



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO CIENCIAS TECNOLOGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAYANNE DE JESUS PEREIRA BRAGA

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 304
UTILIZADO EM DISCO DE FREIO PERFURADO**

SÃO LUÍS/MA

2019

RAYANNE DE JESUS PEREIRA BRAGA

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 304
UTILIZADO EM DISCO DE FREIO PERFURADO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como partes dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha.

SÃO LUÍS/MA

2019

Braga, Rayanne de Jesus Pereira.

Análise microestrutural do aço inoxidável austenítico 304 utilizado em disco de freio perfurado / Rayanne de Jesus Pereira Braga. – São Luís, 2019.

73 folhas

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha.

Elaborado por Giselle Frazão Tavares- CRB 13/665

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO 304
UTILIZADO EM DISCO DE FREIO PERFURADO

Autor: Rayanne de Jesus Pereira Braga

Orientador: Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha

A banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta monografia:

Prof. Dr. Adilto Pereira Andrade Cunha
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Prof. Me. José de Ribamar Ferreira Barros Júnior
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís – MA, 06 de dezembro de 2019



Pagina de costa (PAR)

Dedicatória

*Dedico esse trabalho a minha mãe,
por todos esses anos dedicada a
mim e meus irmãos. Sem você,
nenhuma conquista seria possível.*

Pagina de costa (PAR)



Agradecimentos

Agradeço a Deus por minha vida e conquistas, agradeço por tudo a mim dado e ensinado.

Agradeço ao meu Orientador Adilto Cunha, por todo suporte nessa pesquisa e a Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

Agradeço a minha mãe. A imensidão do quanto sou grata a essa pessoa maravilhosa não pode ser medida. Minha mãe batalhou por mim e meus irmãos todos esses anos e continua, sempre disposta a nos proporcionar as melhores oportunidades e chances de vencer na vida. Sem você, nada nunca seria possível. Eu amo você imensamente, muito obrigada.

Agradeço aos meus irmãos, Rakel, Ribamar, Rillys e Renato, por todo companheirismo. Nossa união vai além do infinito. Obrigada pelo estímulo de sempre.

Agradeço a minha avó, tios e tias que fizeram parte da minha criação e educação, sendo sempre suporte para a batalha da minha mãe.

Agradeço a Paulo Freire por todo apoio. Você acreditou que era possível quando eu mesma não tinha essa certeza.

Meus agradecimentos a professores como Simone Cristina, Denner, Adilto Cunha e Maria Amália, por todo apoio nesses cinco anos de graduação. Agradeço aos meus companheiros e amigos de classe, e todos aqueles que me auxiliaram no desenvolvimento desse trabalho em especial. Também á equipe Bumba-Meu-Baja, que por quatro anos foi fonte de desenvolvimento profissional e pessoal, onde pude aplicar conhecimentos, fonte de aprendizado.

Por fim, gostaria de agradecer ao meu pai. Meu pai que partiu cedo, mas que até hoje é fonte de respeito e admiração. Sem sua ajuda, mesmo que indireta, talvez essa conquista não fosse possível. Sua falta será sentida sempre, e dedico a você, que sonhava com uma filha engenheira, essa vitória.



Pagina de costa (PAR)

Resumo

O sistema de freios tem como principal função converter a energia cinética e potencial em energia térmica a ser dissipada pelo sistema. A energia térmica é resultante do atrito entre o disco de freio e as pastilhas, e o disco de freio, além de oferecer a superfície para a realização do atrito, é o responsável pela dissipação da energia térmica. A força de frenagem resulta em fadiga térmica, e esse fator deve ser levado em conta para a escolha do disco aplicado. O disco de freio deve ter resistência mecânica, tenacidade, resistência ao calor e a fadiga. Essas propriedades são conseguidas principalmente no momento da escolha do material utilizado. O aço inoxidável Austenítico 304, que contém em sua composição principalmente o cromo e o níquel, oferece propriedades compatíveis, apesar de não ser comumente utilizado em discos de freio. Para comprovar a viabilidade da utilização desse material, foi analisada a microestrutura desse material após dois anos de aplicação, em condições de operação previamente definidas, comparando com uma amostra do material como recebido pelo fornecedor. Também foi feita a análise de dureza Rockwell e análise térmica, as duas de forma a caracterizar a reação do disco de freio à ação de frenagem. Após os estudos, a distribuição de temperatura ao longo da superfície do disco pode ser observada, assim como um acréscimo de dureza. Porém, a análise microestrutural indica que não há indícios de deformações e alterações de propriedades suficientes para inviabilizar a aplicação desse material no sistema de freios analisado.

