

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ**

Tecnologia em Mecânica Automobilística

**Fabio Franco Viana
Milton Romano Miguel**

FREIOS DE RODA

**Santo André
2018**

Fabio Franco Viana
Milton Romano Miguel

FREIOS DE RODA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística FATEC Santo André, orientado pelo Prof. Dr. Dirceu Lavoisier Graci Fernandes, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecânica Automobilística.

Santo André
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

V614f

Viana, Fábio Franco

Freios de roda / Fábio Franco Viana, Milton Romano Miguel.
- Santo André, 2018. – 51f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2018.

Orientador: Prof. Dirceu Lavoisier Graci Fernandes

1. Mecânica. 2. Veículos. 3. Freios. 4. Desenvolvimento. 5.
Aplicação. 6. Pastilhas. 7. Material de atrito. 8. Desempenho.
9. Sistemas. I. Miguel, Milton Romano II. Freios de roda.

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 04 de Julho de 2018

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA: "FREIOS
DE RODA" DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. DIRCEU LAVOISIER GRACI FERNANDES *Dirceu Fernandes*

MEMBROS:

PROF. DENISON ANGELOTTI MORAES *Denison Moraes*PROF. FERNANDO GARUP DALBO *Fernando Garup Dalbo*

ALUNOS:

FABIO FRANCO VIANA *Fabio Franco Viana*MILTON ROMANO MIGUEL *Milton Romano Miguel*

Agradecimentos

Agradecemos aos nossos pais e familiares por todo apoio, ao nosso coordenador Dr. Dirceu Fernandes, a todos os professores da FATEC Santo André e a Deus.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo, sobre os diferentes tipos de sistemas de freio de roda, com foco em freios a tambor e discos, abordando todos os seus componentes, a sua função, estudo de tribologia e seus conceitos, atrito, desgaste e rugosidade. Material de atrito para lonas e pastilhas de freio. Será realizado também um estudo de caso do desenvolvimento e a aplicação de pastilhas de freio para veículos de competição de alto desempenho, observando os dados levantados nesse desenvolvimento, os resultados. Principais pontos analisados para essa aplicação e as estratégias de definição das pastilhas para competição.

Palavras-chave: Freio, material de atrito e desempenho.

Abstract

This work presents a study on the different types of wheel brake systems, focusing on drums and discs, addressing all its components, its function, study of tribology and its concepts, friction, wear and roughness and friction material for brake shoes and brake pads. A case study of the development and application of brake pads for high-performance racing vehicles will also be carried out, observing the data collected in this development, what were the results, the main points analyzed for this application and the pellet definition strategies for competition.

Key words: Brake, friction material and performance.

Lista de Ilustrações

Figura 1: Freio aerodinâmico.....	15
Figura 2: Freios "paraquedas".....	16
Figura 3: Freio de mão.....	17
Figura 4: Tribossistema.....	21
Figura 5: Superfícies.....	22
Figura 6: Superfície de pneu.....	22
Figura 7: Atrito em corpo estático.....	24
Figura 8: Desgaste de pastilhas de freio a disco.....	25
Figura 9: Funcionamento de disco de freio.....	27
Figura 10: Componentes do sistema disco.....	28
Figura 11: Pastilhas de freio.....	28
Figura 12: Indicador sonoro de desgaste.....	29
Figura 13: Sensor elétrico de desgaste.....	29
Figura 14: Disco de freio em carbo-cerâmica.....	30
Figura 15: Disco ventilado.....	30
Figura 16: Disco slotado e ventilado.....	31
Figura 17: Componentes da pinça de freio.....	31
Figura 18: Trabalho e distribuição de forças (pinça).....	32
Figura 19: Funcionamento tambor de freio.....	33
Figura 20: Tambor de freio.....	34
Figura 21: Componentes internos de um sistema de freio a tambor.....	34
Figura 22: Pastilha de freio 1.....	37
Figura 23: Pastilha de freio 2.....	38
Figura 24: Estrutura química dos fenólicos.....	40
Figura 25: Estrutura da Aramida.....	43
Figura 26: Estruturas cristalinas.....	46
Figura 27: Classificação de pastilhas de freio.....	47
Figura 28: Reação ao atrito.....	48
Figura 29: Transporte de calor.....	50

Lista de Tabelas

Tabela 1: Fluidos de freio (DOT).....	19
Tabela 2: Tipos de desgaste.....	26
Tabela 3: Classificação de pastilhas de freio.....	39
Tabela 4: Materiais de preenchimento.....	41
Tabela 5: Propriedades elásticas das principais fibras utilizadas para fabricação de materiais compósitos.....	42
Tabela 6: Aditivos de atrito.....	44
Tabela 7: Norma EN 1561/1997.....	50
Tabela 8: Classes de ferros.....	51
Tabela 9: Descrição dos ensaios a serem realizados em materiais de atrito para freios.....	54

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Distancia media de frenagem.....	14
Gráfico 2: Fator de freio X Coeficiente de atrito.....	24
Gráfico 3: Exemplo 1	36
Gráfico 4: Exemplo 2.....	36
Gráfico 5: Exemplo 3.....	36
Gráfico 6: Exemplo 4.....	37
Gráfico 7: Comparativo 1.....	54
Gráfico 8: Comparativo 2.....	56

Lista de Abreviaturas e Siglas

CCC - *Carbon Ceramic Composites*

CMC - *Ceramic Matrix Composites*

DOT - *Department Of Transportation*

FATEC – Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo

FK – Atrito Cinético

FMVSS - *Federal Motor Vehicle Safety Standards*

FS – Atrito Estático

HV - Dureza Vickers

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e

Tecnologia ISO - *International Organization for Standardization* “I” –

Large

RTQ - Requisitos Técnicos da Qualidade

SAE - *Society of Automotive Engineers*

ΔG – Diferencial de força G

Δt – Diferencial de tempo

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Metodologia.....	12
1.2.	Objetivos Gerais.....	12
1.3.	Objetivos Específicos	13
1.4.	Principais autores pesquisados.....	13
2.	TIPOS DE FREIO.....	14
2.1.	Freio de Serviço	14
2.2.	Sistemas de Freio Auxiliar	15
2.3.	Sistemas de Freio de Estacionamento	16
2.4.	Sistema de freio de atuação contínua.....	17
2.5.	Tubos e conexões para freio hidráulico.....	17
2.6.	Fluidos de freio	18
2.7.	Fadiga dos Freios.....	19
2.8.	Ventilação no sistema de freios.....	20
3.	SISTEMAS TRIBOLOGICOS	21
3.1.	Rugosidade	21
3.2.	O Atrito.....	23
3.3.	Desgaste.....	25
4.	FREIO A DISCO.....	27
4.1.	Pastilhas	28
4.2.	Disco.....	30
4.3.	Pinças	31
5.	FREIO A TAMBOR	33
6.	MATERIAIS DE ATRITO.....	35
6.1.	Tipos de pastilhas	38
6.2.	Materiais de aglutinação	39
6.3.	Materiais de Preenchimento	41
6.4.	Materiais Estruturais	42
6.5.	Aditivos de Atrito.....	44
6.6.	Materiais Cerâmicos	45
6.7.	Classificação do material de atrito.....	46
6.8.	Ruído.....	47

6.9. Ferro Fundido Cinzento.....	49
6.10. Considerações sobre materiais de atrito	52
7. TESTES DE PASTILHAS	53
7.1. Normas de Testes de Material de Atrito.....	53
7.2. Teste em Veículos de Competição.....	54
7.2.1. Considerações Sobre o Teste.....	57
8. CONCLUSÕES.....	58
9. PROPOSTAS FUTURAS.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
ANEXOS.....	62
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	63

1. INTRODUÇÃO

O freio é um dos principais sistemas de um veículo, pois é através dele que se torna possível reduzir a velocidade, parar o veículo e mantê-lo estacionado. O funcionamento do freio pode parecer simples, porém existem muitas variáveis por trás dele e seus sistemas.

O sistema de freio trabalha com a transformação da energia cinética em energia térmica, sonora e desgaste de material. Esse processo de transformação ocorre pela atuação de um material de atrito em um material contato.

Um sistema de freio a tambor pode ser muito eficiente para um veículo que será utilizado, em locais onde possa haver contaminações do meio externo já que está protegido. Porém não é tão adequado para competições onde é acionado com frequência, e devido à temperatura o freio começará a perder eficiência.

Já o freio a disco não possui o ganho que o sistema a tambor tem, porém sua resposta linear é melhor para eixos direcionais, por exemplo. Além de seu contato por completo com o meio externo, gera uma boa troca térmica, e se faz melhor para veículos de alto desempenho.

1.1. Metodologia

Neste trabalho pesquisou-se os materiais de atrito, para esses dois tipos de freio, as semelhanças e diferenças entre eles, além da aplicação e o estudo de caso do desenvolvimento desse tipo de material, feito através de veículos de competição, buscando entender as necessidades e dificuldades desse desenvolvimento.

1.2. Objetivos Gerais

Aplicar conhecimentos do curso para desenvolver TCC sobre freios a disco, a tambor com foco na avaliação de material de atrito.

Estudar os tipos de materiais de atrito e sua aplicação considerando aspectos técnicos de tribologia, envolvendo temperatura, rugosidade, pressão, velocidade, desgaste e desempenho.

Mostrar a aplicação prática de avaliação de material de atrito para freios de veículos de competição, e apresentar uma correlação com a teoria apresentada.

1.3. Objetivos Específicos

Desenvolver estudo sobre material de atrito de freios a disco e a tambor, desde os conceitos tribológicos até os conceitos e aspectos técnicos mais relevantes.

Mostrar um exemplo de aplicação na avaliação de material de atrito de veículos de competição, correlacionando a parte teórica e prática.

1.4. Principais autores pesquisados

Para a realização desse trabalho, foram utilizados os livros de Fred Puhn e o Manual de Tecnologia da Bosch, além do artigo de D. Chan e G. W. Stachowiak, além de muitos outros trabalhos acadêmicos e de sistemistas da indústria automotiva.

2. TIPOS DE FREIO

O objetivo de todos os freios é praticamente o mesmo, porém cada um tem suas aplicações distintas, e o mesmo veículo conta com alguns dos diferentes tipos de freios existentes.

2.1. Freio de Serviço

O freio de serviço é utilizado durante deslocamento do veículo, acionado pelo pedal ao lado esquerdo do acelerador. Ele deve oferecer uma frenagem de maneira progressiva para reduções de velocidade ou levar o veículo à imobilidade segundo à Bosch (2005).

O freio de serviço deve atuar em todas as condições de trabalho do veículo, porém a frenagem não é instantânea, pois ocorre de forma progressiva. Por conta disso existe um espaço de frenagem, que varia dependendo da velocidade, temperatura do sistema, tipo de sistema e atrito dos pneus com o solo, conforme a Gráfico 1.

Gráfico 1: Distância média de frenagem



Fonte: (Transitoideal, 2017)

Além da distância que o sistema de freios precisa para levar o veículo a imobilidade, existe a velocidade de reação do motorista para o acionamento dos freios. Essa distância aumenta proporcionalmente a velocidade, já que em maiores velocidades o veículo percorre uma distância maior no mesmo espaço de tempo.

2.2. Sistemas de Freio Auxiliar

“Numa eventual pane no sistema de freio de serviço, permite ao motorista, com atuação progressiva, reduzir a velocidade do veículo ou leva-ló à imobilidade.”

(BOSCH, 2005, p. 792)

Em veículos de competição e de alta performance, são comuns freios aerodinâmicos, para auxiliar na frenagem, já que em altas velocidades a influência aerodinâmica é muito grande.

Figura 1: Freio aerodinâmico



Fonte: (Fred Puhn, 1985, p. 82)

Os aerofólios utilizados em veículos, são difusores de ar que utilizam a força deste fluído para gerar uma força dependendo da necessidade, assim pode se aumentar a aderência dos pneus com a pista, e dependendo da inclinação pode gerar uma resistência ao fluxo de ar, aumentando a resistência aerodinâmica e reduzindo a velocidade do veículo como podemos observar na Figura 1.

Figura 2: Freios "paraquedas"



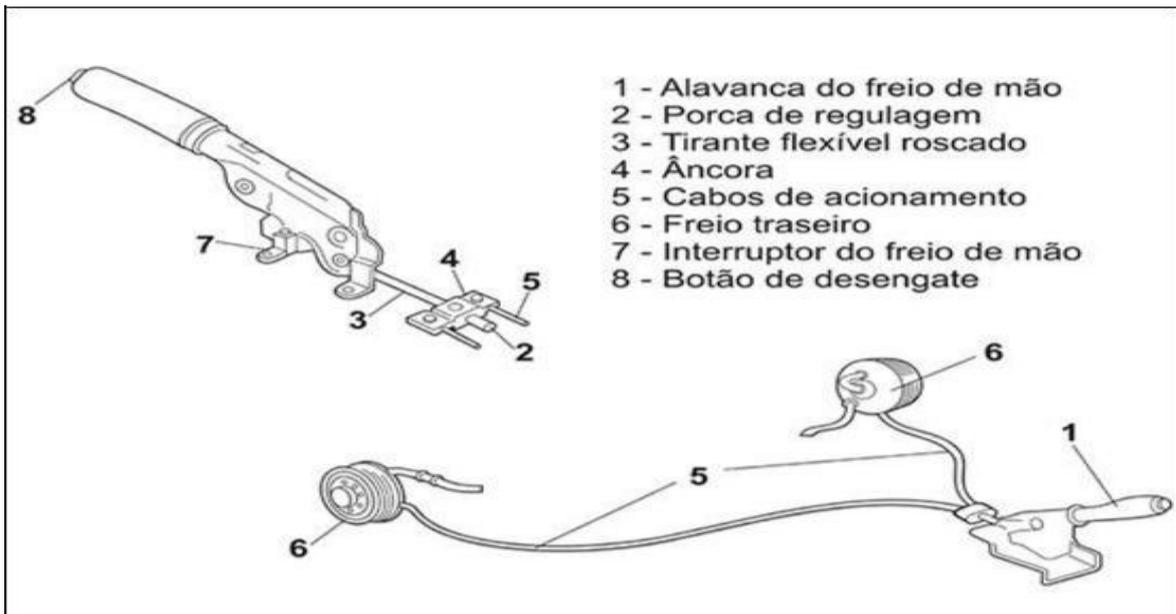
Fonte: (Fred Puhn, 1985, p. 85)

Para reduções mais bruscas de velocidade são utilizados paraquedas, fixados na carroceria do veículo. Em corridas de arrancada onde os carros atingem velocidades muito altas e tem um espaço de frenagem curto, como observamos na Figura 2.

