

RAPHAEL HAYASHI ALVES

**ANÁLISE DE DESGASTE EM MATERIAIS
APLICADOS EM DISCOS DE FREIO**

Guaratinguetá-SP
2015

RAPHAEL HAYASHI ALVES

ANÁLISE DE DESGASTE EM MATERIAIS
APLICADOS EM DISCOS DE FREIO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

Guaratinguetá
2015

A474a	Alves, Raphael Hayashi Análise de desgaste em materiais aplicados em discos de freio / Raphael Hayashi Alves. - Guaratinguetá, 2014 48 f.: il. Bibliografia: f. 46-48 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014 Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho 1. Desgaste mecânico 2. Freios I. Título CDU 621.841
-------	--

Raphael Hayashi Alves

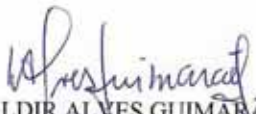
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA
UNESP-FEG

Janeiro 2015

DADOS CURRICULARES

RAPHAEL HAYASHI ALVES

NASCIMENTO 06.05.1990 – SÃO PAULO/SP

FILIAÇÃO JORGE LUIZ ALVES
MARCIA KIMIE HAYASHI ALVES

2009/2014 Curso de Graduação
Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, Jorge e Márcia, e a toda minha família, que me apoiaram em todos os momentos e acreditaram em meu potencial, que me deram condições para chegar aonde cheguei e alcançar horizontes muito mais distantes.

À República Vamointão, minha casa em Guaratinguetá, que se tornou minha segunda família.

Ao Professor Angelo Caporalli Filho, por ser meu orientador e me guiar neste Trabalho de Graduação.

À Equipe Piratas do Vale Bardahl por ter me auxiliado nos ensaios efetuados neste Trabalho.

Aos técnicos da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, que me auxiliaram em alguns ensaios.

E a todos que de alguma forma fizeram parte desta inesquecível fase da minha vida.

ALVES, R.A. **Análise de desgaste em materiais aplicados em discos de freio**. 2014. 48 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

As competições de Baja SAE desafiam alunos estudantes de engenharia a projetar e construir veículos *offroad*, os preparando para o competitivo mercado de trabalho. Esta monografia tem como objetivo estudar uma parte do sistema de frenagem de um veículo Baja SAE, o disco de freio. Dando atenção ao desgaste sofrido por discos de dois diferentes materiais, aço 1045 e aço inoxidável 304, auxiliando a Equipe Piratas do Vale Bardahl na melhor seleção deste. Ensaios de frenagem foram feitos em uma bancada de testes. Ambos os discos sofreram as mesmas condições de frenagem. Material de pastilhas de freio, pressão da linha de freio, tempo de frenagem, quantidade de frenagens, foram parâmetros que se repetiram nos ensaios dos diferentes tipos de disco, com o objetivo de se garantir um alto poder de comparação entre os dados obtidos. Antes e depois dos ensaios os disco foram pesados e medidos, para se fazer uma comparação. Após os ensaios de frenagem, os discos foram submetidos a ensaios de dureza e rugosidade superficial. Com os dados obtidos e observações feitas nas partes desgastadas, a comparação entre estes dois materiais foi feita, chegando-se a uma seleção do melhor material para equipe. Os testes mostraram que o aço 1045 possui mais vantagens, comparado ao aço inoxidável 304, quando aplicados a discos de freio, nas condições testadas.

PALAVRAS-CHAVE: Disco de freio; Desgaste; Comparação; Baja SAE;

ALVES, R.A. **Wear analysis in materials applied in brake discs**. 2014. 48 p. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

Baja SAE competitions challenge engineering students to design and build offroad vehicles, preparing them for the competitive job market. This monograph aims to study a part of the braking of a Baja SAE vehicle system, the brake disc. Giving attention to the wear suffered by discs of two different materials, steel 1045 and stainless steel 304, helping the team Piratas do Vale Bardahl in the best selection between them. Braking tests were performed on a test bench. Both discs have suffered the same braking conditions. Brake pads material, brake line pressure, braking time, number of braking, were parameters which were repeated in the testing of different types of disk, in order to ensure a high power comparison between the obtained data. Before and after the disk tests were weighed and measured, to make a comparison. After the brake tests, the disks were subjected to hardness and surface roughness testing. With the data collected and observations made in the worn parts, the comparison between these two materials was made, obtaining a selection of the best material for the team. The tests showed that steel 1045 has more advantages, compared to stainless steel 304, when applied to brake discs, on the tested conditions.

KEYWORDS: Braking discs; Ware; Comparison; Baja SAE;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Freio em um Veículo de Passeio.....	19
Figura 2 – Pedal de Freio	20
Figura 3 – Pastilhas de Freio.....	22
Figura 4 – Disco de Freio.....	24
Figura 5 – Vista Frontal	30
Figura 6 – Corte B-B.....	31
Figura 7 – Bancada	34
Figura 8 – Esquema da Bancada de Ensaios.....	35
Figura 9 – Estado Final das Pastilhas de Freio	43
Figura 10 – Superfície dos Discos de Freio	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso dos Discos.....	39
Tabela 2 – Espessura e Desgaste do Disco INOX 304.....	40
Tabela 3 - Espessura e Desgaste do Disco AÇO 1045	40
Tabela 4 – Dureza Rockwell B	41
Tabela 5 – Rugosidade na Superfície do Disco	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASM	American Society for Metals (atualmente ASM International)
CVT	Continuously Variable Transmission
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
SAE	Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	12
1.2	OBJETIVO GERAL	12
1.2.1	Objetivos Específicos.....	13
1.3	JUSTIFICATIVA.....	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	SISTEMAS DE FREIO	15
2.1.1	Histórico	15
2.1.2	Fenômenos presentes em um sistema de freio	16
2.1.3	O freio	18
2.2	MATERIAIS	25
2.2.1	Aço 1045	25
2.2.2	Aço Inox 304	26
3	O PROJETO	28
3.1	CONFIGURAÇÃO DA PINÇA	28
3.2	PASTILHA DE FREIO.....	29
3.3	DISCOS DE FREIO.....	29
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	BANCADA DE ENSAIOS	33
4.2	MEDIÇÕES ANTES DOS ENSAIOS.....	35
4.3	CICLOS DE FRENAGEM	36

4.4	ENSAIOS	36
4.5	MEDIÇÕES PÓS ENSAIOS	37
4.6	ENSAIO DE DUREZA.....	37
4.7	ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	38
5	RESULTADOS	39
5.1	MEDIDAS DE PESO.....	39
5.2	MEDIDAS DE ESPESSURA	39
5.3	DUREZA SUPERFICIAL	41
5.4	ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	41
5.5	ASPECTOS OBSERVADOS	42
6	DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS	46
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Projeto Baja SAE é um desafio lançado aos alunos de engenharia pela *Society of Automotive Engineers*, onde se envolvem com um caso real de desenvolvimento de projeto, desde sua concepção, projeto detalhado e construção de um veículo *offroad*. Este visa incrementar sua preparação para o mercado de trabalho. No Brasil, recebe o nome de Projeto Baja SAE BRASIL [SAE BRASIL, 2014].

A Equipe Piratas do Vale, fundada em 1997, representa a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Guaratinguetá em competições de Baja SAE. Na época de realização deste trabalho, o nome da equipe recebeu também o nome de seu patrocinador, sendo então nomeada Equipe Piratas do Vale Bardahl.

Todo conhecimento técnico utilizado na construção do veículo de competição da equipe vem dos alunos envolvidos no projeto, empregando o que aprenderam na prática, em pesquisas relacionadas e o que foi ensinado em sala de aula. E também de professores que auxiliam a equipe.

Neste Trabalho de Graduação foi analisado o desgaste de um dos componentes do sistema de frenagem utilizado nos projetos para veículos de competição da Equipe Piratas do Vale Bardahl, o disco de freio. Esta análise pretende auxiliar a equipe no aprimoramento de seu veículo, agregando conhecimento ao seu projeto.

1.2 OBJETIVO GERAL

Análise dos materiais utilizados atualmente para a fabricação de discos de freio, considerando desgaste e validação de suas propriedades mecânicas.