Palavras-chave: Disco de freio; Aço inoxidável; Energia térmica; Dureza; Metalografia.



Pagina de costa (PAR)

Abstract

The main function of the brake system is to convert kinetic energy and potential in thermal energy, which is dissipated by the system. Thermal energy is reduced in the friction between the brake disc and the pads, and the brake disc provides a surface for friction, and is responsible for dissipating thermal energy. Braking force results in thermal fatigue, and this factor must be taken into account when choosing the applied disc. The brake disc must have mechanical strength, toughness, heat resistance and fatigue. These properties are mainly achieved when choosing the material used. Austenitic 304 stainless steel, which contains mainly chromium and nickel in its composition, offers the advantages included, although it is not commonly used in brake discs. To prove the feasibility of using this material, the microstructure of this material was analyzed after two years of application, under authorized operating conditions, compared with a sample of the material received by the supplier. Rockwell hardness analysis and thermal analysis were also performed as two ways to characterize the reaction of the brake disc to a braking action. After studies, a temperature distribution across the disc surface can be observed as an increase in duration. However, a microstructural analysis indicates that there are no indications of deformations and changes in characteristics used to make an application of this material impossible in the brake system analyzed.

Key-words: Brake Disc; AISI 304; Thermal energy; Toughness; Metallography



Pagina de costa (PAR)

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema de freios hidráulico (Adaptado de Lobo, 2018).....	5
Figura 2.2 - Sistema de freios pneumático (Adaptado Evaristo, 2016).....	6
Figura 2.3 - Freios a tambor (Adaptado de Salão do Carro, 2012).....	7
Figura 2.4 - Componentes do sistema de freio a tambor (Adaptado de Costa, 2001).....	8
Figura 2.5 - Sistema de freio a tambor Simplex (Adaptado de Nakata, 2013).....	9
Figura 2.6 - Sistema de freios a tambor duo-servo (Adaptado de Nakata 2013).....	9
Figura 2.7 - Esforços de frenagem (Adaptado de Diulgheroglo, 2009).....	11
Figura 2.8 - Esquema do sistema de freios a disco (Adaptada de Alvorada, 2017).....	12
Figura 2.9 - Disco de freio sólido (Adaptado de quatro rodas, 2014).....	13
Figura 2.10 - Disco de freio ventilado (Adaptado de Quatro Rodas, 2014).....	13
Figura 2.11 - Disco de freio perfurado (Adaptado de Quatro Rodas, 2014).....	14
Figura 2.12 - Cilindro Mestre (Adaptado de Quatro Rodas, 2015).....	15
Figura 2.13 - Cilindro Mestre Dupla Ação (Adaptado de Freios Breque, 2016).....	16
Figura 2.14 - Pedal de freio (Adaptado de Pietro, 2014).....	17
Figura 2.15 - Pinça de freio (Adaptado de Quatro Rodas, 2015).....	18
Figura 2.16 - Pinça de freio fixa (a) e flutuante (b). (Adaptado de BAUER, 2015).....	19
Figura 2.17 - Microestrutura aço inoxidável 410 no estado temperado e revenido (Adaptado de Lippold et al, 2015).....	21
Figura 2.18 - Microestrutura Aço Inoxidável Ferrítico (Adaptado de Lippold et al, 2014).....	22
Figura 2.19 - Aços Inoxidáveis da série 400 (Adaptado de Carbó, 2010).....	24
Figura 2.20 - Microestrutura característica do Aço Inoxidável Austenítico (Adaptado de Barbosa et al, 2018).....	25
Figura 2.21 - Aços inoxidáveis Austeníticos da série 300 (Adaptado de Carbó, 2010).....	26
Figura 2.22 - Microestrutura do AISI 304 (Adaptado de Markovicova, 2019).....	27
Figura 2.23 - Microestrutura típica de aço inoxidável duplex, (a) Seção transversal e (b) seção longitudinal. (Adaptado de Informet, 2018).....	28
Figura 3.1 - Fluxograma de execução (Autor, 2019).....	29
Figura 3.2 – Veículo baja (Autor, 2018).....	32
Figura 3.3 – Disco de freio (Autor, 2018).....	33
Figura 3.4 – Dimensões do disco de freio (Autor, 2018).....	33
Figura 3.5 – Durômetro Rockwell RBS-M da marca Pantec (Autor, 2019).....	37
Figura 3.6 – Amostras para o ensaio de dureza Rockwell. (a) Representa a amostra nova e (b) representada o disco após a utilização. (Autor, 2019).....	38
Figura 3.7 – Durômetro Rockwell RBS-M da marca Pantec (Autor, 2019).....	39
Figura 3.8 – Embutidora Metalográfica EM30D, Teclago (Autor, 2019).....	40
Figura 3.9 – Amostras embutidas (Autor, 2019).....	40
Figura 3.10 – Lixadeira Metalográfica Manuel (Autor, 2019).....	41
Figura 3.11 – Limpeza Ultrassônica (Autor, 2019).....	42
Figura 4.1 – Simulação Térmica do disco de freio (Autor, 2019).....	43
Figura 4.2 – Dilatação Térmica (Autor, 2019).....	44