2.3. Sistemas de Freio de Estacionamento

O freio de estacionamento mantém o veículo estacionado através do travamento das rodas. Normalmente é acionado através de uma alavanca entre o banco do passageiro e do motorista, mas pode ser acionado por botões ou por alavancas posicionadas em outros locais do veículo. Ele se mantém acionado até que o condutor o desacione.

Figura 3: Freio de mão



Fonte: (Fiat, 2018)

Os cabos acionam o freio de estacionamento independentemente do freio de serviço. Normalmente eles acionam os freios das rodas traseiras do veículo, mantendo o freio travado por meio da catraca, sendo necessário que se aperte o botão, na ponta da alavanca para se desacionar o freio de mão, conforme a Figura 3.

2.4. Sistema de freio de atuação contínua

São os “Conjuntos de elementos que, praticamente sem desgaste do freio de fricção, permite ao motorista reduzir a velocidade do veículo ou em longos trechos de declive manter a velocidade quase constante.” (BOSCH, 2005, P. 792)

O freio motor mantém a velocidade do veículo limitada, ao pico de velocidade de cada marcha conforme sua relação. Através do uso de marchas de baixa velocidade o motorista consegue limitar a velocidade do veículo ou até reduzir sem o desgaste do freio de serviço.

2.5. Tubos e conexões para freio hidráulico

No sistema de freio hidráulico são utilizados tubos e conexões por onde o fluido de freio irá se deslocar para acionar os freios. As tubulações devem ser posicionadas em locais onde exista um baixo risco de avarias durante a rodagem, pois o rompimento acarretaria um vazamento do fluido de freio e conseqüentemente

falhas nos sistema.

Os projetos dos tubos hidráulicos e conexões devem prever a compatibilidade dos materiais aplicados na fabricação e com a composição química do fluido de freio, para que não exista risco de corrosão ao longo do uso, ou redução nas propriedades mecânicas dos materiais.

Uma linha hidráulica de freio pode ser composta por tubos fixados em locais onde a tubulação não ira sofrer movimentação. Materiais mais rígidos proporcionam resistência à expansão devido à pressão do fluido de freio e tendo tempo de manutenções menores.

Os tubos flexíveis são aplicados em locais onde exista a necessidade de uma movimentação do conjunto mecânico como na entrada da pinça de freio, onde existe a movimentação do sistema de direção e da suspensão. Os tubos flexíveis de freio são mangueiras de borracha reforçada com fibras de nylon internamente, entretanto, esse material expande-se internamente devido a pressão do acionamento.

As mangueiras revestidas com malha metálica apresentam uma melhor resistência a essa expansão devido ao seu revestimento com uma malha de metal trançado na parte externa da mesma, assim quando acionado o freio, a pressão do fluido aumenta, mas a malha metálica evita essa expansão, reduzindo as perdas de pressão por expansão das tubulações.

Este tipo de tubulação ainda garante que se tenha um desempenho da frenagem por mais tempo em situações de altas temperaturas, devido a essas características as mangueiras do tipo 'aeroquip' são aplicadas em veículos esportivos e de competição, pois conseguem manter a linearidade do acionamento do sistema de freio em altas temperaturas.

2.6. Fluidos de freio

O fluido de freio é um componente de extrema importância em um sistema de freios hidráulicos. Eles são os responsáveis por transmitir o movimento do pedal de freio até o acionamento dos pistões das pinças ou cilindro de roda no interior do tambor.

O estado de conservação do fluido de freio deve ser rigorosamente acompanhado por ele ser hidrocópico, e a presença de umidade e outras impurezas poderão reduzir consideravelmente sua eficiência e funcionalidade, principalmente devido a formação de bolhas de ar. Como o ar é compressível o

sistema falhará.

Algumas dessas falhas podem ser observadas como o pedal baixo o aumento na força de acionamento a redução de desempenho em altas temperaturas.

Existem diversas normas que regulamentam os parâmetros necessários de um sistema de freio conforme a aplicação, como as normas SAE J1703, FMVSS-116, ISO 4925, mas a mais usual é a classificação DOT (Department of Transport), que os classifica conforme as propriedades de cada fluido.

Na Tabela 1 são apresentadas algumas das principais características de cada tipo de fluido de freio segundo a sua classificação.

Tabela 1: Fluidos de freio (DOT)

<i>DOT#</i>	<i>Ponto de ebulição a seco</i>	<i>Ponto de ebulição úmido</i>	<i>Viscosidade cinemática</i>	<i>Composição química</i>
<i>DOT 1</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	<i>N/A</i>	Polialquilenoglicol
<i>DOT 2</i>	<i>190°C</i>	<i>120°C</i>	<i>N/A</i>	Polialquilenoglicol
<i>DOT 3</i>	<i>205°C</i>	<i>140°C</i>	<i>1500mm²/s a -40°C</i>	Polialquilenoglicol de éter glicol
<i>DOT 4</i>	<i>230°C</i>	<i>155°C</i>	<i>1800mm²/s a -40°C</i>	Polialquilenoglicol de éter glicol / éster de borato
<i>DOT 5</i>	<i>260°C</i>	<i>180°C</i>	<i>900mm²/s a -40°C</i>	Base de silicone
<i>DOT 5.1</i>	<i>260°C</i>	<i>180°C</i>	<i>900mm²/s a -40°C</i>	Polialquilenoglicol de éter glicol / éster de borato

Fonte(Carro Infoco, 2016)

Fluidos produzidos com diferentes matérias primas não podem ser misturados, pois podem ter reações prejudiciais ao sistema, além das linhas de freios serem projetadas para o material especificado, podendo ocorrer problemas como corrosão por conta de materiais incompatíveis.

2.7. Fadiga dos Freios

A fadiga dos freios é mais conhecida pelo seu termo em inglês “*fading*”, o *fading* é uma falha que o sistema de freios pode sofrer devido ao excesso de temperatura, que afeta a eficiência de todos os componentes do sistema, tais como discos e pastilhas de freio, devido a redução do coeficiente de atrito por alta temperatura e também o fluido de freio, que quando a temperatura supera suas especificações, pode ocasionar a formação de bolhas de ar no sistema.

Existem vários fatores que contribuem para a ocorrência de temperatura excessiva ao sistema de freio tais como o acionamento do mesmo por um longo

período de tempo, como por exemplo descer uma serra utilizando apenas o freio de serviço, quando o correto seria utilizar a inércia do motor para auxiliar na frenagem do veículo, e a utilização do veículo em frenagens repetitivas e bruscas, onde ocorrem reduções de altas velocidades para velocidades mais baixas em pequenos intervalos, onde a temperatura aumenta bruscamente, principalmente em situações de competições.

O *Fading* pode causar acidentes graves, pois depois que o sistema está em alta temperatura, quando é acionado o pedal, o freio não terá a mesma resposta e será necessário uma distância maior para poder reduzir a velocidade, geralmente maior até do que a necessária para evitar um acidente.

No caso de fadiga, a única solução é esperar para que o sistema de freios volte a sua temperatura de trabalho, sendo assim necessário uma avaliação em todo o sistema após o ocorrido, pois devido ao excesso de temperatura, muitos componentes podem estar comprometidos.

2.8. Ventilação no sistema de freios

Uma das formas que auxiliam no controle de temperatura dos sistemas de freios são mecanismos que aumentam a ventilação e assim a dissipação térmica do sistema.

Um dos exemplos mais comuns e conhecidos são os dutos de ventilação, que são dutos instalados na parte frontal do veículo que conduzem o ar mais frio direto para o sistema de freios, induzindo a ventilação no local e reduzindo consideravelmente a temperatura.

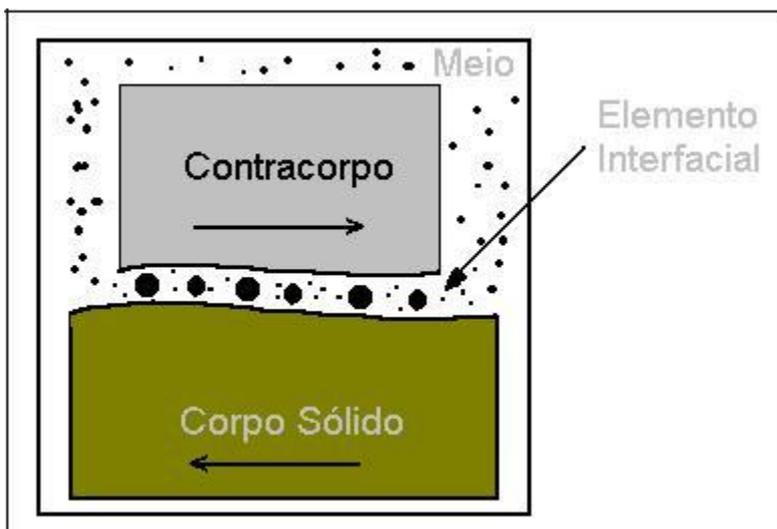
As rodas também são um fator bem relevante na ventilação do sistema de freio. Rodas muito fechadas prejudicam a ventilação, elevando a temperatura média dos freios, motivo da maioria dos veículos de competição utilizarem as rodas mais abertas, que privilegiam a circulação de ar e a troca térmica.

3. SISTEMAS TRIBOLOGICOS

Para se entender o conceito físico de um sistema de freios é necessário um estudo sobre tribologia. Este e o campo de estudo se refere ao contato de duas superfícies em movimento. Os principais campos de estudo da tribologia são os de atrito, desgaste e lubrificação.

Os materiais empregados em sistema de freios são de extrema importância, mas através do estudo da tribologia pode-se entender que a interação entre dois materiais depende principalmente do meio tribológico em questão. Por exemplo, o atrito e o desgaste de um pneu rolando no asfalto é menor do que se o pneu estivesse arrastando no asfalto.

Figura 4: Tribossistema



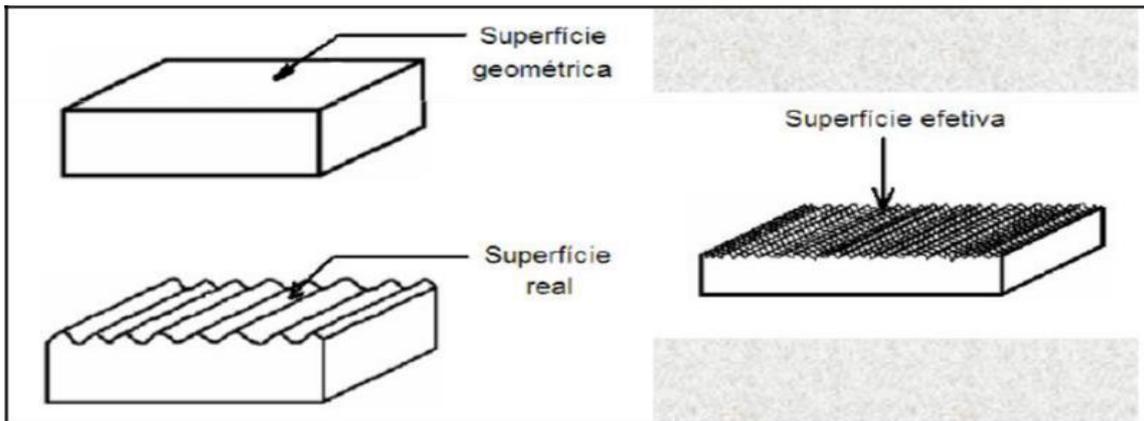
Fonte:(JOCA, 2016, p. 19)

Na Figura 4 podemos observar um tribossistema que pode ser comparado com um sistema de freio. O corpo sólido seria o disco ou tambor de freio, o contra corpo a pastilha ou lona de freio, e o elemento interfacial as partículas provenientes do desgaste do material de atrito, água ou até mesmo o ar; a interação desses dois elementos irá gerar um desgaste, por menor que seja.

3.1. Rugosidade

A rugosidade pode ser definida como o “conjunto de desvios microgeométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície”. (JOCA, 2016, p. 28) como exemplifica a Figura 5.

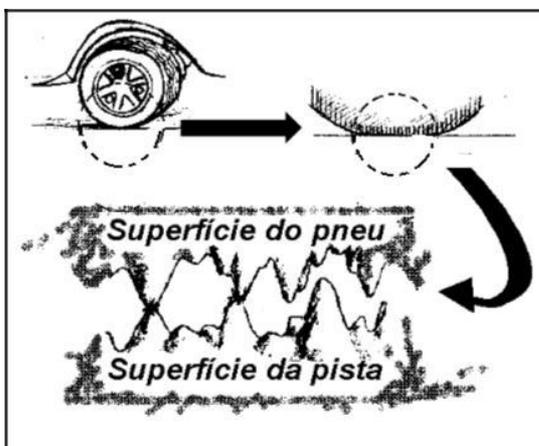
Figura 5: Superfícies



Fonte:(JOCA, 2016, p. 28)

Devido as características das superfícies de cada material, a área de contato real e a área de contato nominal possuem diferenças, sendo a real menor que a nominal. Isso ocorre porque as superfícies não são lisas como podem aparentemente ser, pois possuem uma certa rugosidade, que muitas vezes só podem ser verificadas microscopicamente, como pode ser verificado na Figura 6.

Figura 6: Superfície de pneu



Fonte: (JOCA, 2016, p. 29)

Com base nisso observamos a necessidade da rugosidade para que exista o atrito. A diferença entre as superfícies de dois materiais atenua o atrito, ou seja, quanto mais diferente forem as superfícies, maior será o atrito entre elas.

“Na medida em que o carregamento normal é aumentado, as asperezas mais altas deformam e um número maior de asperezas nas duas superfícies se contata.”

Fonte: (JOCA, 2016, p. 30)

Quanto maior a pressão sobre um corpo, maior o atrito devido ao aumento de contato pelas asperezas, dessa forma com um aumento de pressão no sistemas de freios podemos aumentar o atrito e capacidade de frenagem.