1.2.1 Objetivos Específicos

Busca-se a seleção mais adequada, dentre os materiais analisados, para confecção dos discos de freio, onde os aspectos importantes são: melhor desempenho, maior durabilidade do material dos discos e menor custo na obtenção dos discos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em competições de automobilismo, como de Baja SAE, o poder de frenagem e a durabilidade dos componentes do sistema de freios são de extrema importância para o desempenho do veículo. Pequenas perdas de desempenho em um sistema como este podem custar posições na classificação final na competição.

Desta maneira o conhecimento do desgaste sofrido por um componente como este pode ajudar a equipe a buscar melhores resultados em uma disputa. A seleção bem feita do material pode ajudar a equipe a prever a vida útil de um disco de freio, um eventual excesso no desgaste e a perda de desempenho.

Esta análise do desgaste pode trazer também benefícios financeiros. Juntamente com o conhecimento do custo de confecção de cada disco, pode-se verificar qual material oferece melhor custo-benefício ao projeto. Ressaltando que custo é também um quesito analisado nas competições de Baja SAE, desafiando os participantes a controlar os gastos com o veículo, preparando-os para o mercado de trabalho.

Desta maneira, ensaios assistidos podem simular as condições de uso de certos elementos, e oferecer parâmetros que possibilitem uma comparação entre eles. Em uma bancada de testes faremos uma análise do desgaste sofrido por discos de freio de diferentes materiais sob as mesmas condições de frenagem.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica dos conceitos essenciais para elaboração deste trabalho.

No Capítulo 3 será mostrado como o sistema de freio é instalado e utilizado no veículo.

No capítulo 4 será mostrada a metodologia dos ensaios, mostrando todos dispositivos e instrumentos utilizados.

No capítulo 5 serão mostrados os resultados obtidos antes, durante e depois dos ensaios.

No capítulo 6 serão discutidos os resultados obtidos nos ensaios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica está dividida de modo a ressaltar separadamente os conceitos associados a este Trabalho de Graduação. Mostrando primeiramente o funcionamento de um sistema de freio a disco e posteriormente informações sobre materiais analisados neste trabalho.

2.1 SISTEMAS DE FREIO

Esta seção da fundamentação teórica fará uma breve explicação do que é um sistema de freio a disco e sobre seu funcionamento. Fenômenos físicos presentes em sua atuação serão explicados, e uma apresentação sobre cada parte do sistema individualmente será feita posteriormente, abordando sua função no todo.

2.1.1 Histórico

O desenvolvimento e uso de freios a disco começou na Inglaterra no final do século XIX. A primeira patente de um sistema de freio a disco ocorreu no início do século XX, criado pelo engenheiro britânico William Lanchester (1868-1946). Nesta patente, o engenheiro o descreveu como um disco de metal rigidamente conectado a uma das rodas traseiras de um veículo. E quando o disco fosse apertado em sua borda por um par de garras, o veículo seria freado [ROLT, 1962].

Já o sistema de freio a disco, como conhecemos hoje, começou a aparecer em 1951 na clássica corrida das 500 milhas de Indianápolis, nos EUA, utilizado pelos irmãos Conze [MACNAUGHTON, 1998].

A partir do sistema utilizado nesta competição automobilística, aperfeiçoamentos vêm sendo feitos, e freios mais confiáveis e eficazes estão presentes atualmente em carros de

competição e de rua. Isto mostra que a utilização de competições automobilísticas para o desenvolvimento de novas tecnologias é uma prática comum na indústria.

2.1.2 Fenômenos presentes em um sistema de freio

2.1.2.1 Atrito

O fenômeno físico mais importante relacionado a um sistema de frenagem é o atrito.

Segundo Halliday, quando empurramos ou tentamos empurrar um corpo sobre uma superfície, a interação dos átomos do corpo com os átomos da superfície faz com que haja uma resistência ao movimento. A resistência é considerada como uma única força (F_A), que recebe o nome de **força de atrito** ou simplesmente **atrito**. Esta força é paralela à superfície e aponta no sentido oposto ao do movimento ou tendência ao movimento.

$$F_A = \mu \cdot F_N \quad (1)$$

Podemos ver acima que a força de atrito depende de dois fatores, F_N (força normal) e μ (coeficiente de atrito entre as superfícies).

A força normal F_N é a força de reação que surge quando um corpo é empurrado contra outro. No caso do sistema de freio a disco, F_N é a força que empurra a pastilha de freio contra o disco.

Ainda segundo Halliday, o coeficiente de atrito μ entre as superfícies é adimensional. Seu valor depende das propriedades de ambas as superfícies em contato. Ele é uma relação entre a força de atrito (F_A) e a força normal (F_N) [ERIKSSON, 2000].

$$\mu = F_A / F_N \quad (2)$$

O atrito no sistema de freio a disco transforma energia cinética do veículo em energia térmica através do contato entre as superfícies da pastilha e do disco de freio. E esta é dissipada para o ambiente em forma de calor [PETER, 2008].

A força de atrito entre duas superfícies é determinada por dois principais fatores: as propriedades de contato dos materiais e a área real de contato. Tal força não é determinada de maneira trivial, pois esses dois fatores variam muito segundo as condições de estudo e operação do conjunto em questão. As superfícies podem ser descritas pelas características a seguir [ASM HANDBOOK, 1992]:

- Topografia: ondulações variam desde a escala atômica até tamanhos próximos ao da peça. Existem marcas devido a processos de fabricação, pequenos vales devido a micro-eventos e ainda rugosidade em escala atômica;
- Macrodesvios: desvios de forma, usualmente causados por fatores como a fabricação do componente, como por exemplo marcas de usinagem;
- Ondulações: causadas por pequenas vibrações periódicas do equipamento de fabricação durante o processo;
- Rugosidade: causada pela geometria das ferramentas de corte e pelas ondulações sofridas na produção da peça;
- Micro-rugosidade: aparece devido à estrutura cristalina da superfície, e é afetada na escala atômica, sendo até mesmo influenciada por imperfeições no material. Efeitos de corrosão são notados nessa escala.

O processo de fricção de uma superfície sobre a outra faz com que ocorra o desgaste dos materiais, por mecanismos que serão mostrados a seguir.

2.1.2.2 Resistência ao desgaste

Um dos pontos mais importante a serem considerados para a escolha efetiva de um material para a confecção de um disco de freio, e objeto de estudo deste Trabalho de Graduação, é o desgaste deste material. Para um material sofrer menos desgaste em relação a outro, sua resistência ao desgaste deve ser maior que a deste outro material.

Diversos fatores devem ser analisados quando estudamos completamente a resistência de um material ao desgaste. Fatores que alteram diretamente as propriedades do material, como por exemplo, o atrito e a condutividade térmica.

Segundo a norma DIN 50320 (2001), desgaste é a perda progressiva de material de superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, ou seja, o contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um corpo sólido. Líquido ou gasoso. Ainda segundo a norma há quatro mecanismos de desgaste básicos:

- Adesão: formação e posterior rompimento de ligações adesivas interfaciais;
- Abrasão: remoção do material por sulcamento;
- Fadiga superficial: fadiga mecânica e a consequente formação de trincas na superfície do material, devido a tensões cíclicas tribológicas;
- Reação triboquímica: formação de produtos das reações químicas que podem ocorrer entre os elementos de um tribossistema, que tem início por uma ação tribológica;

Quando em um ambiente favorável a oxidação, duas superfícies entram em contato, ocorrem reações que acabam por gerar filmes de óxido nessas superfícies, que acabam sendo removidos e gerados novamente consecutivamente, promovendo o desgaste oxidativo. No início o desgaste se dará por adesão, mas depois esses mesmos óxidos removidos se tornam detritos que causam o desgaste abrasivo. O que pode vir a ser um agravante no desgaste do disco de freio.

O desgaste no material do disco de freio pode ser influenciado pelo material da pastilha escolhida. Podem ser colocadas proteções a esses fatores, porém quando em excesso, podem comprometer a taxa de resfriamento dos componentes do sistema, ou acabar retendo detritos abrasivos, intensificando o processo de desgaste por abrasão.