Pagina de costa (PAR)

Figura 4.3 – Carta de Controle (Autor, 2019).....	45
Figura 4.4 – Resultado do ensaio de dureza Rockwell (Autor, 2019).....	46
Figura 4.5 – Microestrutura do disco novo. (a) Ampliação em 500x e (b) ampliação em 1000x (Autor, 2019)	47
Figura 4.6 – Microestrutura do disco usado. (a) Ampliação em 500x e (b) ampliação em 1000x (Autor, 2019).....	47



Página de costa (PAR)

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição Química e propriedades mecânicas do AISI 304 (Adaptado de Operam, 2019)	27
Tabela 3.1 – Dados de entrada (Autor, 2019)	30
Tabela 3.2 – Propriedades do AISI 304 (Adaptado de RolMetais, 2017).....	35
Tabela 3.3 – Dados de entrada para simulação (Adaptado de Autor, 2019)	36
Tabela 4.1 – Temperaturas medidas (Adaptado de Autor, 2019).....	45



Pagina de costa (PAR)

LISTA DE SIMBOLOS

A Área

A_{pin} Área das pinças

A_{cm} Área do cilindro mestre

C Relação do pedal

F Força

F_2 Força na entrada do servo-freio;

F_1 Força aplicada no pedal de freio;

F_{pil} Força de acionamento do Piloto

F_{at} Força de atrito

F_{fech} Força de fechamento

F_{cm} Força no cilindro mestre

F_{pin} Força nas pinças

F_{pd} Força transmitida pelo pedal

M Torque de frenagem

P Pressão

P_{pin} Pressão nas pinças

P_{cm} Pressão no cilindro mestre

μ Coeficiente de atrito entre a pastilha e o disco

R_e Raio efetivo de frenagem

X Distância entre o centro do pedal e a linha de centro do eixo do pedal;

Y Distância entre a posição da haste de acionamento e a linha de centro do eixo do pedal.