3.2. O Atrito

O atrito é um dos fenômenos físicos mais comuns em um automóvel, pois o conjunto de peças que formam o veículo precisa do atrito para interagir entre si como os comandos de válvulas com os mancais, ou os anéis raspadores com as camisas dos cilindros. Dentro de um motor de combustão interna se faz necessário uma demanda de atrito menor ou maior, que deverá ser projetada conforme a necessidade do conjunto. “Cerca de 20% da gasolina consumida por um automóvel são usados para compensar o atrito das peças do motor o atrito das peças do motor e da transmissão.” (HALLIDAY e RESNICK, 2007 p. 127)

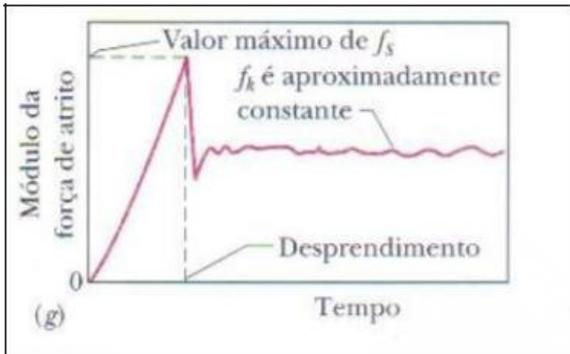
Para que um objeto consiga se mover ele deve ter a capacidade de vencer a força de atrito inicial que se opõe ao seu movimento. No freio o atrito é usado para reduzir a energia cinética das rodas.

Quando temos um objeto em repouso, que ainda não venceu o atrito para iniciar seu movimento, chamamos de força de atrito estático, sendo esta contraria ao movimento do corpo impedindo que o mesmo inicie seu movimento. Quando o objeto vence o atrito e já está em movimento existe a força de atrito cinético.

Como podemos observar na Figura 7, que representa um objeto desde o repouso ao movimento. Quando ele está em repouso existe apenas a influência da força gravitacional, que esta em equilíbrio com a força normal. Já quando se aplica uma força puxando para a esquerda, em reação a força de atrito equilibra a força gerada, esta é a força de atrito estático, como podemos observar na curva dentro da linha tracejada.

Na Figura 7 a força de atrito estático (f_s), se mantém crescente, até o inicio do movimento quando o objeto vence o atrito estático; já em movimento o objeto ainda sofre influência de uma resistência ao movimento à força de atrito cinética (f_k), que é menor e mais constante em velocidade constante.

Figura 7: Atrito em corpo estático

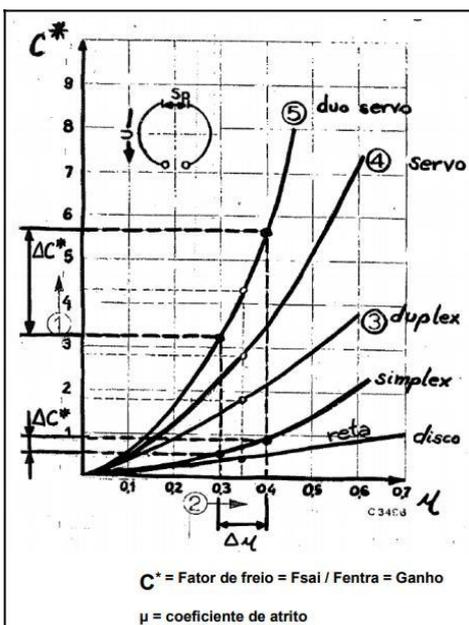


Fonte: (HALLIDAY/RESNICK, 2009, p. 127)

Na Figura 7 observamos que com o acréscimo de força, existe um aumento da força de atrito estático, mantendo o objeto em repouso, mas a força de atrito estático tem um limite, e no momento que o objeto vence a força e entra em movimento a força que se opõe ao movimento é a força de atrito cinético.

Nos sistemas de freio, a geometria do sistema contribui com o atrito, podendo assim alterar a resposta do sistema. Observando a Gráfico 2, é apontado que o sistema de freio a disco possui uma resposta linear do fator de frenagem em relação ao atrito, por isso é mais utilizado em rodas dianteiras, já o tambor tem um ganho de fator de frenagem com o aumento de atrito de forma não linear, por isso é mais utilizado em freios de estacionamento e em veículos de carga.

Gráfico 2: Fator de freio X Coeficiente de atrito



Fonte: (FERNANDES, 2016, p. 12)

3.3. Desgaste

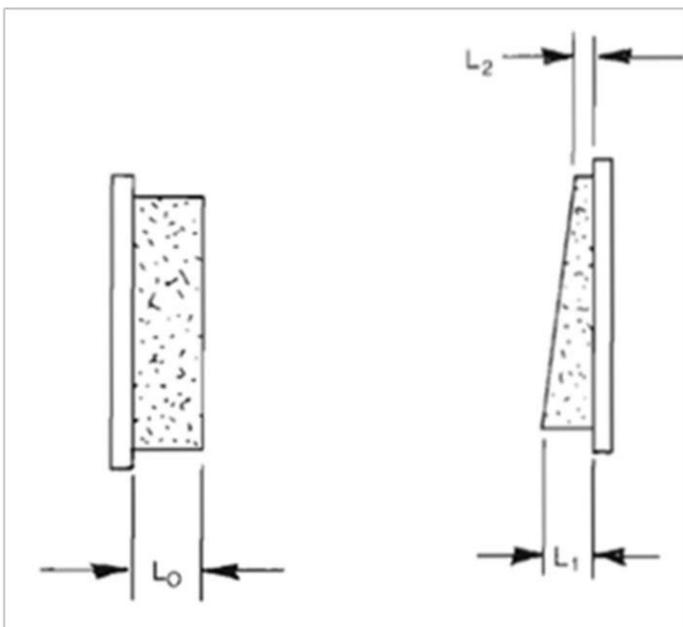
O desgaste é um dos resultados da desaceleração do sistema de freio onde uma parte da energia cinética do veículo em movimento é transformada em desgaste durante a frenagem, desgaste este que ocorre no material de atrito e também no material de contato.

Os tipos de desgaste que ocorrem nos sistemas de freios são bem variados, podendo ser:

1. Contato metálico entre a rugosidade das superfícies, que geram uma remoção de metal devido à adesão e pequenos fragmentos de desgaste.
2. Reações químicas dos metais com o ambiente que resultam em camadas protetivas superficiais e reduzem o contato metálico.
3. Trincação de camadas protetivas superficiais devido a alta pressão local ou micro fadiga resultando em fragmentos não-metálicos de desgaste.
4. Fragmentos metálicos e não metálicos podem agir abrasivamente e desgastar as superfícies de contato. Novas formações e deslocamentos de camadas protetivas superficiais podem levar a um maior desgaste.

(JOCA, 2016, p. 35 e 36)

Figura 8: Desgaste de pastilhas de freio a disco



Adaptado de: (PUHN, 1985, p. 119)

Como observamos na Figura 8 o desgaste nas pastilhas de freio a disco ocorre de forma irregular, pois como o lado de fora do disco possui maior velocidade que o interno, seu desgaste é mais acentuado.

Os fenômenos tribológicos de desgaste ocorrem na superfície do material. A superfície de um material pode conter características diferentes comparadas com a do seu núcleo, principalmente nos metais, devido a processos de fabricação e

tratamentos térmicos. No caso dos discos de freio, por exemplo, é comum que ocorra uma oxidação superficial na face do disco de um veículo parado por muito tempo, que é retirada com o atrito das pastilhas quando o veículo volta a rodar sem nenhum problema.

O desgaste pode ainda ser classificado como moderado ou severo, dependendo do sistema tribológico e do material, podendo ocorrer um tipo de desgaste ou outro. A Tabela 2 mostra as características de cada um.

Tabela 2: Tipos de desgaste

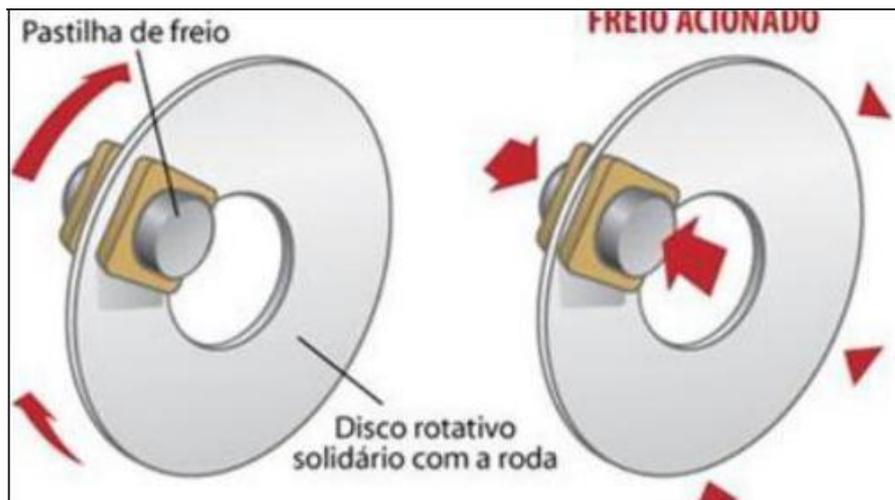
Desgaste Moderado	Desgaste Severo
Aparência da superfície desgastada é lisa (rugosidade menor que a original)	Alta taxa de desgaste, a superfície desgastada apresenta-se mais rugosa que a original
A superfície de desgaste é coberta por uma camada de óxido (altos valores de resistência de contato)	Ausência de camada de óxido (baixos valores de resistência de contato)
Debris* de dimensões pequenas (diâmetros da ordem de 100nm)	Debris de tamanho grande (diâmetros maiores que 10 μ m)
Baixos valores de coeficiente de atrito	Altos valores de coeficiente de atrito

Fonte: (JOCA, 2016, p. 41)

4. FREIO A DISCO

O sistema de freio a disco funciona através da compressão axial que os pistões das pinças exercem nas pastilhas sobre a superfície lateral externa do disco de freio que é solidário a roda em movimento, como representado na Figura 9.

Figura 9: Funcionamento de disco de freio



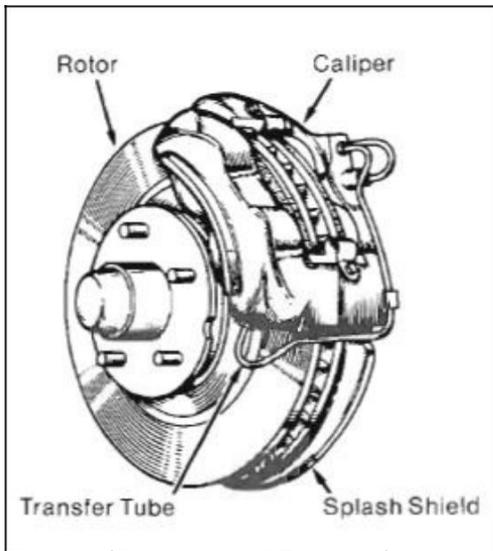
Fonte: (CHIARONI, 2014, p. 24)

Os freios a disco apresentam uma boa dissipação térmica devido ao sistema estar exposto ao meio externo, e quando um freio a disco ultrapassa sua temperatura de trabalho ele tende a perder em eficiência de frenagem devido ao coeficiente de atrito diminuir. Existem diversas soluções para este problema, como dutos de ar, defletores e até rodas mais abertas.

Apesar do disco de freio ser mais suscetível a contaminações externas como lama, poeira e água, já que ele não faz uso de nenhuma proteção, essas partículas não afetam o funcionamento do sistema em situações normais, já que o disco expelle as mesmas pelo efeito da força centrífuga. Em casos de veículos de alto desempenho é comum, o uso de discos frisados ou perfurados, que assim ajudam na limpeza das pastilhas, seja por materiais do meio ou pelo próprio material do desgaste.

A Figura 10 apresenta um freio do sistema a disco com seus principais componentes.

Figura 10: Componentes do sistema disco



Fonte: (PUHN, 1985, p. 23)

Glossário:

- Caliper – Caliper ou pinça
- Rotor – Disco
- Splash Shield – Defletor de ar
- Transfer Tube – Tubo de transferência

4.1. Pastilhas

As pastilhas de freio são as responsáveis por transferir a pressão vinda do sistema e recebida por ela através das pinças. E produzir atrito do seu material em contato com o disco de freio.

Figura 11: Pastilhas de freio



Fonte: (ATE-Brakes, 2016)

Como podemos observar na Figura 11 a pastilha de freio é composta por uma chapa metálica que serve de suporte para sua fixação na pinça de freio, além desta

receber a pressão aplicada pelo pistão, é um material de atrito fixado nessa chapa, que é o responsável pelo atrito com o disco.

A pastilha possui uma espessura mínima do seu material de atrito para o uso, que se for ultrapassada haverá um desgaste prematuro do disco e até a inutilização do mesmo. Devido a esta característica existem sistemas que buscam alertar ao motorista desse desgaste em busca de preservar o sistema. Em veículos mais simples é adicionada uma chapa fina de metal fixada na base da pastilha (Figura 12), em posição que entre em contato com o disco, quando o material de atrito atinge determinada espessura, produzindo um ruído desagradável quando em contato com o disco.

Figura 12: Indicador sonoro de desgaste



Adaptado de: (BOSCH, 2009)

Em veículos com maior valor agregado geralmente é adicionado a pastilha um sensor como o da figura 13, que funciona como dois fios que estão isolados por uma fina camada de borracha e quando a pastilha atinge seu limite de uso essa borracha é rompida e os fios fecham o contato entre si, gerando um alerta no painel do carro.

Figura 13: Sensor elétrico de desgaste



Fonte: (TOMORROWS TECHNICIAN, 2016)

4.2. Disco

Como disse PUHN (1985), o disco é usualmente feito em ferro fundido, e é um disco plano circular com uma superfície de contato de cada lado. Porém pode ser feito também em outros materiais, mesmo com diferentes tipos de ferro fundido, com variações do teor de carbono por exemplo, além de outros tipos de materiais, como cerâmicas ou carbo-cerâmicas como o disco da Figura 14.

Figura 14: Disco de freio em carbo-cerâmica



Fonte: (BREMBO, 2017)

Nem todos os discos possuem a mesma forma, além das variações de tamanho, os discos podem ser do tipo sólido ou seja, em uma peça única, ventilados que possuem canais de ventilação entre as faces conforme a Figura 15.