2.1.3 O freio

O freio a disco é o melhor sistema de frenagem conhecido na atualidade, tanto em confiabilidade, quanto em eficácia. Ele é empregado em diversos tipos de veículo, de carros de

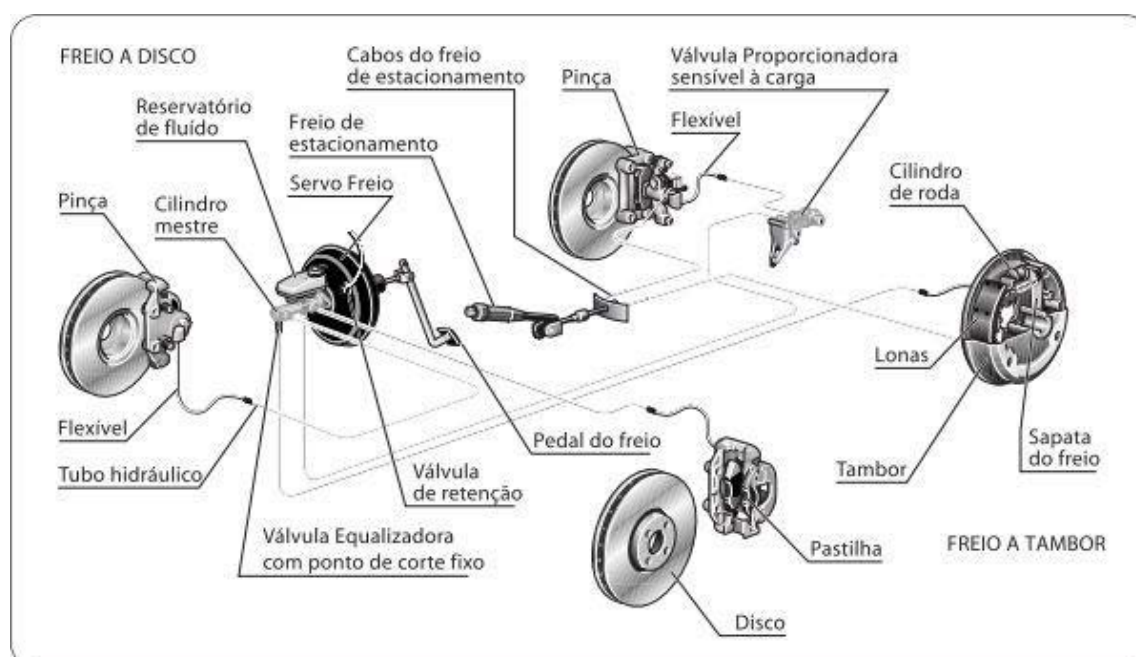
passeio a carros de competição, de locomotivas ferroviárias a todos tamanho de aviões [THE FAMILY CAR, 2014].

Quando o motorista vê a necessidade de diminuir a velocidade do veículo que está conduzindo, este utiliza o pedal do freio. Ao apertá-lo o motorista exerce uma força que cria uma pressão hidráulica no fluido do sistema, esta é transferida até os êmbolos localizados nas pinças. Estes êmbolos forçam as pastilhas contra ambos os lados do rotor. Quando entram em contato, surge um atrito entre o disco e as pastilhas, transformando a energia cinética de rotação em energia térmica, que deve ser dissipada.

Ao projetar um sistema de frenagem devem ser analisados aspectos como segurança, eficiência e durabilidade [LAMB, 2008]. Os sistemas de freio a disco têm resistência superior ao desgaste e são de manutenção mais fácil, principalmente em função de sua geometria, quando comparados aos sistemas de freio a tambor [MALUF, 2005].

Abaixo, a Figura 1 irá mostrar de forma geral o sistema de freio de um carro de passeio. Nas rodas traseiras estão instalados freios a tambor, que não são o alvo deste trabalho. Nas rodas dianteiras, temos o sistema de freio a disco.

Figura 1 – Sistema de Freio em um Veículo de Passeio



[Fonte: NAKATA, catálogo]

2.1.3.1 Pedal

De todo o sistema, o pedal é a única parte que fica ao alcance do motorista durante a condução do veículo. Este serve como um controle da velocidade, onde o condutor dosa a força aplicada em função da desaceleração desejada no veículo.

O pedal funciona na prática como uma alavanca, onde a força de entrada ($F_{PÉ}$) gera uma força de saída (F_{PEDAL}), conforme Figura 2 abaixo. Esta força de entrada aplicada pelo motorista não seria suficiente para gerar o atrito necessário, então ela é amplificada pelo efeito de alavanca de modo a torná-la suficiente para parar o veículo.

Figura 2 – Pedal de Freio



Fonte: [PRÓPRIO AUTOR]

A força exercida pelo motorista é transferida até o pistão acoplado no início do circuito hidráulico. Esta força é convertida em pressão hidráulica no fluido incompressível do sistema.

2.1.3.2 Circuito Hidráulico

O circuito hidráulico recebe a força aplicada, que precisa ser levada até os êmbolos. Para isto contamos com um fluido incompressível, tubos flexíveis, o cilindro mestre e um reservatório de fluido.

A força F_{PEDAL} , distribuída na área do êmbolo do cilindro mestre, gera a pressão para todo sistema hidráulico.

$$P_{SISTEMA} = F_{ENTRADA} / A_{EMBOLO} \quad (3)$$

A função do cilindro mestre é também abastecer o circuito hidráulico com fluido, vindo do reservatório e distribuir a pressão hidráulica. O excesso do fluido não utilizado fica estocado no reservatório. O fluxo de fluido nos tubos flexíveis transmite a pressão gerada no cilindro mestre até os êmbolos localizados nas pinças de freio [BOSCH, 2014].

O fluido de freio é um composto sintético ou semi-sintético cujas características são a capacidade de não se comprimir e a de não absorver água. Além disso, ele funciona como lubrificante, protegendo as partes do sistema contra a corrosão. Como ele trabalha a altas temperaturas no sistema de frenagem, deve possuir alta temperatura de ebulição [BOSCH, 2014].

2.1.3.3 Pinça de Freio

Este elemento do sistema de frenagem a disco fica acoplado a alguma parte fixa do veículo.

A pinça recebe a parte final do circuito hidráulico, onde a pressão do óleo é convertida em força nos êmbolos, que é aplicada nas pastilhas de fricção [THE FAMILY CAR, 2014].

A força de arrasto que surge na pastilha quando esta entra em contato com o rotor, na direção da velocidade tangencial do disco, tem que ser suportada pela pinça, por isso este elemento deve ser bem fixado.

2.1.3.4 Pastilha

Segundo a página virtual da The Family Car, as pastilhas de freio são projetadas para ter alta fricção no contato com os discos, de modo a transformar rapidamente a energia cinética em térmica. Quanto maior a taxa desta transformação, maior a eficiência deste sistema de freio.

Atualmente as pastilhas são feitas de fibras minerais, celulose, aramida (Kevlar®), aço, cerâmica, vidro picado, entre outros. Sua escolha deve levar em conta o poder de fricção, a longevidade do material e níveis de ruído.

Elas precisam ser a prova d'água, ou seja, não perder significativamente a eficiência de frenagem quando são submetidas a condições onde há a presença de água. O que é de extrema importância, uma vez que os veículos onde são instaladas estão sujeitos a diversas condições de uso.

Abaixo temos a Figura 3 ilustrando pastilhas de freio.

Figura 3 – Pastilhas de Freio



Fonte: [BOSCH]

O processo de fabricação é geralmente a compactação a quente, e são utilizados de 10 a 20 componentes diferentes. É necessário que estejam presentes os seguintes componentes na pastilha [ERIKSSON, 2002]:

- Aglutinante: seu papel é manter a estrutura unida formando uma matriz termicamente estável. Geralmente são usadas resinas fenólicas termofixas. A adição de borracha permite um maior umedecimento da matriz [ERIKSSON, 2002];
- Materiais estruturais: são responsáveis pela resistência mecânica. São usados carbono, aramida (Kevlar®), metais, vidro picado [ERIKSSON, 2002];
- Enchimento: traz uma facilidade para a confecção das pastilhas e preenche o espaço sem altos custos. Mica, vermiculita ou sulfato de bário são usados como enchimento [ERIKSSON, 2002];
- Aditivos para fricção: alguns materiais são adicionados para aumentar o coeficiente de atrito entre as superfícies da pastilha e do disco, como por exemplo, partículas abrasivas (silício e alumínio). Lubrificantes sólidos como o grafite são utilizados para promover uma estabilidade do coeficiente de atrito em elevadas temperaturas de operação. O silício adicionado para aumentar o coeficiente de atrito ainda promove uma superfície de contato mais aderente, removendo óxidos e outros filmes da superfície do disco [ERIKSSON, 2002];

2.1.3.5 Disco (Rotor)

O disco de freio, ou comumente conhecido como rotor, foi o principal objeto de estudo neste Trabalho de Graduação. Abaixo na figura 4 temos um exemplo de disco de freio.