Pagina de costa (PAR)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos Gerais	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1	Sistema de Freios	3
2.1.1	Sistema de freio – Acionador Hidráulico	4
2.1.2	Sistema de freio - Acionador Pneumático	5
2.1.3	Sistema de freios a tambor	7
2.1.4	Sistema de freios a disco	10
2.2	Aços Inoxidáveis	20
2.2.1	Aço inoxidável Martensítico	20
2.2.2	Aço Inoxidável ferrítico	22
2.2.3	Aço inoxidável Austenítico	24
2.2.4	Aço inoxidável duplex.....	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Força de frenagem.....	30
3.2	Escolha do disco de freio e calculo do raio efetivo	32
3.3	Escolha do material	34
3.4	Simulação térmica.....	35
3.5	Ensaio de dureza Rockwell	36
3.6	Ensaio Metalográfico	38
5.6.1	Seleção das Amostras.....	38
5.6.2	Embutimento	39
5.6.3	Lixamento.....	40
5.6.4	Polimento	41
5.6.4	Limpeza ultrassônica.....	41
5.6.5	Ataque químico	42

Pagina de costa (PAR)



4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1	Simulação Térmica.....	43
4.2	Ensaio de dureza.....	46
4.3	Ensaio de metalográfico	47
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

O sistema de freio é responsável pela transformação de energia cinética em energia térmica através do atrito entre as pastilhas de freio e o disco, forçando a parada do veículo. O disco de freio é o componente que proporciona a superfície necessária para a realização da força de atrito. Deve ser capaz de resistir às altas tensões térmicas envolvidas durante repetitivos ciclos térmicos no decorrer do uso e também a energia térmica gerada pelo sistema deve ser dissipada o mais rápido possível.

Os fatores que mais influenciam na performance do disco de freio é o material aplicado, com a maior resistência ao calor possível, e geometria, que deve favorecer a circulação do ar na superfície para aumentar a dissipação de calor por convecção. Neste trabalho, o foco do estudo é analisar a microestrutura do material específico, AISI 304, antes e após a aplicação, comprovando a viabilidade da utilização desse material em discos de freio.

Silva e Mei (2010) assegura que os aços inoxidáveis austeníticos são os mais comuns entre os aços inoxidáveis e são caracterizados por resistência à corrosão muito boa, elevada tenacidade e boa soldabilidade. A estrutura austenítica se torna especialmente interessantes tanto para aplicações criogênicas (por não sofrerem transição dúctil-frágil) como para aplicações à temperatura elevada, em função da resistência ao amolecimento e resistência à deformação a quente.

Segundo Marinho (2016), a qualidade de um material metálico pode ser medida de forma dimensional ou estrutural. A primeira controla suas dimensões físicas e é conhecido por metrologia. A segunda forma está relacionada às características como composição química, propriedades físico-mecânicas, estrutura interna (microestrutura) entre outros. Assim o ensaio metalográfico é uma ferramenta importante para se obter informações internas dos aços, e com isso permitir relacionar a estrutura e propriedades físicas de um determinado material, além de seu processo de fabricação e desempenho em aplicação.

Sendo o disco de freio é o componente do sistema de freio responsável pela dissipação de energia cinética em energia térmica oferecendo a superfície para realização do atrito. As propriedades do material aplicado definem a funcionalidade do sistema, assim como a viabilidade da aplicação de um determinado material. Dessa forma faz-se necessário o estudo da microestrutura do material antes e após a utilização, analisando possíveis alterações nas propriedades mecânicas já que o disco de freio é submetido a altas temperaturas e força de

frenagem. O ensaio metalográfico é uma ferramenta importante para se obter informações internas dos aços, e com isso permitir relacionar a estrutura e propriedades físicas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a microestrutura em amostras de aço inoxidável austenítico 304 antes e depois da aplicação em disco de freio, mapeando o desempenho de disco durante a ação de frenagem e diferenças na estrutura metalográfica, de forma a comprovar a viabilidade da utilização desse material no sistema de freios.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar o modelo de disco a ser analisado;
- Calcular a força de frenagem e raio efetivo do disco para determinar esforços na ação de frenagem;
- Analisar distribuição de temperatura do disco para caracterização de fadiga térmica;
- Realizar análises metalográficas em duas amostras do material e comparar os resultados do ensaio;
- Comprovar por meio desse estudo que o material aplicado e o modelo do disco de freio respondem de forma satisfatória.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistema de Freios

Segundo Limpert (1999) o sistema de freio tem três funções básicas, desacelerar o veículo ou levar a imobilidade, manter uma velocidade durante uma descida e manter veículo parado em uma determinada inclinação mesmo sem a presença do motorista. Isso através da conversão de energia cinética e potencial em energia térmica. Este sistema pode ser a disco ou a tambor. No freio a disco, essa conversão ocorre através do atrito das pastilhas com o disco de freio.