Figura 15: Disco ventilado

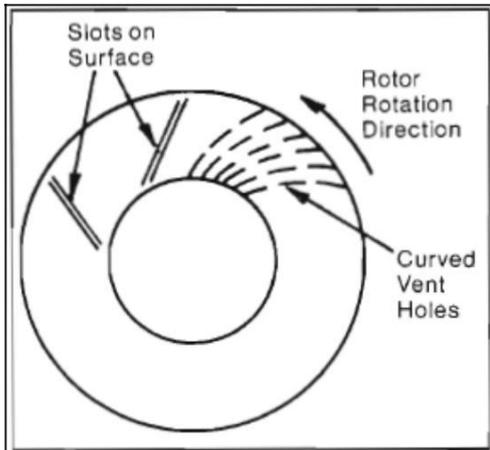


Fonte: (PUHN, 1985, p. 26)

O elemento interfacial (detritos de pastilha e poeira) ficam entre a pastilha e o disco reduzindo o atrito e a eficiência de frenagem, e através de furos como os da

Figura 14, ou fresas na Figura 16, é promovida uma limpeza na superfície de contato. Esses tipos de disco são encontrados principalmente em veículos de competição e alto desempenho.

Figura 16: Disco slotado e ventilado



Glossário:

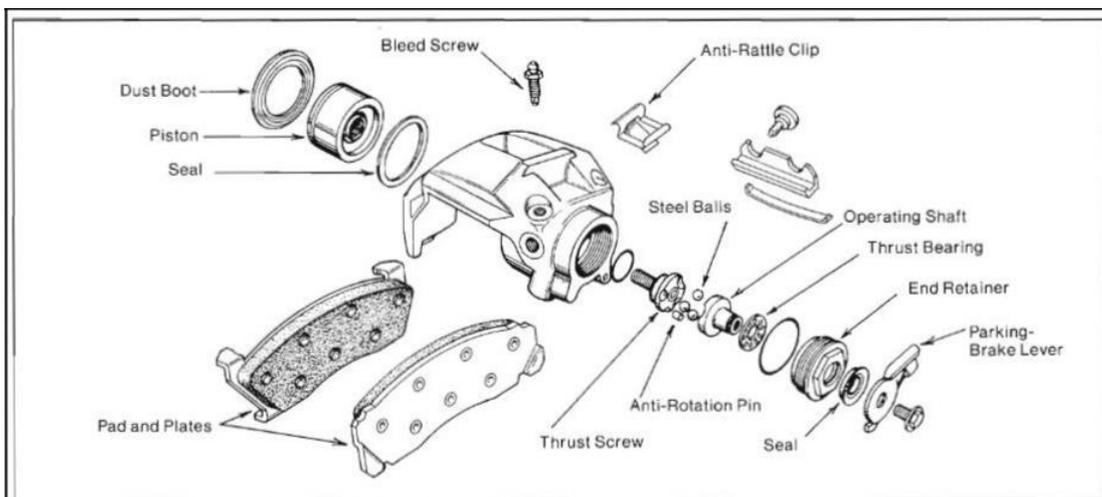
- Curved vent holes – Curvas internas de ventilação
- Rotor rotation direction – Direção de rotação do disco
- Slots on surface – Fresas superficiais

Fonte: (PUHN, 1985, p. 26)

4.3. Pinças

As pinças de freio, também chamadas de caliper, recebem a pressão de acionamento do sistema de freio, e transmitem para as pastilhas, através de seu ou seus pistões, abaixo a Figura 17 representa uma pinça de freio e seus componentes em vista explodida, podemos dar destaque ao pistão (*piston*), Sangrador (*bleed screw*) e as pastilhas com sua superfície de apoio (*pad and plates*).

Figura 17: Componentes da pinça de freio

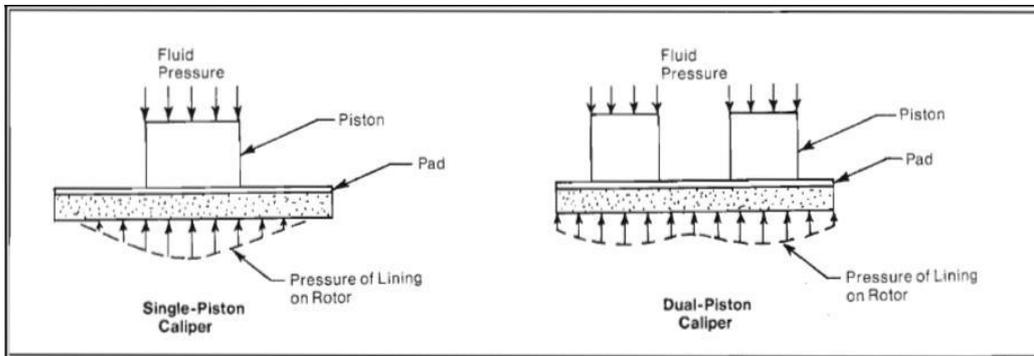


Fonte: (PUHN, 1985, p. 30)

A força aplicada na pastilha depende da área de contato do pistão ou seja para maior força aumenta-se o tamanho do pistão, ou o número de pistões. Múltiplos

pistões ainda dividem melhor a força através de pastilha como podemos observar na Figura 18.

Figura 18: Trabalho e distribuição de forças (pinça)



Fonte: (PUHN, 1985, p. 31)

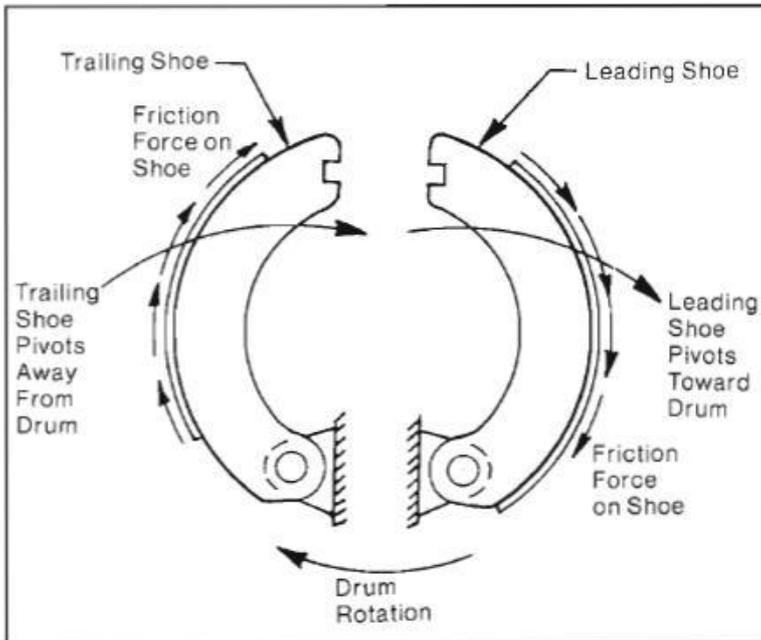
Glossário:

- Dual-Piston Caliper – Pinça de dois pistões
- Fluid Pressure – Pressão do fluido
- Pad – Pastilha
- Piston – Pistão
- Pressure of Lining on Rotor – Pressão da superficial no disco

5. FREIO A TAMBOR

É um sistema de freio de roda composto basicamente de um tambor solidário à roda, que recebe uma compressão radial das sapatas de freio sobre a sua superfície interna, como apresentado na Figura 19.

Figura 19: Funcionamento tambor de freio



Glossário:

- Drum Rotation – Rotação do tambor
- Friction force on Shoe – Força de atrito na sapata
- Leading shoe – Sapata primária
- Leading shoe pivots toward drum – Sapata primária na direção do tambor
- Trailing shoe – Sapata secundária
- Trailing shoe pivots away from drum – Sapata secundária contrária ao tambor

Fonte: (PUHN, 1985, p. 16)

O freio a tambor hoje em dia é ainda muito utilizado em veículos comerciais, geralmente com acionamento pneumático, porém em veículos de passeio ele é mais utilizado no eixo traseiro, por custo e também pela facilidade da instalação do freio de estacionamento nele.

Devido o sistema de freio a tambor ser fechado pelo tambor de freio como o da Figura 20, ele está protegido de elementos externos como lama, água e poeira, uma vantagem em veículos que trafegam em estradas de terra. Porém devido a essa característica ele está sujeito a aquecimento por falta de ventilação, e assim, perda de eficiência devido a temperaturas mais altas.

Figura 20: Tambor de freio

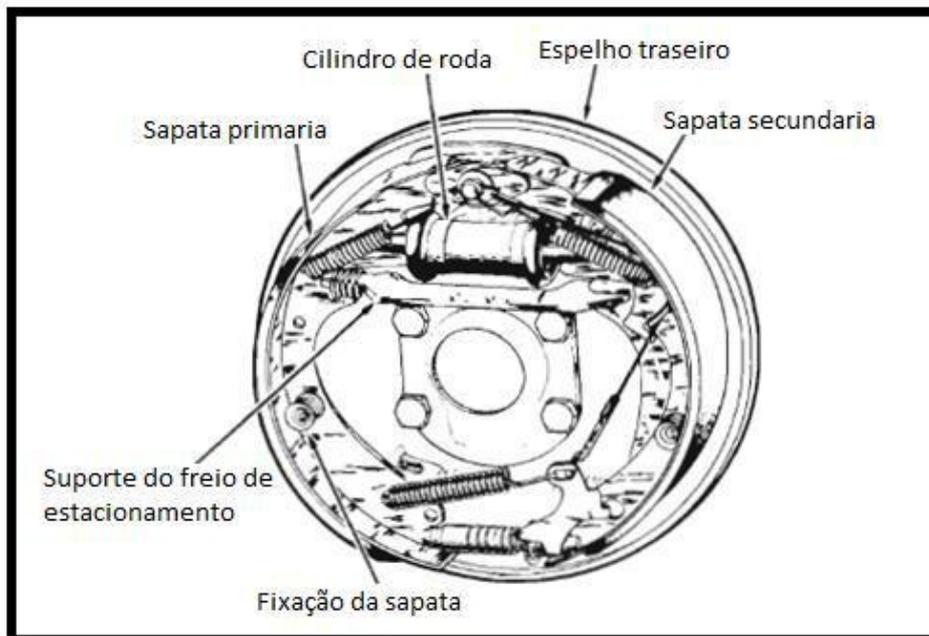


Fonte: (AutoTech, 2018)

Este sistema devido a sua geometria ainda possui a vantagem de um ganho exponencial de fator de frenagem em relação a força aplicada, por isso sua preferencia em veículos de carga.

Apesar de montado parecer um sistema mais simples, seus componentes internos são bem complexos. Na Figura 21 são apresentados os seus principais componentes.

Figura 21: Componentes internos de um sistema de freio a tambor



Adaptado de: (PUHN, 1985, p. 15)

6. MATERIAIS DE ATRITO

Para obterem-se as características desejadas de uma pastilha ou lona de freio é necessário, que exista uma combinação de diversos tipos de materiais, cada um com o objetivo de conferir uma propriedade para a peça.

A quantidade e a qualidade dos materiais empregados em materiais de atrito são definidos de acordo com a aplicação da pastilha ou lona de freio, onde as principais características alteradas são os níveis de desgaste do material de atrito ou de onde é empregado (disco ou tambor), nível de ruído e durabilidade.

A escolha do compósito depende da aplicação, materiais cerâmicos como carbon ceramic composites (CCC) e o ceramic matrix composites (CMC) são normalmente aplicados em veículos de alto desempenho, devido as altas temperaturas atingidas em trabalho. Esses materiais conseguem ter um bom coeficiente de atrito nessas condições.

O material de atrito é produzido em processo industrial com moldagem de pastilhas e lonas a frio e a quente, sob pressão.

Os principais compostos de materiais de atrito são:

Fibras (*Fibers*):

Elemento estrutural que fornece resistência mecânica e ao cisalhamento, por exemplo: fibra de vidro, palha de aço, fibras naturais e sintéticas, etc Modificadores de atrito (*Frictionmodifiers*):

Elementos responsáveis por fornecerem as características de desempenho, ruído, atrito e desgaste. São segredos industriais utilizados pelos fornecedores de material de atrito.

Por exemplo: cobre, latão, alumínio, pó metálico, sintéticos, grafite, etc

Material de preenchimento (*Fillers*):

Elementos responsáveis por complementar o material de atrito e reduzir custos.

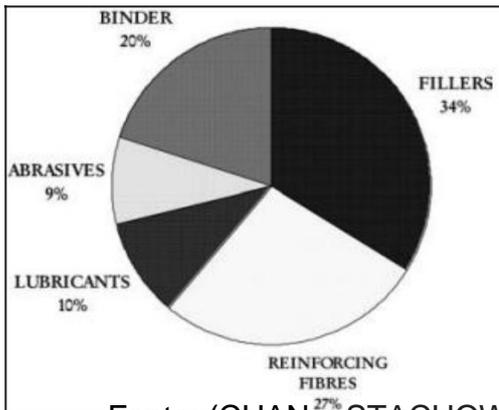
Por exemplo: carbonatos, silicatos, etc

Material de aglutinação (*Binders*):

Elementos responsáveis por ligar todos os componentes do material de atrito, por exemplo: fenolformaldeído, resinas, etc

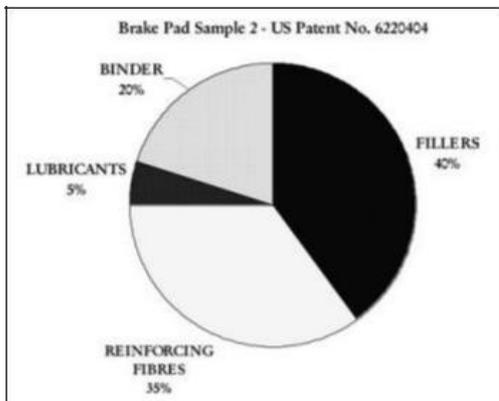
Adaptado de (FERNANDES, 2016, p. 2)

Não existe um padrão para a concentração de um determinado tipo de elemento para materiais de atrito, isso varia conforme a necessidade de cada projeto onde os principais fatores são a aplicação e o custo.