Figura 4 – Disco de Freio



Fonte: [BOSCH].

Os discos de freio podem ser confeccionados de metais, como ferro fundido, liga de aço, ou também de materiais cerâmicos e compósitos. A escolha deste material deve levar em conta diversos fatores, como peso, dissipação de calor, custo, resistência ao efeito de *fading*¹, etc.

Em veículos que não exigem tanto do sistema de frenagem, é mais comumente feito em ferro fundido, por apresentar boas propriedades para dissipação térmica, satisfatória resistência ao desgaste, resistência mecânica suficiente, fácil fabricação em larga escala e preço acessível [ERIKSSON, 2002]. Porém em veículos que levam este sistema a altos estresses, outros materiais devem ser empregados.

Este rotor é preso a uma roda, ou um eixo, desta maneira sua velocidade angular é igual à deste componente rotativo. Quando ocorre o contato com as pastilhas de fricção, uma força de resistência ao movimento aparece, a força de atrito.

A força de atrito gerada pelo contato da pastilha com o rotor cria um torque contrário ao sentido de rotação. Este torque é sentido por todo eixo rotativo onde o rotor está acoplado, diminuindo sua velocidade, e consequentemente do veículo.

Os discos podem ter tamanhos e geometrias diferentes, cada um atendendo as necessidades do projeto. Furos e rasgos no perfil do disco podem ser feitos, de modo a promover

¹ Efeito de *fading*: quando a energia cinética é convertida em energia térmica nos freios, há um aumento gradual de temperatura dos discos de freio. O calor produz dois efeitos. Na parte hidráulica, eleva a temperatura do fluido, e no material de atrito, diminui-lhe o coeficiente de atrito. A diminuição de atrito é o que vai ocasionar o *fading*, causando uma perda na capacidade de frenagem do veículo.

a descontaminação deste durante o uso. Assim como geometrias para intensificar a dissipação de calor para o ambiente [REVISTA POPULAR SCIENCE, 1964].

2.2 MATERIAIS

Esta seção da fundamentação teórica fará uma análise dos materiais utilizados para confeccionar os discos testados neste Trabalho de Graduação.

O aço 1045 foi selecionado para este ensaio, pois é utilizado no veículo atual da equipe Piratas do Vale Bardahl. O aço inoxidável 304 foi selecionado, pois é comumente utilizado para confecção de discos de freio existentes no mercado, para atender condições de uso semelhante ao que o carro da equipe está sujeito, ambiente com presença de água, terra, areia, etc.

A eficiência do sistema de frenagem, e consequentemente a segurança veicular, está diretamente relacionada com a qualidade dos materiais utilizados [JOHANN, 2012].

2.2.1 Aço 1045

A liga SAE 1045 ou AISI 1045 pertence à família das ligas de ferro com médio carbono. Com 0,45% de carbono em sua composição, o aço 1045 possui boas propriedades mecânicas e tenacidade bem como boas usinabilidade e soldabilidade quando laminado a quente ou normalizado [INTERLLOY, 2014]. As suas aplicações compreendem eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais e de máquinas, virabrequim.

O número de classificação deste aço representa sua composição química, como mostrado a seguir:

- 1xxx – este algarismo 1 nos mostra que trata-se de uma liga aço carbono;
- x0xx – o algarismo 0 na segunda casa nos mostra que trata-se de um aço carbono simples, (outros elementos em teores desprezíveis, máximo de 1,0% Mn);
- xx45 – os dois últimos algarismos nos mostra o teor de carbono nesta liga (0,45% C);

Ainda segundo a Interlloy, a dureza Brinell varia de 170HB a 210HB, onde na condição normalizada, tem o valor de 187HB ou 84HRB. Tem resistência a tração na faixa de 570MPa a 700MPa, e 640MPa na condição normalizada.

Composição do aço carbono 1045 [INTERLLOY, 2014] [AZOM, 2014]:

- Carbono (C): 0,420 – 0,50 [%];
- Ferro (Fe): 98,51 – 98,98 [%];
- Manganês (Mn): 0,60 – 0,90 [%];
- Silício (Si): 0,10 – 0,35 [%];
- Fósforo (P): $\leq 0,040$ [%];
- Enxofre (S): $\leq 0,050$ [%];

2.2.2 Aço Inox 304

Aços inoxidáveis são ligas de base férrica que contêm um mínimo de aproximadamente 11% de cromo, que é a quantidade necessária para prevenir a formação de ferrugem em atmosferas não poluídas. Elas atingem sua característica inoxidável através da formação de um filme superficial rico em óxido de cromo invisível e aderente. Este óxido se forma e regenera na presença de oxigênio, e não permite que a atmosfera atinja as estruturas do aço nas camadas abaixo desta. Outros elementos podem ser adicionados à liga a fim de melhorar algumas características particulares. Elementos como níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio, enxofre e selênio [ASM HANDBOOK, 1994].

No disco de freio analisado é usada uma liga de aço inoxidável denominada AISI 304. De acordo com o Handbook de aços inoxidáveis da ASM a composição química desta liga é:

AISI 304: em sua composição encontramos 0,80% de carbono (C), entre 18,00% e 20,00% de cromo (Cr), 0,75% de molibdênio (Mo), 2,00% de manganês (Mn), 1,00% de silício (Si), 0,045% de fósforo (P), 0,030% de enxofre (S), entre 8,00% e 10,50% de níquel (Ni);

Ainda de acordo com o Handbook de aços inoxidáveis da ASM, esta liga é classificada como austenítica. Dentro desta classe, existem duas subclasses: ligas cromo-níquel e ligas

cromo-mangânio-nitrogênio, a liga AISI 304 está dentro das ligas cromo-níquel. Propriedades mecânicas apresentadas no Handbook da ASM (liga na condição recozida): dureza Rockwell 81HRB, resistência a tração de 241MPa.

A liga AISI 304 se localiza no meio da faixa de resistência a corrosão promovida por aços inoxidáveis. Ele resiste à maioria dos ácidos oxidantes, a muitas soluções esterilizantes, a químicos orgânicos e corantes e a uma grande variedade de químicos inorgânicos [ASM HANDBOOK, 1994].

3 O PROJETO

O veículo Baja da equipe Piratas do Vale Bardahl possui três pontos de atuação do sistema de frenagem, onde em cada um está localizado um disco de freio:

- 1 disco acoplado a roda dianteira direita;
- 1 disco acoplado a roda dianteira esquerda;
- 1 disco acoplado ao eixo traseiro;

3.1 CONFIGURAÇÃO DA PINÇA

Dentre as diversas configurações possíveis de freios a disco, o projeto faz utilização de duas dessas configurações: pinça fixa e pinça flutuante.

No eixo traseiro, o projeto prevê a utilização de freio a disco de **pinça fixa**. Nesta configuração a pinça de freio não tem movimento relativo em relação ao disco. A construção desta pinça de freio permite que o fluxo de fluido incompressível passe pelo corpo dela, alcançando os pistões em ambos os lados do disco. Desta forma, todos os pistões recebem a mesma pressão de linha, exercendo pressões iguais em ambos os lados do rotor e atuando de forma simultânea [DIULGHEROGLO, 2008].

Em ambas as rodas dianteiras faz-se uso de freio a disco com **pinça flutuante**. Nesta configuração, um ou mais pistões são instalados apenas na parte interna da pinça de freio. Ao receber a pressão da linha de freio, o pistão empurra a pastilha interna, que é forçada contra o disco. A força de reação que surge neste contato faz com que a pinça se mova na direção contrária ao pistão, fazendo com que a pastilha externa também toque o disco, criando uma força de arrasto em ambos os lados do disco [DIULGHEROGLO, 2008].

