**, v. 31, p. 587-596, 1998.