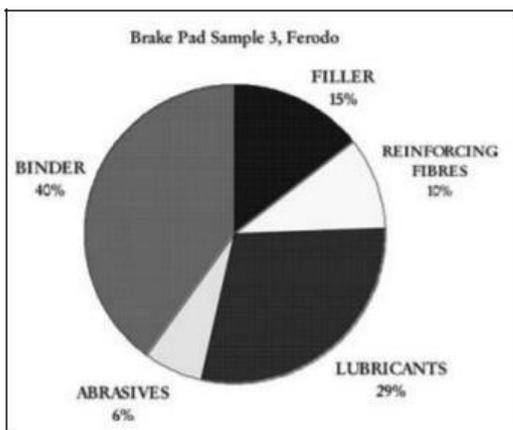
Gráfico 3: Exemplo 1**Glossário:**

- Abrasives – Abrasivos
- Binder - Aglutinantes
- Fillers – Preenchimento
- Lubricants – Lubrificantes
- Reinforcing Fibres – Fibras de Reforço

Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p 956)

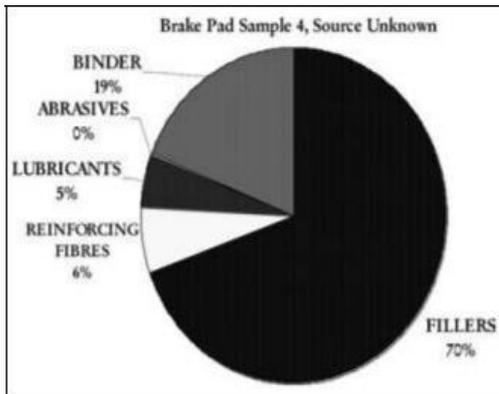
Gráfico 4: Exemplo 2

Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p 956)

Gráfico 5: Exemplo 3

Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p 956)

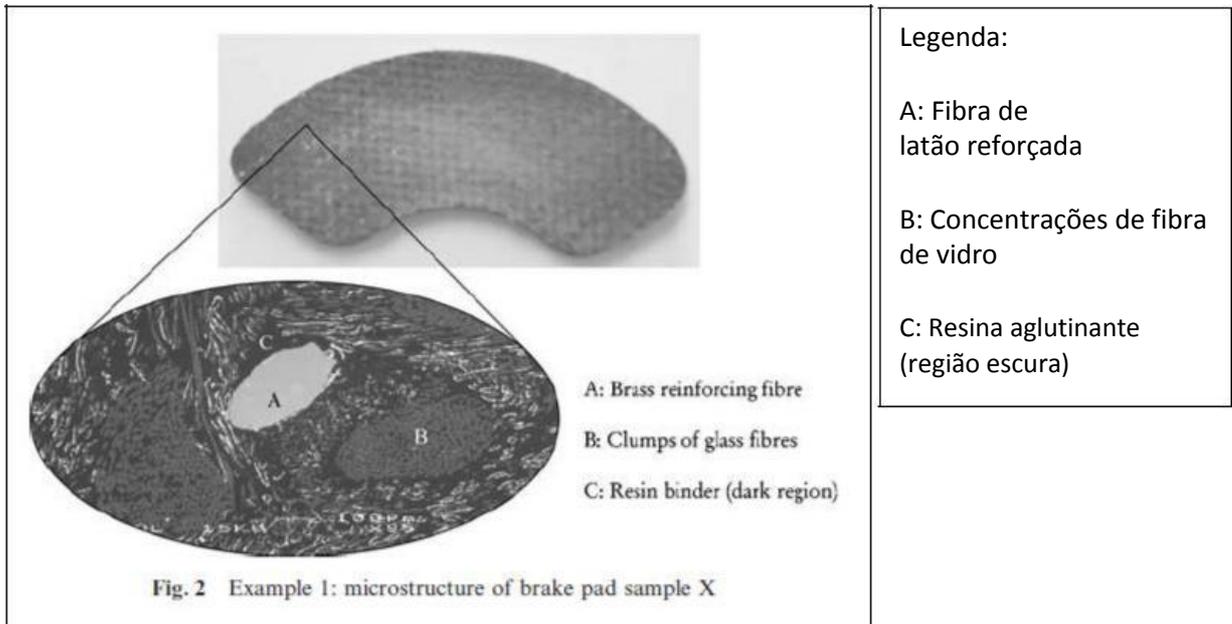
Gráfico 6: Exemplo 4



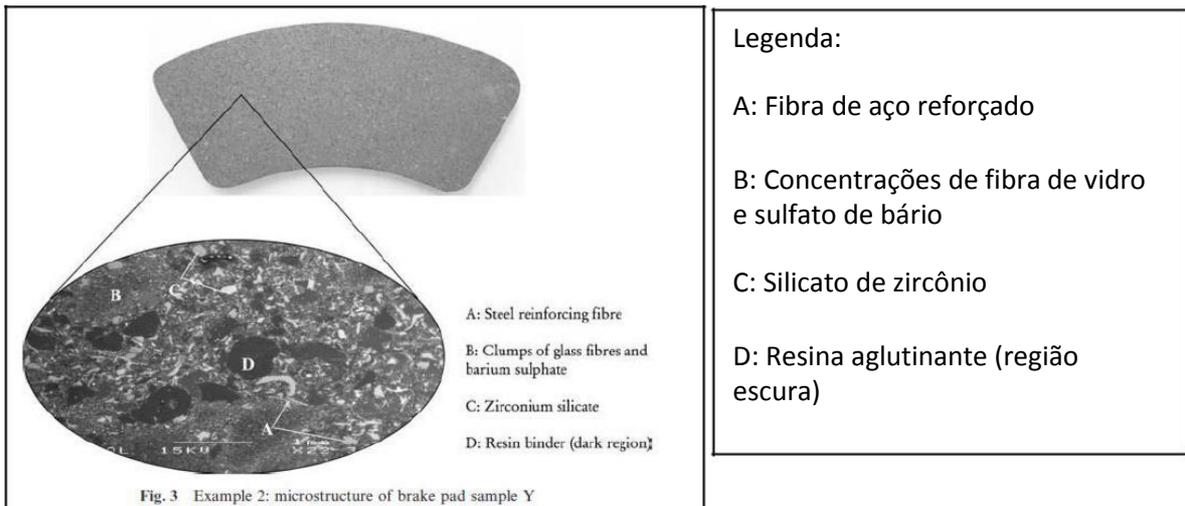
Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p 956)

Os Gráficos 3, 4, 5 e 6 são exemplos de tipos diferentes de pastilhas. Apresentam as proporções de elementos usadas para compostos de diferentes materiais de atrito. Com isso podemos observar que não existe um padrão definido da proporção que deve ser utilizada em cada pastilha.

Figura 22: Pastilha de freio 1



Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p 955)

Figura 23: Pastilha de freio 2

Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p 955)

As Figuras 22 e 23 mostram a microestrutura de duas pastilhas de freio diferentes e suas respectivas imagens tiradas utilizando um microscópio. Uma sonda de Raios X dispersiva de energia foi usada para identificar os constituintes presentes nas pastilhas de freio. A amostra de pastilhas de freio 1 foi formulada para uso em motocicletas leves e destina-se a ter coeficiente de atrito moderado. A amostra de pastilhas de freio 2 foi formulada para uso em trens e destina-se a desenvolver um maior coeficiente de atrito. Portanto, a amostra 1 contém fibras mais macias feitas de latão, enquanto a amostra 2 contém ingredientes mais duros, como partículas de silicato de zircônio e fibras de aço.

(Traduzido e adaptado de CHAN e STACHOWIAK, 2004, p 954)

A partir das figuras microscópicas das pastilhas podemos observar que não houve uma variação apenas na porcentagem de elementos de atrito, mas também no tipo do mesmo, para conseguir um maior coeficiente de atrito nas pastilhas que são utilizadas em trens. Foi alterado o tipo do modificador de atrito, deixando o uso do latão para fibras de aço, assim como é feito em veículos de alto desempenho onde são utilizados materiais cerâmicos.

6.1. Tipos de pastilhas

Nem todas as pastilhas são iguais, elas possuem não só diferentes formas, tamanhos e aplicações. As pastilhas de freio, e até as lonas de freio no caso dos freios a tambor, possuem diferentes materiais, em diferentes proporções e diferentes misturas.

Sendo assim, no caso das pastilhas existem classificações (Tabela 3), que separam as pastilhas em grupos, de acordo com o material mais comum na sua

formulação, não necessariamente as pastilhas de mesmo grupo são iguais, porém elas possuem uma semelhança no tipo de material empregado.

Tabela 3: Classificação de Pastilhas de Freio

Classificação	Ingredientes
Metálico	Predominantemente metálicos como fibras de aço, cobre, etc.
Semi-metálico	Mistura de ingredientes metálicos e orgânicos.
Orgânicos	Predominantemente orgânicos como fibras minerais, borrachas, grafite, etc.

Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p. 954)

Essas características são escolhidas no projeto, dependem da aplicação do veículo e custos de projeto. A escolha de cada material que compõem o material de atrito depende de todos os outros, pois a combinação de materiais não compatíveis podem gerar problemas na aplicação.

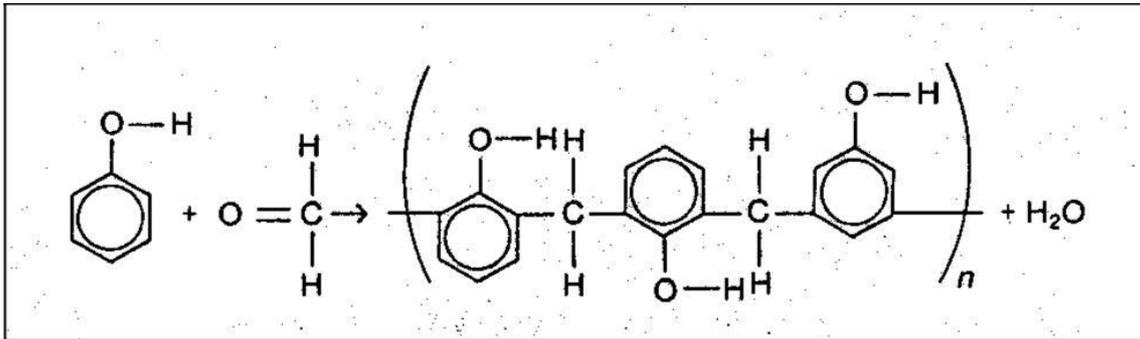
6.2. Materiais de aglutinação

As pastilhas de freios são compostas por uma combinação de diversos componentes, que promovem as diversas características. Para isso faz-se necessário um material, que consiga uma ampla compatibilidade com os diversos materiais existentes e unir os mesmos uniformemente, suportando os esforços mecânicos e as temperaturas oriundas das frenagens.

As resinas fenólicas são um dos materiais de aglutinação mais populares, usados em diversas aplicações. Isso é devido ao seu baixo custo e a sua tecnologia já popularizada. Sua estabilidade dimensional, exceto em geometrias complexas, e sua capacidade de suportar altas temperaturas mantendo assim suas características originais.

A obtenção das resinas fenólicas é realizada a partir da condensação do fenol e formaldeído, a Figura 24 apresenta a estrutura química dessa substância.

Figura 24: Estrutura química dos fenólicos



Fonte: (SOUZA, 2004, p. 14)

Os dois tipos de resinas fenólicas são:

- a) Novolacs- Uma reação com catalisadores ácidos, entre o fenol e o formaldeído, resulta na formação de uma resina Novolac. As resinas Novolac são tipicamente de oito a dez unidades em tamanho. São termoplásticas, assim requerendo a adição de um agente com ligações transversais, dando a forma de uma rede tridimensional rígida no polímero.

A reação do fenol e do formaldeído, em meio básico, resulta na formação de uma resina Resól. As resinas resóis são os polímeros termofixos, tipicamente de uma a cinco unidades em tamanho MCALLISTER & LACHMAN (1983).

Fonte: (ZANGIACOMI, 2002, p. 50 e 51)

O estudo de Souza (2004) apresenta diversas características interessantes das resinas fenólicas

- **Moldabilidade:** As resinas fenólicas permitem facilidade de processamento e desempenho vantajosos. Podem ser moldadas em formas complicadas e já nas dimensões finais, por injeção, compressão, ou processo de transferência com pequeno ou nenhum acabamento subsequente;
- **Estabilidade dimensional:** As resinas fenólicas retêm estabilidade dimensional por um período indefinido de tempo sob condições atmosféricas normais;
- **Resistência à Fluência:** Têm um alto nível de resistência à deformação sob carga, especialmente a temperaturas acima de 200°C;
- **Estabilidade térmica:** As resinas fenólicas podem resistir a 150°C continuamente. Alguns tipos podem resistir a 260°C por períodos curtos e a 230°C por períodos maiores de tempo;
- **Dureza:** As ligações cruzadas nas resinas fenólicas fazem com que elas resultem em polímeros que estão entre os mais duros disponíveis;
- **Resistência à Compressão:** Alta resistência a cargas de compressão é outro benefício disponível com uso das resinas fenólicas

Fonte: (SOUZA, 2004, p. 15)

6.3. Materiais de Preenchimento

Os materiais de preenchimento, como o nome sugere, servem para preencher os espaços na composição da pastilha, junto com os outros materiais que compõem o material de atrito de uma pastilha. Esse tipo de material além de reduzir o custo de produção da pastilha, serve também para corrigir alguns pontos que são gerados pelos outros materiais.

A escolha dos materiais de preenchimento segue o tipo de pastilha no qual ele é aplicado, e cada tipo de material de preenchimento tem uma diferente função. A Tabela 4 mostra os tipos de materiais de preenchimento e quais as suas funções.

Tabela 4: Materiais de Preenchimento

Materiais	Descrição
Sulfato de bário	Promove estabilidade ao calor para o material de atrito, adiciona característica de atrito.
Carbonado de cálcio	Promove estabilidade ao calor para o material de atrito.
Mica	Suprime ruídos de baixa frequência, mas causa divisão entre as camadas do material de atrito.
Vermiculita	Suprime ruídos de baixa frequência, porém tem baixa resistência ao calor.
Titanatos de metal alcalino	Promove estabilidade ao coeficiente de atrito.
Trióxido de molibdênio	Previne fadiga térmica e rachadura da superfície sob altas temperaturas.
Pó de castanha de caju	Suprime ruído de freio, porém não adere em qualquer material de atrito.
Pó de borracha	Suprime ruído de freio, porém não adere em qualquer material de atrito.

Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p. 960)

Como mostra a Tabela 4, cada tipo de material tem diferente função e isso faz com que sua aplicação seja diferente. Pastilhas metálicas, devido aos seus componentes geram muito ruído, e precisam de materiais que reduzam o seu ruído, como Mica, Vermiculita, pó de castanha de caju e pó de borracha.

Pastilhas semi-metálicas são mais susceptíveis a variação dimensional de acordo com a temperatura, então necessitam de uma grande quantidade de algum material como o trióxido de molibdênio que previne as trincas na pastilha por conta da dilatação térmica.