3.2 PASTILHA DE FREIO

As pastilhas utilizadas no veículo são semi-metálicas, nas rodas dianteiras e no eixo traseiro. Porém nas pinças dianteiras são usadas pastilhas fabricante Fischer, e na pinça traseira são utilizadas pastilhas da EBC Brakes. Esta diferença das marcas das pastilhas deve-se unicamente as diferenças geométricas presentes nos modelos das pinças.

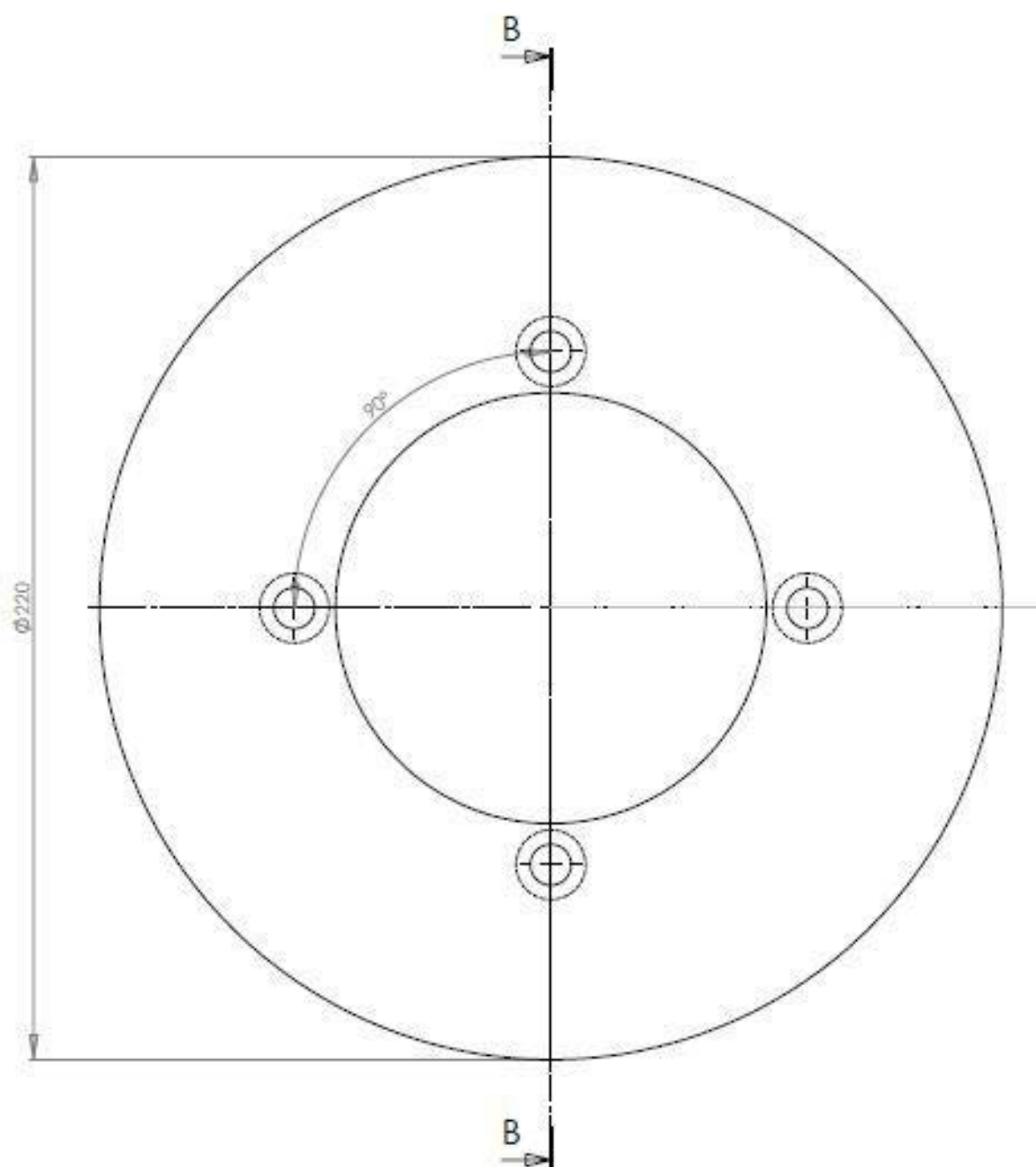
Este tipo de pastilha tem tipicamente latão, ferro e/ou alumínio adicionados em determinadas proporções à resina, incrementando suas características em altas temperaturas e a resistência mecânica do composto.

3.3 DISCOS DE FREIO

O disco foi projetado e desenvolvido por graduandos em engenharia, integrantes da Equipe Piratas do Vale.

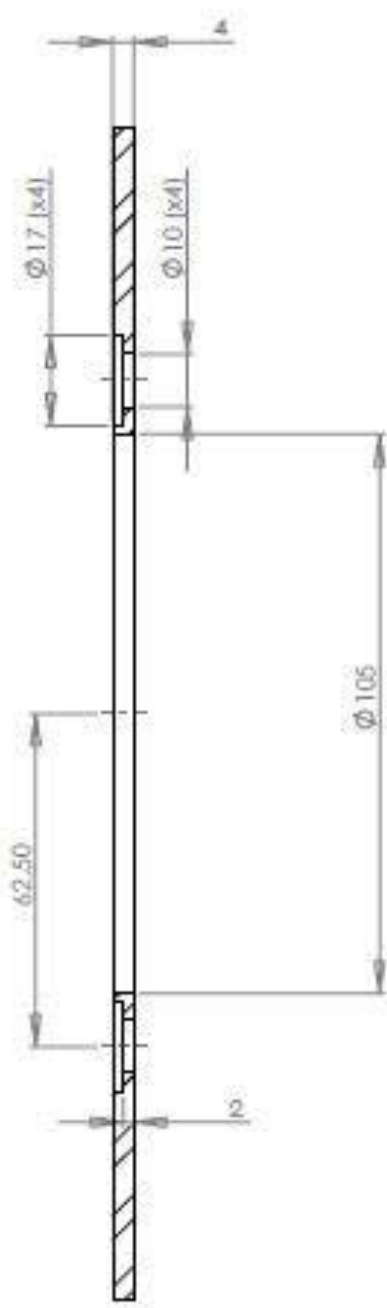
Ele possui diâmetro externo nominal de 220 mm, e interno de 105 mm. Sua espessura nominal é de 5 mm. Possui geometria sólida, ou seja, não possui furos, rasgos e nem ranhuras em sua pista de frenagem. Quatro furos devem ser feitos para fixação no cubo. Em seguida nos desenhos 5 e 6, mais detalhes são mostrados.

Figura 5 – Vista Frontal



Fonte: [EQUIPE PIRATAS DO VALE]

Figura 6 – Corte B-B



SEÇÃO B-B

Fonte: [EQUIPE PIRATAS DO VALE]

Os discos testados, porém, tiveram uma dessas dimensões alterada. O projeto prevê espessura nominal de 5 mm, mas os discos testados possuíam uma pequena diferença nesta espessura.

Esta diferença não alterou o resultado no desgaste dos discos, uma vez que a pinça de freio utilizada, a pressão na linha de freio, o tipo das pastilhas e as condições dos ciclos de frenagem não foram alterados.