Nakata (2013) afirma que os primeiros freios automotivos eram simples adaptações de freios usados nas carruagens na virada do século, onde uma alavanca e uma sapata externa atuavam diretamente no pneu. Posteriormente surgiram os freios de cinta de aço externa envolvendo o cubo de roda ou tambor. Na década de 1920, com os automóveis ganhando mais potência e velocidade, os freios passaram a ter acionamento hidráulico.

Os principais mecanismos de freios largamente utilizados na indústria automotiva são freios a disco e a tambor. Em carros de passeio e motocicletas de baixa cilindrada é comum observarmos a combinação destes dois tipos de freios. Habitualmente, o freio a disco é utilizado no eixo dianteiro e o freio a tambor no eixo traseiro. (CARVALHO, 2014)

A operação de frenagem deve ser sempre segura e se adequar para as diferentes situações. O freio deverá funcionar independentemente das condições de pista, por exemplo, se está na areia, no concreto, ou se o pavimento está molhado, seco ou se o veículo está vazio, com carga, motorista iniciante ou experiente. (MESSIAS, 2015)

O atrito, ou resistência ao movimento entre dois corpos é o princípio de funcionamento de qualquer tipo de sistema de freios. É o atrito que diminui a velocidade da roda até imobilizar o veículo. O atrito, porém, provoca calor, e a capacidade de dissipar a energia térmica gerada durante a ação de frenagem é que vai definir qual o tipo de freio a ser utilizado.

O sistema de freio a disco é o mais utilizado atualmente. Tendo como principais componentes a pinça de freio e o disco, é aplicado amplamente, e em veículos de alta performance responde de maneira mais imediata, já que possui um conjunto aberto,

possibilitando a fácil dissipação de energia térmica e recuperação da superfície de frenagem quando aliviada a pressão no sistema, além da facilidade de manutenção.

Pela sua característica construtiva, os discos conseguem dissipar rapidamente o calor porque grande parte de sua área está em contato com o ar exterior. Dissipar calor rapidamente ajuda a recuperar a capacidade de frenagem após o uso contínuo. Veículos de maior desempenho utilizam discos ventilados, que melhoram ainda mais essa característica. Em situações onde há contato com água, os discos também são mais eficientes na recuperação da frenagem, permitindo a secagem das pastilhas mais rapidamente. (NAKATA, 2013).

2.1.1. Sistema de freio – Acionador Hidráulico

O sistema de freios com acionamento hidráulico pode ser explicado de acordo com o princípio de funcionamento de Pascal. O acréscimo de pressão produzido em um líquido em equilíbrio transmite-se integralmente a todos os pontos do líquido. (PASCAL, 1623). Dessa forma, em um sistema de freios hidráulicos existem estruturas tubulares que contém um fluido específico em seu interior, responsável pela transmissão da pressão. Haverá um impulsionador, responsável por gerar a pressão.

Carvalho (2014), afirma que o sistema hidráulico (figura 2.1), é o mais difundido entre os carros de passeio. Neste sistema a força exercida pelo operador é transmitida até os freios através de um circuito hidráulico. Ao pressionar o pedal, este, por intermédio de uma haste com extremidade semiesférica, empurra o êmbolo localizado dentro do cilindro mestre, pressurizando as linhas de freio, que acionará os cilindros de roda.