Pastilhas orgânicas dependem do tipo de material empregado. As pastilhas

ricas em grafite ou outro lubrificante, não requerem titanatos de metal alcalino como preenchimento.

6.4. Materiais Estruturais

As misturas dos materiais de atrito necessitam de um material que estruture a pastilha ou a lona, para que assim resista aos esforços mecânicos necessários, como o aumento da rigidez e resistência do material.

Existem diversos tipos de fibras que podem ser adicionadas em um composto para materiais de atrito, elas possuem características distintas, de resistência a tração e a compressão como podemos observar na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades elásticas das principais fibras utilizadas para fabricação de materiais compósitos

Tipo de Fibra	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência (MPa)	
	Tração	Compressão	Tração	Compressão
Vidro – E	53,8	51,7	1310	965
Vidro – S	72,4	85,5	1620	1138
Aramida (Kevlar 29)	50,0	46,5	1351	238
Carbono (alto módulo)	200,0	196,5	758	793
Carbono (alta resistência)	144,8	141,3	1379	1586

Fonte: (CASARIL, 2009, p. 8)

As fibras de vidro são os únicos materiais que apresentam propriedades do vidro tradicional: dureza, transparência, resistência ao ataque químico e estabilidade, bem como as propriedades de fibra: flexibilidade, leveza e processabilidade.

Muito conhecidas na fabricação de peças de carrocerias de veículos, são utilizadas na produção de pastilhas de freio, para auxiliar a estruturação do material de atrito, que podem ser os abaixo relacionados:

S-glass apresenta na sua composição aluminossilicatos de magnésio. Demonstra alta resistência e é utilizado em aplicações onde alta resistência à tração é requerida.
C-glass apresenta em sua composição borossilicatos que são usados por sua estabilidade em ambientes corrosivos. Assim é

frequentemente utilizado em compósitos que contenham materiais ácidos MILLER (1987).

E-glass é a família das fibras de vidro com composição de aluminoborosilicatos de cálcio e conteúdo máximo de alcalinos de 2 %. É utilizado para proposições gerais quando resistência e alta resistividade elétrica são necessárias.

Fonte: (ZANGIACOMI, 2002, 45)

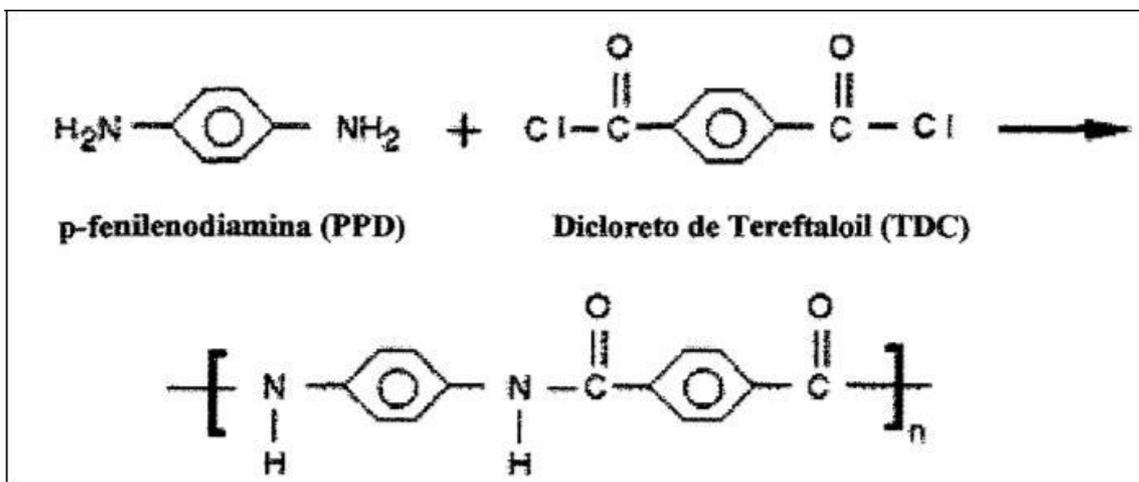
A Fibras de aramida (Figura 25) é um tipo de fibra sintética, também conhecida como Kevlar, que vem sendo utilizada na composição de materiais de atrito para reforço da estrutura.

O Kevlar®, como é mais conhecido, é famoso devido a sua aplicação na construção de coletes à prova de balas, blindagens entre outros produtos. Essa fibra foi desenvolvida pela DuPont®, esse material vem sendo utilizado em diversas aplicações devido a sua elevada rigidez, leveza e alta resistência a tração.

A unidade monomérica da fibra de aramida é formada pela adição de grupos de diamina e do ácido dicarboxílico ou das lactamas. A aramida foi uma das primeiras fibras poliméricas comerciais na qual a alta resistência e a rigidez foram alcançadas pelo alinhamento de suas cadeias. É uma poliamida aromática chamada de poli *para-fenileno*tereftalamida.

Fonte: (ZANGIACOMI, 2002, p. 42)

Figura 25: Estrutura da Aramida



Fonte: (ZANGIACOMI, 2002, p.42)

Materiais que possuem fibra de aramida possuem bom desempenho e estabilidade, uma melhora em relações a materiais que não possuem esse tipo de fibra.

A Fibras de carbono tem sido aplicada em diversas áreas e para a confecção

de diversas peças diferentes, devido a sua leveza, alta resistência, como discos de freio, carrocerias de veículos, e até rodas.

6.5. Aditivos de Atrito

Os aditivos de atrito são os materiais responsáveis pela alteração do coeficiente de atrito e também o nível de desgaste do material final. A escolha desses aditivos depende da combinação de todos os materiais. Esses materiais possuem diferentes características, como representa a Tabela 6.

Tabela 6: Aditivos de Atrito

Aditivos de atrito	Descrição
Grafite	Amplamente usado como lubrificante, disponível de forma sintética ou natural, em pó ou flocos, capaz de formar uma camada autossustentável de lubrificação.
Sulfetos de metais	Boas características lubrificantes, com menor condutividade que o grafite, alguns exemplos são antimônio, latão, cobre, sulfuretos de chumbo.
Óxidos/Silicatos de metais	Abrasivos com classificação de dureza de 500HV (quartzo) a 1750HV(óxido de alumínio), exemplos como quartzo (SiO ₂), silicato de zircônio, óxido de zircônio, óxido de alumínio, etc.

Fonte: (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p. 961)

Esses aditivos são divididos em dois grupos: lubrificantes e abrasivos. Os lubrificantes diminuem o desgaste das pastilhas, porém diminuem também seu coeficiente de atrito, já os abrasivos aumentam o coeficiente de atrito mas também aumentam o desgaste.

Materiais lubrificantes estabilizam o coeficiente de atrito, principalmente a quente, não deixando que ocorram grandes variações em diferentes temperaturas, o que é importante em veículos de rua e baixo desempenho, pois grandes diferenças podem causar desconfortos ao consumidor comum.

Os mais comuns são o grafite e os sulfatos de metais, “O grafite é amplamente utilizado, pois é capaz de formar uma camada lubrificante no material de contra fricção.” Traduzido de (CHAN e STACHOWIAK, 2004, p. 961).

O grafite cria uma camada lubrificante no material do contracorpo, ou seja, o disco de freio, promovendo assim uma proteção ao desgaste de ambos os componentes, porém o grafite transfere muito calor para o resto do sistema, podendo assim esquentar o fluido de freio acima do seu ponto de ebulição, causando fadiga no sistema.

Os sulfatos de metais não possuem os problemas do grafite, e são uma excelente escolha na sua substituição. O único problema deste material é a suspeita de que possa ser cancerígeno.

Os materiais abrasivos podem limpar a camada de superfície do contracampo, porém não possuem estabilidade na sua força de frenagem, e são agressivos a superfície de contato, desgastando muito rápido tanto o disco de freio quanto a pastilha.

6.6. Materiais Cerâmicos

Os materiais não metálicos se tornaram ótimos materiais de atrito devido às propriedades que seriam mais difíceis de serem obtidas a partir de materiais metálicos, porém ainda são restritos a veículos de alto desempenho devido ao seu custo elevado.

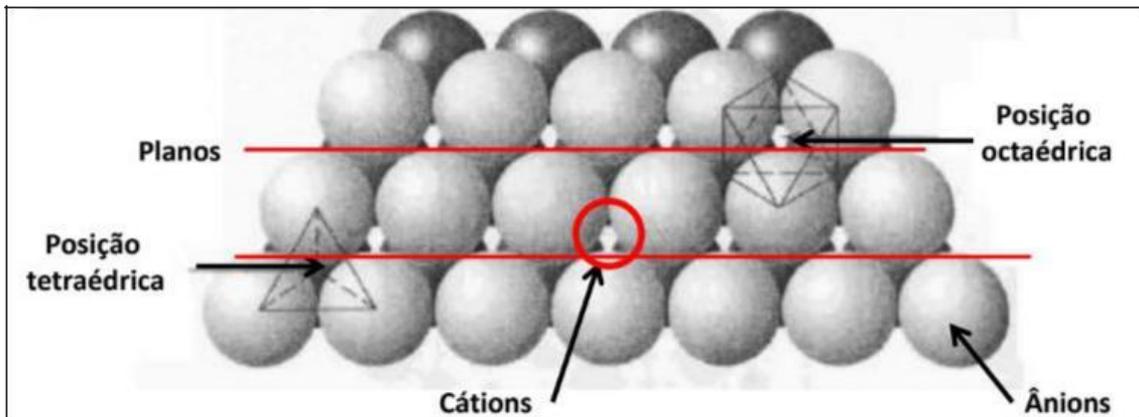
O termo cerâmica vem do grego *keramicos* que quer dizer matéria prima queimada. Podemos entender que as cerâmicas são materiais que necessitam de um tratamento térmico para a obtenção de suas características.

As cerâmicas podem ser utilizadas em diversas aplicações, onde as mais comuns são: azulejos, porcelanas e materiais refratários; mas as cerâmicas avançadas tem ganhado espaço na indústria automobilística devido suas propriedades principalmente em materiais de atrito, como freios e embreagens.

As cerâmicas apresentam uma estrutura cristalina (Figura 26) mais complexa que os metais, tendo propriedades mecânicas e características físicas distintas dos mesmos.

“Estruturas cristalinas da compactação densa de ânions várias estruturas cristalinas cerâmicas podem ser consideradas em termos de planos de íons densamente compactadas, bem como de células unitárias.” (PAZIAN, 2016, p.3)

Figura 26: Estruturas cristalinas



Fonte: (PAZIAN, 2016, p. 3)

“Durante o processo de fabricação, os metais são transformados em um pó finíssimo e queimados à temperatura de 1700 graus, transformando-se em cerâmica "técnica", muito mais estável e resistente do que a que é obtida a partir da argila ou do barro, queimado em fornos de alta temperatura.”(DA ROSA, GUARAZE, MEGGIOLARO, GODOIS, MARTINS e PENSO, 2017, p. 812)

“As cerâmicas cristalinas e não cristalinas quase sempre se fraturam antes de qualquer deformação plástica quando sujeito a tração à temperatura ambiente.” (PAZIAN, 2016, p. 3)

As pastilhas e discos de freio produzidos a partir de materiais cerâmicos, já são utilizadas em diversos veículos de alto desempenho, trazendo confiabilidade e uma durabilidade muito superior em relação aos mesmos componentes produzidos a partir de materiais metálicos, assim como o peso que é reduzido.

As peças fabricadas a partir de materiais cerâmicos ainda apresentam menor suscetibilidade a corrosão, e as pastilhas uma menor capacidade de absorção de água, apresentando uma frenagem mais estável em situações de chuva.

A aplicação de materiais cerâmicos em carros de rua é mais viável até que os produzidos à partir de carbono, devido ao seu desempenho já em baixas temperaturas e se mantendo até a temperaturas elevadas, reduzindo o *fading* do sistema de freios.

6.7. Classificação do material de atrito

A classificação dos materiais de atrito é feita a partir dos valores atingidos a frio e a quente, as temperaturas foram definidas segundo SAE J661, sendo que a temperatura a frio 366 Kelvin e a quente 588 Kelvin, convertendo para graus Celsius a frio 92.85° Celsius e a quente 314,85°Celsius.

Duas letras classificam o material de atrito, a primeira com o valor do atrito a frio e a segunda com o valor do atrito a quente. As letras possuem os valores de atrito correspondentes:

C: menor que 0,15

D: 0,15 a 0,25

E: 0,25 a 0,35

F: 0,35 a 0,45

G: 0,45 a 0,55

H: acima de 0,55

Z: não classificada

Por exemplo: FE, indica um material com atrito de 0,35 a 0,45 a frio e de 0,25 a 0,35 a quente, mostrando que este material perde atrito a quente.

(FERNANDES, 2016, p. 3)

Figura 27: Classificação de pastilhas de freio



Adaptado de: (EBC, 2017)

A marcação com as informações da pastilha são impressas no verso. Na Figura 27 a pastilha tem a marcação FF, ou seja, seu atrito tanto a quente quanto a frio estão entre os valores 0,35 a 0,45, caracterizando uma pastilha utilizada em competições.

“O desenvolvimento de material de atrito envolve projeto e testes que podem durar até 2 anos, sendo que o resultado a ser alcançado considera o par de atrito (pastilha/ disco e lona/ tambor), desta forma este desenvolvimento é bastante complexo.”(FERNANDES, 2016, p. 3)

6.8. Ruído

O ruído em sistemas de freios é totalmente indesejado em uma frenagem, pois gera incômodo aos condutores e passageiros. Esses ruídos são advindos de diversas fontes, e podem ser até um aviso de um possível modo de falha ou desgaste.

A aplicação incorreta das pastilhas ou lonas em um sistema de freio devido a algum engano ou adaptação são um dos principais motivos de ruídos no sistema de freios, já que a interação do material de atrito com o sistema está fora do especificado no projeto.

“A aplicação incorreta pode gerar ruído, aquecimento do sistema de freios, travamento das rodas, baixa eficiência durante a frenagem e perda da garantia.”(BOSCH, 2009, p. 1)

Durante as manutenções do sistema de freios deve-se analisa se existe algum tipo de empenamento no disco de freio. “Desvios superiores aos aceitos pelo fabricante podem causar vibrações e ruído durante as frenagens.”(BOSCH, 2009, p. 1)

A composição dos matérias que compõem a pastilha são os principais fatores de ruídos no sistema, muitos deles de baixa qualidade utilizados para reduzir os custos de produção.