4 METODOLOGIA

4.1 BANCADA DE ENSAIOS

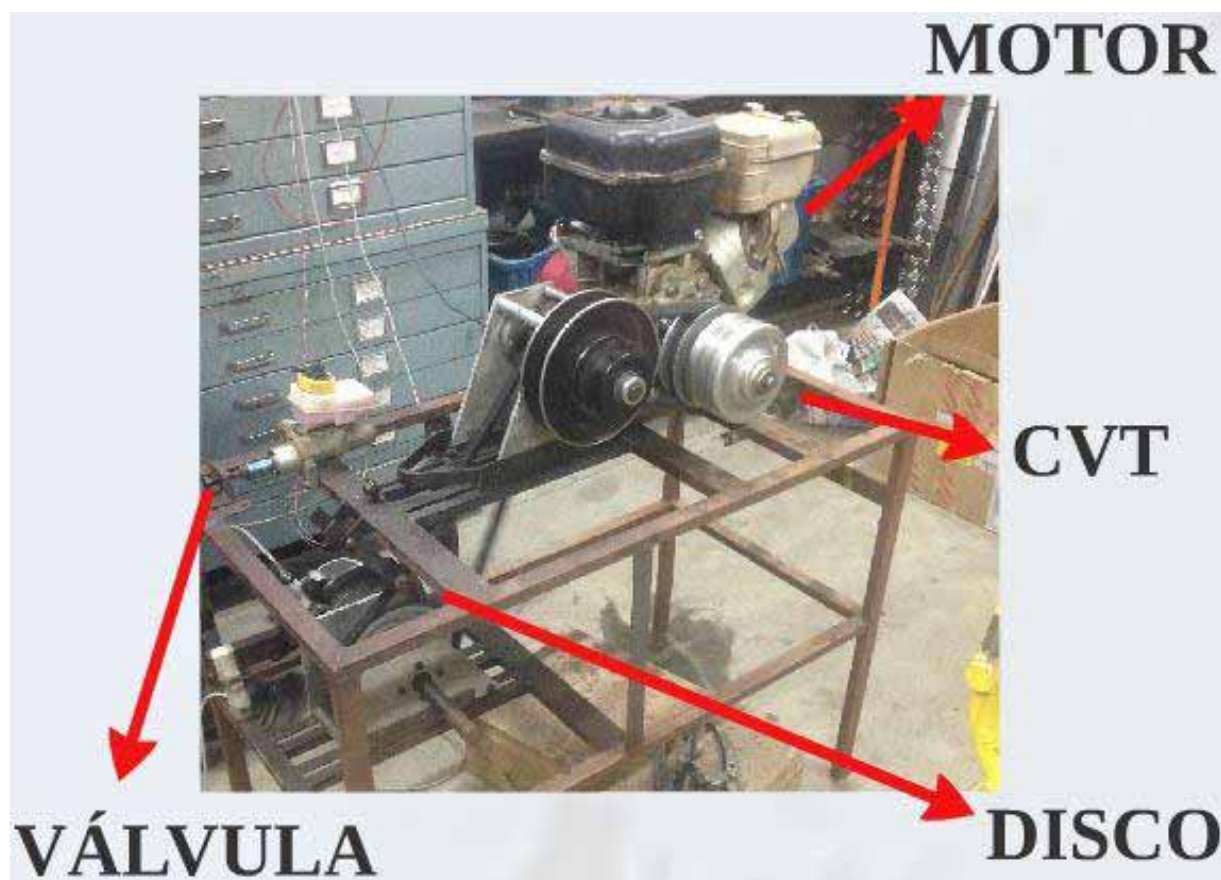
Para realização dos testes de desgaste dos discos de freio, foi utilizada uma bancada construída pela Equipe Piratas do Vale Bardahl. Todos os testes foram feitos na mesma bancada, com os mesmos parâmetros, e seguindo os mesmo ciclos pré-estabelecidos, para aumentar o poder de comparação entre os ensaios.

Esta bancada conta com uma pinça de freio montada com pastilhas de freio semi-metálicas da marca Fischer, modelo FJ 1520 SM. A linha de pressão é controlada por uma válvula servo, podendo-se ajustar a pressão atuante nos êmbolos na pinça conforme seja necessário.

Conta ainda com um motor de combustão interna e um sistema de transmissão (CVT) que geram o torque necessário para manter o eixo girando enquanto o freio está criando uma força de resistência ao movimento.

A figura 7 mostra uma imagem real da bancada utilizada, mostrando a localização de seus componentes:

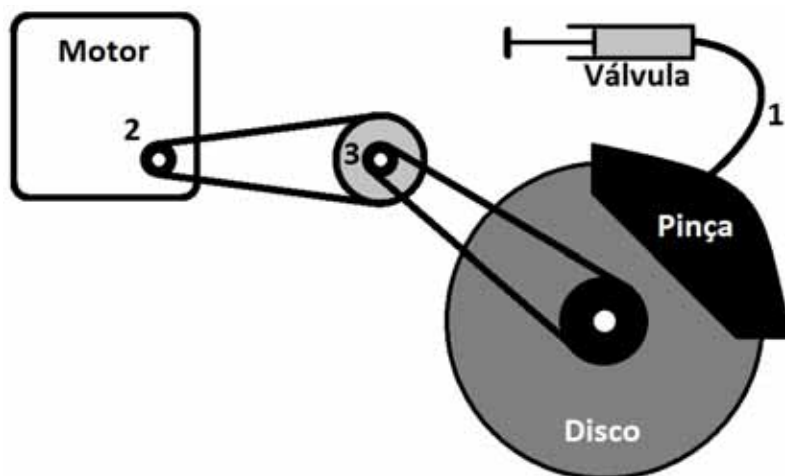
Figura 7 – Bancada



Fonte: [PRÓPRIO AUTOR]

O esquema da figura 8 mostra um modelo simplificado do mecanismo da bancada. No ponto 1 temos um sensor de pressão, onde é possível acompanhar a pressão na linha de freio. Nos pontos 2 e 3 temos contadores de giro para medir a rotação no motor e no eixo intermediário.

Figura 8 – Esquema da Bancada de Ensaios



Fonte: [PRÓPRIO AUTOR]

Os dados coletados pelos sensores são enviados a um *software* de computador, que os mostra em tempo real. Desta maneira foi possível acompanhar a pressão na linha de freio e a rotação do disco de freio, ajustando-os quando necessário.

4.2 MEDIÇÕES ANTES DOS ENSAIOS

Primeiramente os discos foram limpos para retirada de possíveis partículas presentes na superfície dos discos.

Então eles foram pesados em uma balança semi-analítica (modelo Marte UX-4200H) do Departamento de Tecnologia e Materiais da FEG/UNESP. Esta balança possui tara máxima de 4200g, e precisão de 0,01g. Cada disco foi pesado 5 vezes, e seus valores de peso foram registrados.

Posteriormente 5 medidas em cada disco, em pontos aleatórios na região de desgaste, foram feitas com um micrômetro digital e registradas. O micrômetro utilizado em todas as medições é o Mahr Micromar 40 EXL.

4.3 CICLOS DE FRENAGEM

A equipe Piratas do Vale Bardahl pré definiu os ciclos de frenagem de modo a simular as condições em que os discos de freio estariam submetidos em uma competição de Baja SAE.

A pressão da linha de freio utilizada nos ensaios (50 bar) equivale à pressão real exercida pelo piloto do veículo Baja na condução deste, este valor foi obtido por telemetria.

Cada medida foi feita depois de um conjunto de 25 ciclos de frenagem. Cada ciclo de frenagem ocorreu da seguinte maneira:

- Modo de frenagem por 5 segundos (há movimento relativo entre as partes, há desgaste);
- Modo de resfriamento por 30 segundos (sem movimento relativo entre as partes, sem desgaste);

4.4 ENSAIOS

Primeiramente o disco confeccionado de aço inoxidável foi montado no eixo da bancada de testes, juntamente com pastilhas de freio nunca utilizadas. A pressão na linha de freio foi ajustada em 50 bar, travando o disco entre as pastilhas. Ligou-se o motor em sua aceleração mínima. Com o motor nesta aceleração e a linha de freio com esta pressão, o torque transmitido até o eixo do disco de freio não é suficiente para vencer a resistência de frenagem, então o disco fica parado entre as pastilhas de freio (situação sem desgaste do disco).

Então o motor foi colocado em modo de máxima aceleração e cronometraram-se 5 segundos. Com o motor na aceleração máxima e a linha de freio com pressão de 50 bar, o disco de freio consegue vencer a resistência da frenagem, e começa a girar, simulando uma situação de frenagem e desgaste do disco.

Após estes 5 segundos, colocou-se o motor em mínima aceleração, travando o disco entre as pastilhas novamente. Neste momento, o disco ficou parado por 30 segundos para resfriamento e reajuste da pressão da linha de freio, que tende a aumentar com o aumento de temperatura

causado pela transformação de energia cinética em energia térmica, e do aumento de temperatura do fluido de freio.