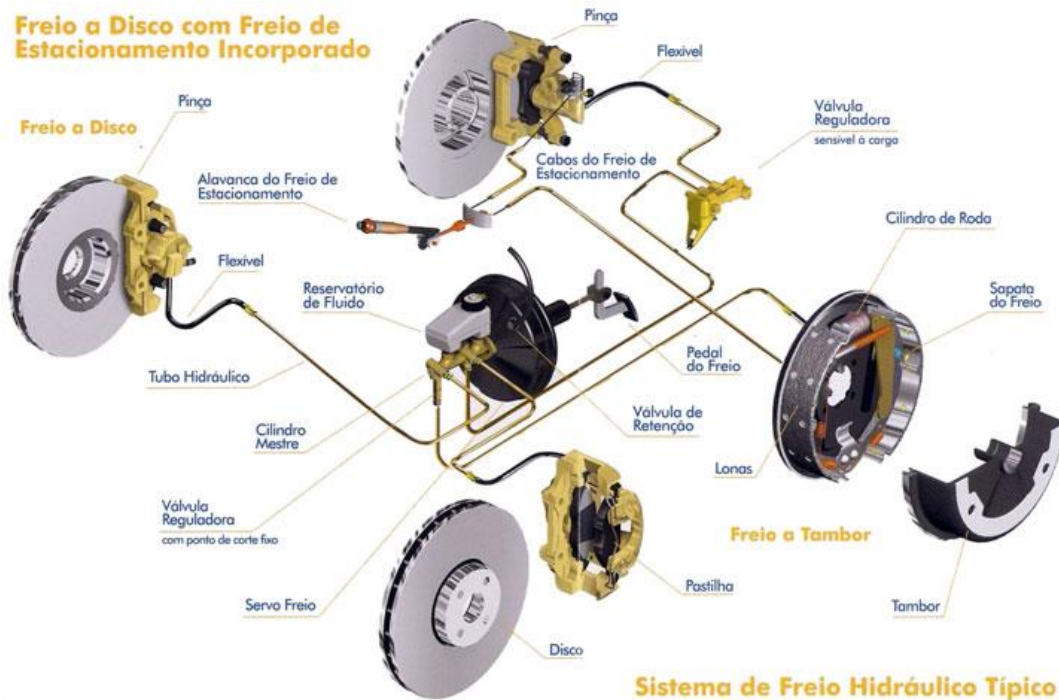


Figura 2.1 - Sistema de freios hidráulico (Adaptado de Lobo, 2018)

O fluido hidráulico deve ser incompressível e possuir alto ponto de ebulição. A incompressibilidade irá garantir que a energia gerada pelo impulsionador não seja perdida em direção ao cilindro de roda. Por outro lado, um fluido com baixo ponto de ebulição irá se transformar em vapor durante as altas temperaturas alcançadas durante frenagens mais fortes, o que pode causar perda de eficiência de frenagem e graves acidentes. (RAMOS, 2015)

A quantidade de pressão hidráulica no sistema é determinada pela quantidade de força aplicada sobre a pressão, já que são variáveis diretamente proporcionais. O diâmetro do cilindro também influencia, sendo esta variável inversamente proporcional a pressão desenvolvida.

2.1.2 Sistema de freio - Acionador Pneumático

Este sistema é utilizado apenas nos veículos pesados e extrapesados. O freio pneumático é um conjunto de peças que se articulam entre si, para movimentar as sapatas de freio. Nesses veículos, pesados e extrapesados, esse tipo de freio é usado para os freios de serviço e de estacionamento ou emergência. O freio pneumático (figura 2.2), é acionado por ar comprimido

e controlado através de válvulas, comandadas pelo pedal de freio. Portanto, o único esforço físico do motorista para frear, e o correspondente a força necessária para acionar a válvula que permite a passagem do ar comprimido para as câmaras de frenagem que, desse modo, acionam as sapatas. (EEP, 2002)