“Em ferros fundidos, a capacidade de amortecimento de vibrações é resultado do atrito entre a grafita e a matriz metálica, durante a solicitação mecânica, isto pode ser visto no ensaio de tração, através da histereseno descarregamento e carregamento da amostra;” (GUESSER, BAUMER, TSCHIPTSCHIN, CUEVA e SINATORA, 2003, p. 2)

Figura 28: Reação ao atrito



Fonte: (GUESSER, BAUMER, TSCHIPTSCHIN, CUEVA e SINATORA, 2003, p. 2)

“Em ferros fundidos, a capacidade de amortecimento da vibrações é resultado do atrito da grafita e a matriz metálica, durante a solicitação mecânica conforme figura 28.” Adaptado de: (GUESSER, BAUMER, TSCHIPTSCHIN, CUEVA e SINATORA, 2003, p. 2)

6.9. Ferro Fundido Cinzento

O ferro fundido cinzento é um dos principais materiais utilizados na fabricação de discos de freio atualmente, devido a sua boa resistência ao desgaste e ao baixo custo.

Como nada é ideal, existem também as desvantagens desse material. Os discos de freio em ferro fundido cinzento possuem algumas limitações em determinadas situações, como por exemplo, quando as temperaturas de trabalho são elevadas, como em veículos de competição que realizam frenagens bruscas e repetitivas em um curto espaço de tempo, superando assim sua temperatura de trabalho ideal e reduzindo o seu coeficiente de atrito.

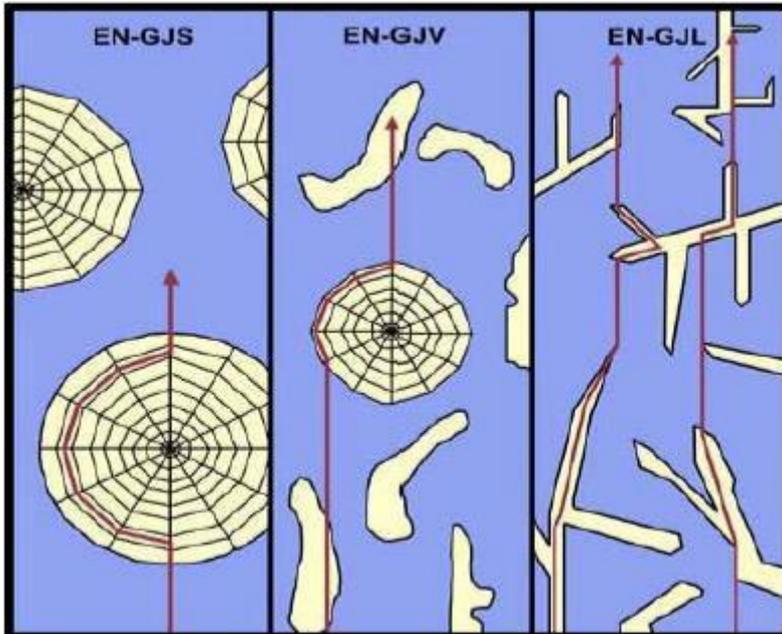
Os discos de freio produzidos em ferro fundido cinzento são pesados quando comparados aos feitos em materiais de alta performance, como cerâmicos, carbono cerâmicos fibra de carbono. O peso da massa não suspensa dos discos gera uma perda de energia, podendo esta ser aproveitada na tração, porém é gasta com a inércia dos discos. Além do menor peso, os materiais citados anteriormente apresentam uma maior durabilidade se comparados ao ferro fundido cinzento, porém esses materiais hoje se restringem a veículos esportivos, competição ou militares devido ao seu elevado custo.

O ferro fundido cinzento possui uma boa condutividade térmica, em uso quando o resultado da frenagem resulta em calor. O material consegue dissipar essa energia gerada de forma satisfatória, mantendo o disco de freio dentro da sua temperatura ideal, segundo seu coeficiente de atrito.

A dissipação de calor, diminui o gradiente térmico da peça, melhorando assim o desempenho em âmbito de fadiga térmica, essa melhora é explicada pela morfologia da grafita lamelar, onde 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, além da conectividade do esqueleto de grafita, tipo lamelar. (Figura 29)

Adaptado de: (SERBINO, 2005, p. 26 e 27)

Figura 29: Transporte de calor



Fonte: (SERBINO, 2005, p. 27)

Apesar da boa condutividade térmica do ferro fundido cinzento sua dissipação térmica não é instantânea, sendo necessário assim um período de tempo para isso, caso contrário, o coeficiente de atrito do ferro fundido pode diminuir resultando em falhas.

Durante os ciclos de resfriamento pode resultar em tensões chamadas trincas térmicas, essas quando não atingem as extremidades interna e externa do disco, são inofensivas e desaparecem com o atrito da pastilha e o disco ao decorrer do tempo.

A Tabela 7 apresenta as propriedades de alguns tipos de ferro fundido cinzento em variação da temperatura.

Tabela 7: Norma EN 1561/1997

Característica			Classe (EN-GJL-)				
			150	200	250	300	350
Densidade	ρ	g/cm ³	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30
Calor específico	C	J/(kg.K)	460 535				
Entre 20 e 200 °C							
Entre 20 e 600 °C							
Coeffic. expansão térmica linear	α	$\mu\text{m}/(\text{m.K})$	10,0 11,7 13,0				
Entre -100 e +20 °C							
Entre 20 e 200 °C							
Entre 20 e 400 °C							
Conductividade térmica	λ	W/(m.K)	52,5	50,0	48,5	47,5	45,5
a 100°C							
a 200°C			51,0	49,0	47,5	46,0	44,5
a 300°C			50,0	48,0	46,5	45,0	43,5
a 400°C			49,0	47,0	45,0	44,0	42,0
a 500°C			48,5	46,0	44,5	43,0	41,5

Fonte (GUESSER, BAUMER, TSCHIPTSCHIN, CUEVA e SINATORA, 2003, p.2)

Um dos requisitos de um disco de freio é suportar os esforços mecânicos da pressão gerada pelas pastilhas através das pinças na superfície do disco, além das vibrações geradas pelo relevo da pista, entre outros esforços naturais do sistema de freios, a Tabela 8 apresenta as características mecânicas de alguns tipos de ferro fundido cinzento.

Tabela 8: Classes de Ferros

Característica			Classe (EN-GJL-)				
			150	200	250	300	350
Matriz			Ferrítico/ perlítica	perlítica			
Limite Resistência	Rm	MPa	150-250	200-300	250-350	300-400	350-450
Limite Escoamento	Rp _{0,1}	MPa	98-165	130-195	165-228	195-260	228-285
Alongamento	A	%	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3	0,8-0,3
Resistência compressão	σ_{db}	MPa	600	720	840	960	1080
LE compressão	$\sigma_{d0,1}$	MPa	195	260	325	390	455
Resistência flexão	σ_{dB}	MPa	250	290	340	390	490
Resist cizalhamento	σ_{sB}	MPa	170	230	290	345	400
Resistência torção	τ_{tB}	MPa	170	230	290	345	400
Módulo Elasticidade	E	GPa	78-103	88-113	103-118	108-137	123-143
Coefficiente Poisson	ν	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Resist. Fadiga Flexão	σ_{bW}	MPa	70	90	120	140	145
Resist Fadiga Tração-Compressão	σ_{2dW}	MPa	40	50	60	75	85
Tenacidade à Fratura	K_{IC}	(MPa)^{3/2}	320	400	480	560	650

Fonte (GUESSER, BAUMER, TSCHIPTSCHIN, CUEVA e SINATORA, 2003, p. 2)

“Tradicionalmente os discos de freio tem sido produzidos em classes FC-200 e FC-250, cujas propriedades especificadas podem ser vistas na tabela, Ressaltam-se os valores (mínimos) de limite de fadiga (flexão rotativa) de 90 e 120 MPa,

correspondentes às classes FC-200 e FC-250.” (GUESSER, BAUMER, TSCHIPTSCHIN, CUEVA e SINATORA, 2003, p. 2)

6.10. Considerações sobre materiais de atrito

Os tipos de materiais da pastilha alteram drasticamente a resposta dos freios. Observamos que quando os materiais proporcionam uma maior lubrificação do sistema, esse sistema possui uma maior durabilidade, e linearidade da resposta, e são fatores desejáveis em veículos de rua e baixo desempenho, sendo geralmente conhecidas como pastilhas orgânicas.

Porém mesmo em veículos de rua, a medida que vão aumentando peso e desempenho se faz necessário um maior atrito oriundo da pastilha, e assim são alterados os materiais buscando respostas diferentes, porém ainda é importante sua durabilidade e linearidade de resposta, e assim podem ser usadas pastilhas semi-metálicas que são uma opção intermediária e atendem bem a determinados segmentos.

Em veículos voltados a competição e desempenho, a durabilidade e até a linearidade passam a ser valores secundários em busca da maior desempenho. Os componentes metálicos, em pastilhas do tipo metálicas proporcionam um maior coeficiente de atrito, sacrificando a linearidade da resposta, principalmente quando comparada a quente e a frio, e também a durabilidade, não só das pastilhas de freio, mas também do disco. Por conta da maior abrasividade do material os discos possuem um maior desgaste.

7. TESTES DE PASTILHAS

Apesar de toda teoria por trás do desenvolvimento de pastilhas de freio, nem só com os cálculos e conhecimentos de cada material pode garantir o desempenho, durabilidade e outros itens, importantes em uma pastilha de freio. Assim como em qualquer outro componente, as pastilhas precisam ser testadas.

No caso de um veículo de rua esses testes possuem uma normatização específica das montadoras e de órgãos reguladores dos países ao qual aquele projeto é destinado. Já nos veículos de competição, os testes são feitos buscando aquilo que a equipe ou projeto necessitam, tais como, maior desempenho, durabilidade entre outros.

7.1. Normas de Testes de Material de Atrito

O material de atrito empregado na confecção de uma pastilha de freio deve passar por diversos testes para avaliar sua confiabilidade, em diversas situações de trabalho, para assim receber sua certificação pelo órgão inspetor do país. Cada órgão possui sua norma, mas os testes são bem semelhantes.

O *Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia* (INMETRO) que é quem regula os testes no Brasil cita em sua norma algumas características quanto ao desempenho e segurança de pastilhas e lonas de freio além de definição para alguns tipos de materiais, como asbestos que são cancerígenos, estas normas podem ser conferidas no **ANEXO A**, e alguns dos testes exigidos estão contidos na Tabela 9.

Tabela 9: Descrição dos ensaios a serem realizados em Materiais de Atrito para Freios

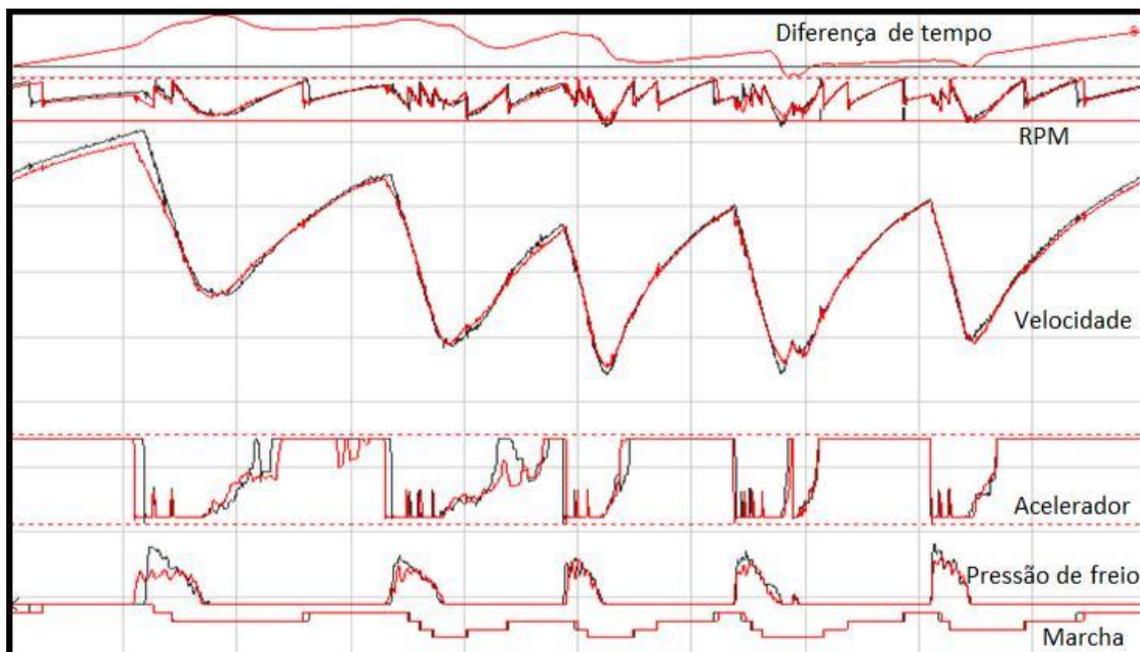
Requisito do RTQ	Ensaio	Base Normativa
5.2	Detecção de asbestos em composições de Materiais de Atrito	SAE J 2975 ou EPA/600/R-93/116
5.3 / 5.6	Ensaio de cisalhamento ⁽¹⁾	ABNT NBR 5537 (para veículos de passeio das Categorias M1, M2 e N1) e ISO 6312 (para veículos comerciais das Categorias M3, N2 e N3)
5.4 / 5.6	Ensaio de compressibilidade	ABNT NBR 9301 (para veículos de passeio das Categorias M1, M2 e N1) e ISO 6310 (para veículos comerciais das Categorias M3, N2 e N3)
5.5 / 5.6	Ensaio de dilatação e crescimento	ABNT NBR 5505

Fonte: (INMETRO, 2014, p. 6)

7.2. Teste em Veículos de Competição

Os testes para veículos de competição são realizados de acordo com as necessidades.

Gráfico 7: Comparativo 1



Fonte (Arquivo Pessoal)

No Gráfico 7 é apresentada uma comparação de duas pastilhas de freio em uma pista de testes, onde o objetivo foi alcançar o melhor desempenho. Assim não é necessária apenas uma redução de velocidade em um período de tempo, mas o quanto o desempenho da pastilha em teste influenciou na pilotagem, para uma redução do tempo do percurso considerado. Assim foi necessário uma análise de diversos parâmetros do veículo e não só do freio.