Então este processo foi repetido da mesma maneira, até que alcançássemos os 25 ciclos pré-estabelecidos pela equipe. Então o motor foi desligado, e um termômetro infra-vermelho Instrutherm TI-810 foi utilizado para medir a temperatura do disco. Quando esta temperatura alcançou o mesmo valor da primeira medição, a espessura da pista de frenagem foi medida 5 vezes novamente.

Este disco foi ensaiado mais 6 vezes, totalizando 7 ensaios e 175 frenagens. Então se desmontou o disco de aço inoxidável 304 e as pastilhas de freio da bancada de ensaios.

Para o segundo conjunto de ensaios, o disco confeccionado de aço 1045 foi montado no eixo da bancada de testes, novamente com pastilhas de freio nunca utilizadas. Neste segundo teste prestou-se atenção para repetir exatamente os mesmos parâmetros utilizados no ensaio do primeiro disco, para uma fidelidade na obtenção dos dados. Ao final de cada ciclo, esperou-se o resfriamento do disco e 5 medições foram feitas e registradas, até que o mesmo número de dados fossem coletados.

4.5 MEDIÇÕES PÓS ENSAIOS

Após os ensaios, ambos os discos foram pesados novamente na balança semi-analítica (modelo Marte UX-4200H).

As espessuras finais foram medidas com o micrômetro digital Mahr Micromar 40 EXL. Novamente, 5 medições em pontos aleatórios na pista de frenagem de cada disco.

4.6 ENSAIO DE DUREZA

O ensaios de dureza foram feitos na Departamento de Materiais e Tecnologiada FEG/UNESP, com o medidor de dureza configurado para a escala Rockwell B. Para esta escala

utilizou-se uma ponta de prova esférica, com 100kgf de carga. Os testes tiveram a supervisão de um técnico da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Ensaio na pista de rolagem e na faixa não gasta foram feitos, registrando-se 5 medidas em cada uma dessas regiões.

4.7 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Para o ensaio de rugosidade, utilizou-se um rugosímetro Mitutoyo, na FEG/UNESP, também com a supervisão de um técnico da faculdade.

A rugosidade da pista de frenagem e da parte não gasta do disco foram testadas em ambos os discos. Valores de rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t) foram obtidos.

5 RESULTADOS

5.1 MEDIDAS DE PESO

Como mencionado anteriormente, as medidas de peso foram na balança Marte UX-4200H, antes e depois dos ensaios de desgaste.

Os dados obtidos estão apresentados na tabela 1:

Tabela 1 – Peso dos Discos

PESO	AÇO 1045		INOX 304	
	Antes	Depois	Antes	Depois
MEDIDA 1 (g)	1082.03	1081.48	1182.81	1178.80
MEDIDA 2 (g)	1082.03	1081.48	1182.80	1178.80
MEDIDA 3 (g)	1082.03	1081.48	1182.81	1178.80
MEDIDA 4 (g)	1082.03	1081.48	1182.81	1178.79
MEDIDA 5 (g)	1082.02	1081.48	1182.81	1178.80
MÉDIA (g)	1082.028	1081.480	1182.808	1178.798
PERDA (g)	0.548		4.010	

5.2 MEDIDAS DE ESPESSURA

Os dados obtidos com o micrômetro digital, para o aço inoxidável 304 e aço 1045, estão apresentados nas tabelas 2 e 3:

Tabela 2 – Espessura e Desgaste do Disco INOX 304

INOX 304									
Medida (mm)	Frenagens	T (°C)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Medida 5 (mm)	Media (mm)	Desgaste (mm)
Inicial	0	29	5.030	5.034	5.034	5.027	5.035	5.0320	-
1	25	29	5.014	5.034	5.008	5.015	5.024	5.0190	0.0130
2	50	30	5.018	5.011	5.012	5.018	5.018	5.0154	0.0036
3	75	29	5.018	5.003	5.006	5.020	5.016	5.0126	0.0028
4	100	29	5.012	5.003	5.009	5.009	5.010	5.0086	0.0040
5	125	28	5.007	5.000	5.007	5.009	5.001	5.0048	0.0038
6	150	28	5.003	4.999	5.004	4.998	5.001	5.0010	0.0038
Final	175	29	4.995	4.996	4.994	4.995	4.995	4.9950	0.0060

Tabela 3 - Espessura e Desgaste do Disco AÇO 1045

AÇO 1045									
Medida (mm)	Frenagens	T (°C)	Medida 1 (mm)	Medida 2 (mm)	Medida 3 (mm)	Medida 4 (mm)	Medida 5 (mm)	Media (mm)	Desgaste (mm)
Inicial	0	29	4.796	4.793	4.794	4.792	4.794	4.7938	-
1	25	29	4.774	4.772	4.772	4.772	4.771	4.7722	0.0216
2	50	29	4.770	4.770	4.768	4.771	4.770	4.7698	0.0024
3	75	29	4.767	4.766	4.765	4.768	4.767	4.7666	0.0032
4	100	28	4.763	4.762	4.763	4.764	4.762	4.7628	0.0038
5	125	29	4.759	4.760	4.761	4.760	4.759	4.7598	0.0030
6	150	28	4.757	4.754	4.759	4.756	4.757	4.7566	0.0032
Final	175	28	4.753	4.754	4.753	4.754	4.755	4.7538	0.0028

Na primeira medida em ambos os ensaios houve um maior desgaste dos discos, por conta do assentamento das pastilhas de freio, fenômeno que pode vir a aumentar o desgaste nos materiais. Então dados fieis podem ser obtidos a partir da segunda medida de cada ensaio.

O desgaste medido na espessura entre o final do segundo ensaio e o último foi de **0,0240 mm** no disco de aço inoxidável 304, e de **0,0184 mm** no disco de aço 1045.

5.3 DUREZA SUPERFICIAL

As medidas de dureza superficial e a média medidas podem ser observadas na tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Dureza Rockwell B

INOX 304			AÇO 1045	
Dureza	Pista	Não Gasta	Pista	Não Gasta
1	94	95	99	100
2	89	94	98	100
3	90	96	94	100
4	89	96	97	98
5	93	94	100	98
Média	91	95	97.6	99.2

5.4 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

As 5 medidas de rugosidade e a média podem ser observadas na Tabela 5:

Tabela 5 – Rugosidade na Superfície do Disco

Rugosidade	INOX 304				AÇO 1045			
	Pista		Não Gasta		Pista		Não Gasta	
	Ra (μm)	Rt (μm)	Ra (μm)	Rt (μm)	Ra (μm)	Rt (μm)	Ra (μm)	Rt (μm)
1	3.23	17.40	2.46	16.80	1.13	7.30	2.33	15.40
2	3.54	20.50	2.62	16.60	1.09	7.70	3.41	25.00
3	3.74	21.00	2.31	13.10	1.51	16.00	2.60	15.90
4	2.95	19.60	2.50	16.50	1.69	12.30	2.30	17.70
5	2.74	19.20	2.47	16.90	1.40	11.20	2.54	17.10
Média	3.24	19.54	2.47	15.98	1.36	10.90	2.64	18.22

5.5 ASPECTOS OBSERVADOS

Durante os ensaios do disco de aço inoxidável 304 foi observado que logo após a última (vigésima quinta) frenagem, a temperatura do disco de freio ficava na faixa de 170-180°C. Enquanto que no disco de aço 1045, observaram-se temperaturas entre 200 e 220°C.