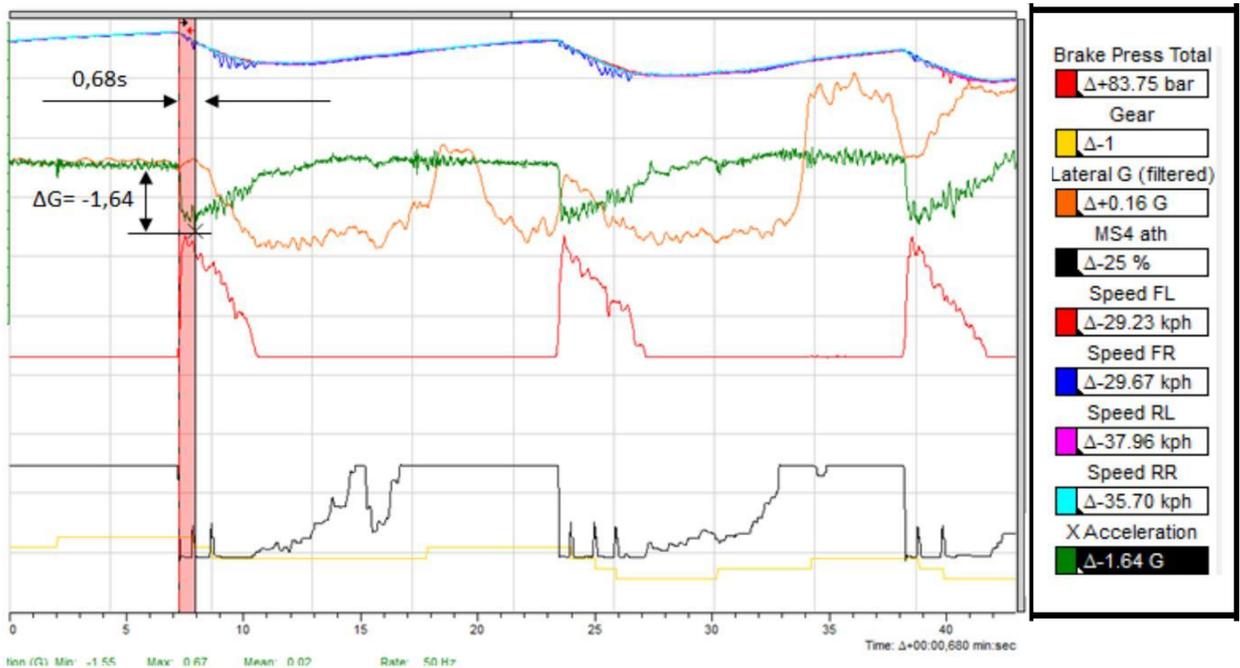
Com base nesse gráfico podemos analisar de forma mais criteriosa o que está acontecendo. Para interpretar a comparação entre os dois materiais de atrito. Na pista onde o foram feitos os testes, existem diversas curvas e para contorná-las da maneira mais rápida possível, o piloto freia sempre no limite e na iminência de travamento das rodas, aproveitando o máximo de desaceleração que o sistema pode oferecer para manter assim, melhorar sua condução conseguindo tempos de volta cada vez menores.

Em uma entrada de curva a velocidade é reduzida bruscamente até uma velocidade que o piloto julgue o ideal para fazer a curva, essas reduções são simbolizadas pelo gráfico de velocidade, e os pontos em que o piloto deixa de acionar o freio, para voltar a acelerar, pelo gráfico de acelerador.

As reduções de velocidade também podem ser auxiliadas pelo freio motor. O que pode se concluir a partir do gráfico de marcha, e as reduções pelo freio de serviço são simbolizadas através do gráfico de pressão de freio.

Analisando o Gráfico 8 em que as informações principais são apresentadas, temos a descrição da pressão de freio e podemos observar que nas frenagens com a pastilha da curva preta as pressões aplicadas normalmente são maiores e com menor duração em relação a outra pastilha. Já na pastilha descrita pela cor vermelha podemos observar que a pressão de frenagem é menor e mais longa, isso se dá pelo fato do material não gerar o atrito suficiente para que o sistema de freios consiga aproveitar toda a sua pressão e assim desacelerar o veículo.

Gráfico 8: Comparativo 2



Fonte (Arquivo Pessoal)

Glossário:

Brake press total – Pressão total de freio; Gear – Marcha; Lateral G (filtered) – Força G lateral (filtrada); MS4 ath – Diferença de velocidade entre as quatro rodas; Speed FL – Velocidade roda frontal esquerda; Speed FR – Velocidade roda frontal direita; Speed RL – Velocidade roda traseira esquerda, Speed RR – Velocidade roda traseira direita; X Acceleration – Aceleração.

No Gráfico 8 além de alguns parâmetros iguais ao anterior, temos outros que possibilitam à análise de fatores que nos ajudam a entender a dinâmica e o comportamento do sistema de freios.

Na primeira medição temos as quatro linhas praticamente alinhadas em todo o período de tempo. São as curvas de velocidade das quatro rodas mostradas independentemente, porém sobrepostas para que possamos visualizar se ocorreu alguma variação de velocidade em relação as outras, como o travamento de uma das rodas, seja no caso de uma falha do piloto que não conseguiu dosar exatamente o limite de aderência dos pneus, um travamento por falha do sistema.

No gráfico 8 a curva da força G é possível observar o aumento da força G, em frenagens e nas trocas de marchas, assim podendo identificar as reações dinâmicas a partir dessas frenagens, conforme a equação:

~~Taxa de desaceleração:~~

$$\Delta = -0,68 - (-241) / -1,64$$

A taxa de desaceleração foi um valor calculado a partir da divisão da variação de força G pelo tempo que ocorreu essa variação, assim podemos observar o quão rápido foi para conseguir essa desaceleração.

7.2.1. Considerações Sobre o Teste

Não foi possível obter informações sobre as pastilhas dos Gráficos 7 e 8. Nos podemos estimar que a pastilha de curva preta do Gráfico 7 da mais segurança e mais atrito para o piloto, pois as frenagens começam depois e perdem a velocidade mais rápido, e possuem uma pressão maior de frenagem. Provavelmente é uma pastilha que possui mais componentes metálicos em sua composição.

Já a pastilha de curva vermelha do Gráfico 7 apresenta um material com menos componentes metálicos em relação a de linha preta, o que poderia resultar em maior durabilidade.

Essas diferenças no uso das duas pastilhas são estudadas pela equipe de desenvolvimento, e a que mais se enquadrar às necessidades daquele tipo de competição será utilizada.

A pastilha de curva preta do Gráfico 7 é mais indicada à provas de longa duração, e a de curva vermelha do Gráfico para provas de alto desempenho.

8. CONCLUSÕES

Com base em todos os conhecimentos obtidos por nós durante o curso de tecnologia em Mecânica Automobilística da FATEC Santo André, todos os estudos e análises realizados na elaboração desse trabalho, os objetivos do trabalho foram atingidos satisfatoriamente.

Foi realizado estudo sobre material de atrito de freios a disco e a tambor, desde os conceitos tribológicos básicos, até os conceitos e aspectos técnicos mais relevantes de desempenho, durabilidade dos diferentes tipos de componentes utilizados na fabricação de materiais de atrito.

Acrescentamos um exemplo de avaliação de material de atrito de veículos de competição, correlacionando a parte teórica e prática do desenvolvimento de pastilhas de freios.

Promovendo a ampliação dos conhecimentos de freios automotivos e material de atrito durante o desenvolvimento do trabalho, gerando uma base técnica para novos trabalhos neste assunto.

9. PROPOSTAS FUTURAS

Para trabalhos futuros propomos novos estudos práticos com maior acesso as informações dos materiais de cada pastilha utilizados nos testes, para comparativos mais técnicos.

Ampliar estudo de literatura de tribologia, com comparação teórica e experimental entre projeto de material de atrito (cálculo) e resultados de banco de provas e veículos.

Novos sistemas, tendências futuras para freios em veículos elétricos de rua e de competição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bosch. (2005). **Manual de Tecnologia Automotiva**.

CASARIL, Alexandre. **Modelagem Matemática e Avaliação Experimental do Módulo de Elasticidade de Materiais Compósitos Particulados de Matriz Fenólica Para Uso como Material de Fricção**, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

CHAN, D. e STACHOWIAK, G. W. **Review of automotive brake friction materials**, Crawley: School of Mechanical Engineering, University of Western Australia, 2004.

CHIARONI, Alexandre B. **TCC ANÁLISE TÉRMICA DE UM FREIO A TAMBOR PARA RODAS TRASEIRAS DE VEÍCULOS DE PASSEIO**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2014.

FERNANDES, Dirceu. **Tópicos: Aplicações e Materiais de Atrito**, Santo André: FATEC Santo André, 2016.

FERNANDES, Dirceu. **Tópicos: Freios de Roda, Freios a Disco e Freios a Tambor**. Santo André: FATEC Santo André, 2016.

GUESSER, Wilson Luiz, BAUMER, Ivo, TSCHIPTSCHIN, André Paulo, CUEVA, Gustavo e SINATORA, Amilton. **Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio**, Gramado: SAE Brasil, 2003.

HALLIDAY, David e RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física 1**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

http://www.atebrakes.com/media/1310/ate_brake_pads_illustration_2012_mc.png?anchor=center&mode=crop&width=2000&upscale=false. Acessado em: Setembro de 2017

<http://www.autotechme.com/brake-drum/417-3054230401-brake-drum.html>. Acessado em: Abril de 2018

<http://www.carrosinfoco.com.br/carros/2016/08/funcionamento-normas-e-detalhes-dos-fluidos-de-freios-automotivos/> Acessado em: Agosto de 2017

<https://ebcbrakes.com/product/orange-stuff/> Acessado em: Setembro de 2017

<https://www.reparadorfiat.com.br/pagina/550/regulagem-do-curso-da-alavanca-do-freio-de-m--227-o---modelos-fiat.aspx> Acessado em: Junho de 2018

<http://www.tomorrowstechnician.com/brake-pad-wear-sensors/> Acessado em: Junho de 2018

<http://www.transitoideal.com.br/pt/artigo/1/conductor/88/as-consequencias-do-excesso-de-velocidade>. Acessado em: Outubro de 2017

INMETRO. **REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE PARA MATERIAIS DE ATRITO DESTINADOS AO USO EM FREIOS DE VEÍCULOS RODOVIÁRIOS AUTOMOTORES, ANEXO DA PORTARIA INMETRO Nº 17/ 2014**, Brasil, 2014

JOCA, Jhonny Frank Sousa. **Lubrificantes e Fluidos automotivos aula 1**. Santo André: FATEC Santo André, 2016.

PAZIAN, Alexandre. **Processos de Fabricação I, Aulas 07: Materiais Cerâmicos**. Santo André, FATEC Santo André, 2016.

PUHN, Fred. **Brake Handbook**. Tucson: HPBooks, 1985.

SERBINO, Edison Marcelo. **Um estudo dos mecanismos de desgaste em disco de freio automotivo ventilado de ferro fundido cinzento perlítico com grafita lamelar**, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

SOUZA, Rogério Eustáquio de. **Estudo do comportamento de Sapatas de Freio de Resina Fenólica, em frenagem por atrito de Rodas Metroferroviárias**, Ouro Preto: UFOP – UEMG, 2004.

ZANGIACOMI, Marco Henrique. **Desenvolvimento e Análise De Compósitos Reforçados Com Fibras De Panox e Fibras De Aramida Utilizados Em Materiais De Fricção Em Freios Automotivos**, Campinas: UNICAMP, 2002.

ANEXOS

ANEXO A- INMETRO. REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE PARA MATERIAIS DE ATRITO DESTINADOS AO USO EM FREIOS DE VEÍCULOS RODOVIÁRIOS AUTOMOTORES, ANEXO DA PORTARIA INMETRO Nº 17/ 2014, Brasil, 2014

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ARTMANN, Albertina. **ESTUDO PARA A OTIMIZAÇÃO DO PROCESSAMENTO DE FORMULAÇÕES DE RESINA FENÓLICA APLICADA À MATERIAL DE FRICÇÃO**, Caxias do Sul, Universidade de Caxias do Sul, 2008.

DA ROSA, Andrigo, GUARAZE, Kleiton, MEGGIOLARO, Lucas Merlin, GODOIS, Paulo Ricardo, MARTINS, Rafael, PENSO, Igor Luiz. **COMPARATIVO PASTILHAS DE FREIO METALICA X PASTILHAS DE FREIO CERAMICAS**, Caxias do Sul, Centro Universitário da Serra Gaúcha, 2017.

DE CARVALHO, Eduardo Augusto e DE ALMEIDA, Salvador Luiz M. **CAULIUM E CARBONATOS DE CÁLCIO: COMPETIÇÃO NA INDÚSTRIA DE PAPEL**, Rio de Janeiro, Ministério da Ciência e Tecnologia e Centro de Tecnologia Mineral, 1997.

LIMPERT, Rudolf. **BRAKE DESIGN AND SAFETY SECOND EDITION**, Michigan, Society of Automotive Engineers, 1999.

MATOZO, Tedesco Luciano. **ANÁLISE DE MATERIAIS DE FUNDO DE ALTO AMORTECIMENTO E DE SEUS EFEITOS EM PASTILHAS DE FREIO**, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

MENETRIER, Ademir Reus. **ESTUDO DE VARIÁVEIS DE COMPOSIÇÃO E PROCESSO PARA CONTROLE DA COMPRESSIBILIDADE**, Caxias do Sul, Universidade de Caxias do Sul, 2006.

PAVIAK, Rafael Piani. **INFLUÊNCIA DE ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS EM PASTILHAS NA REMOÇÃO DE RUÍDO EM SISTEMAS DE FREIO AUTOMOTIVO**, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

ZANGIACOMI, Marco Henrique e BITTERNCURT, Edison. **COMPÓSITOS POLIMERICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE PANOX E FIBRAS DE ARAMIDA**, Uberlândia, UNICAMP, 2006.

ZART, Bruno Christiano Correa Ruiz. **ANALISE DO EFEITO DO HISTORICO DE ALTAS TEMPERATURAS DE FRENAGEM (FADE) SOBRE ATRITO MEDIDO EM PASTILHAS DE FREIO**, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio grande do Sul, 2015.