As pastilhas de freio após os ensaios no disco de aço inox ficaram bastante degradadas quando comparadas as dos ensaios com o aço 1045. Pode-se observar abaixo estas pastilhas:

Figura 9 – Estado Final das Pastilhas de Freio



Fonte: [PRÓPRIO AUTOR]

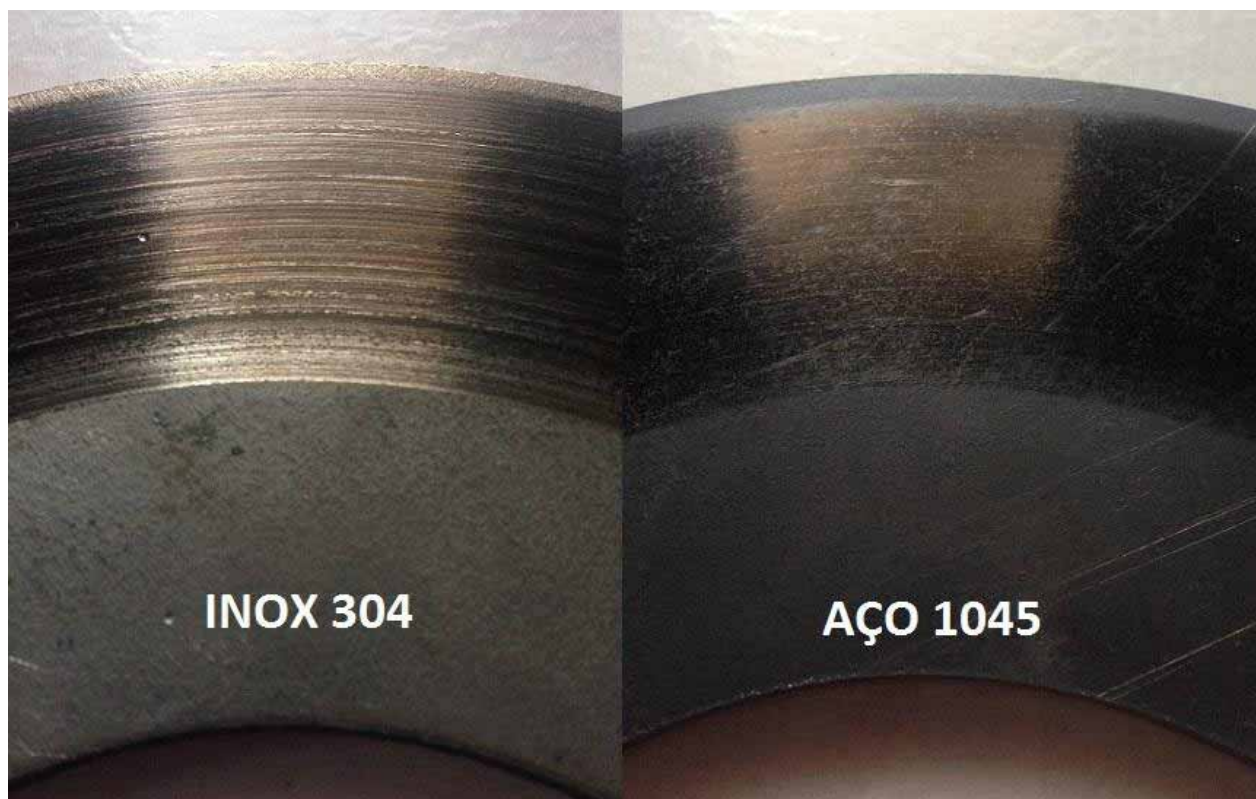
Quando observamos a condição final das pastilhas de freio, notamos que na pastilha utilizada no ensaio com o disco de aço inoxidável 304, sulcos foram gerados, inclusive com a presença do aço inoxidável nestes sulcos.

A região da pista de frenagem no disco de aço inoxidável 304 ficou claramente marcada nas regiões onde material foi arrancado. No ensaio de rugosidade isso se confirma, já que houve um aumento da rugosidade.

Já nesta região do disco de aço 1045, notamos que houve uma espécie de polimento. No ensaio de rugosidade neste disco houve uma diminuição no valor medido.

A seguir pode-se observar a condição final da superfície dos discos:

Figura 10 – Superfície dos Discos de Freio



Fonte: [PRÓPRIO AUTOR]

Um aspecto também importante na escolha do conjunto pastilha/disco de freio é o ruído gerado na frenagem. Durante os ensaios nenhum ruído anormal ou significativo foi observado.

6 DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos, nota-se que o desgaste no disco confeccionado de aço 1045 (**0,0184mm**) foi menor que o medido no disco de aço inox 304 (**0,0240mm**). Esta diferença pode ser mais bem evidenciada na diferença de peso medida dos discos, **0,548g** para o aço 1045 e **4,010 g** para o aço inoxidável 304.

Este valor mais acentuado no disco de aço inoxidável 304 evidencia o arrancamento de material da superfície do disco, que pôde ser observado também a olho nu, e no ensaio de rugosidade feito na pista de frenagem deste disco.

Ressaltando-se que estes dados são para o conjunto montado com pastilhas de freio semi-metálicas, então quando se utiliza outro tipo de pastilha, esta vantagem de um material sobre o outro pode se alterar.

Quando se analisa a condição final das pastilhas e dos discos de freio, novamente o disco de aço 1045 leva vantagem, já que as pastilhas usadas no ensaio do disco de aço inoxidável 304 ficaram claramente mais degradadas. Os sulcos formados, e o metal aderido à pastilha de freio mostram que o disco de freio de inox 304 tem material arrancado da superfície quando ocorre o contato entre as partes, intensificando o desgaste deste material.

O fator econômico também deve ser levado em conta na comparação destes dois discos. O disco de aço inoxidável 304 tem preço aproximadamente 50% maior que o de aço 1045.

Então com estes dados coletados e as observações feitas, podemos confirmar que o disco de aço 1045 leva vantagem sobre o aço inoxidável 304 nestas condições de uso.

REFERÊNCIAS

ASM Handbook: Friction, Lubrification and Wear Technology. Vol.18. ASM International - The Materials Information Society. 1992.

ASM Speciality Handbook: Stainless Steels. 1.ed. ASM International – The Materials Information Society. 1994.

AZOM, **AISI 1045 Medium Carbon Steel** . Disponível em: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6130>>. Acesso em: 01 de Novembro de 2014.

BOSCH. Disponível em: <www.bosch.com.br>. Acessado em 12 de Dezembro de 2014.

DIULGHEROGLO, P. A. **Fundamentos de Freios e seus componentes.** Apostila do curso SAE. São Paulo, 2008.

ERIKSSON, M. **Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Related to Squeal.** Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, 2000.

ERIKSSON, M.; BERGMAN, F.; JACOBSON, S. **On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes.** Wear, Uppsala, n.252, p.26-36, 2002.

HOW STUFF WORKS. Disponível em: <www.howstuffworks.com>. Acessado em 06 de Dezembro de 2014.

INTERLLOY, **1045 Medium Tensile Carbon Steel Bar.** Disponível em: <<http://www.interlloy.com.au/our-products/carbon-steels/1045-medium-tensile-carbon-steel-bar/>>. Acesso em: 01 de Novembro de 2014.

JOHANN, F.H. **“Metodologia para cálculo de temperatura na interface pastilha / disco de freio”.** 2012. 16 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

KALTENBACH, PAULA RAIA. **Projeto Chronos – Desenvolvimento e aplicação de um sistema de freios automotivo.** 2013. 81 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia

Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2013.

LAMB, R.G. **"Estudo do comportamento de desgaste de materiais de atrito em função de variáveis de aplicação"**. Dissertação (Mestrado em Materiais). Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, Brasil. 2008.

MACNAUGHTON, M. **Cast Iron and Brake Discs – a Brief History of their development and metallurgy**. Foundryman, p.321-324, October, 1998.

MALUF, O. ANGELONI, M. SANTOS, J.C. COLÓCIO, M.A. SPINELLI, D. BOSE, W. **"Desenvolvimento Histórico e tecnológico dos Discos de Freio Automotivos"**. SAE Technical Paper 7TH International brake Colloquium Caxias do Sul, Brasil. 2005.

NAKATA. **Manual para Sitemas de Freios**. Catálogo.

REVISTA POPULAR SCIENCE. Nova Iorque: Popular Science Publishing Co., Outubro de 1964 - . Mensal.

ROLT, L.T.C. **"Great Engineers"**, 1962, G. Bell and Sons, ISBN.

SAE BRASIL. Página virtual da Sociedade de Engenheiros Automotivos BRASIL. Disponível em: <http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/baja.aspx>. Acesso em 06 de Dezembro de 2014.

THE FAMILY CAR. Site especializado em automóveis. Disponível em: <www.thefamilycar.com>. Acesso em 06 de Dezembro de 2014.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de física**, volume 1 : mecânica. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

PETER, J.B. **Friction Science and Technology: From Concepts to Applications**, 2.ed. CRC Press, 2008.