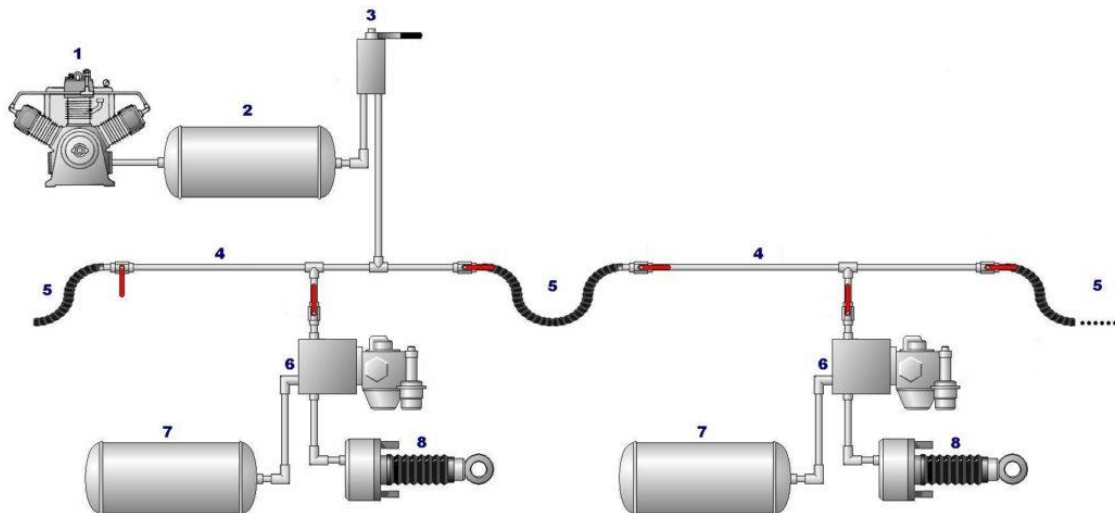


Figura 2.2 - Sistema de freios pneumático (Adaptado Evaristo, 2016)

Para acionadores pneumáticos, o sistema deve conter o compressor de ar (1), o reservatório principal (2), Válvula alimentadora (3), encanamento central (4), mangueiras conectoras (5), válvula tríplice (6), reservatório auxiliar (7) e cilindro de freio (8).

Segundo Carvalho (2014), o acionador pneumático é alimentado por um compressor de ar. Esse sistema é composto por compressor, válvula reguladora de pressão, elemento secador, válvula de proteção, reservatórios de ar e reservatório de regeneração. A distribuição do ar comprimido é feita separadamente: uma via é destinada para os freios traseiros, outra para os freios dianteiros, a terceira para acessórios e a quarta saída de estacionamento, que incluem freio motor e buzina. Isso impede que o sistema fique completamente sem assistência quando uma das vias apresenta avarias. Se vazar ar de uma das saídas, as outras serão bloqueadas evitando perda de pressão em todo o circuito de freio.

Os acionadores pneumáticos são utilizados em veículos pesados, como caminhões e ônibus. Segundo Punh (1987), a principal característica deste projeto é a segurança, uma vez que pequenos vazamentos na linha não causam falha no sistema, já que o mesmo é alimentado constantemente com ar oriundo do compressor. A desvantagem está no fato de ser um sistema mais complexo e pesado quando comparado ao acionamento hidráulico.

2.1.3 Sistema de freios a tambor

O sistema de freios a tambor foi desenvolvido pelo francês Louis Renault em 1902. A evolução do sistema de freios sempre buscou acompanhar o desenvolvimento de veículos e máquinas nas quais é aplicado, já que novas condições de operação exigem um sistema de freios cada vez mais eficiente. Esse foi o cenário em que Renault encontrou ao desenvolver um novo sistema.

Os tambores alojam em seu interior as sapatas que contém o material de atrito. As lonas fixadas às sapatas são empurradas pelo embolo do cilindro de roda contra o tambor. Quando a pressão no pedal é aliviada, as sapatas retornam à posição original com o auxílio das molas de retorno. De acordo com sua posição, as sapatas podem ser primárias ou secundárias. (NAKATA, 2013).

Normalmente, o sistema de freios a tambor (figura 2.3), é encontrado nas rodas traseiras de veículos leves e utilizado como freio de acionamento mecânico. Sistemas a tambor, por serem fechados, não possuem a mesma capacidade de dissipação de energia térmica, oferecida pelos sistemas de freios a disco.



Figura 2.3 - Freios a tambor (Adaptado de Salão do Carro, 2012)

O sistema de um freio a tambor (figura 2.4), é constituído de duas sapatas, um cilindro de freio, tambor, espelho, molas, um regulador e o sistema de freio de emergência, ou seja, o freio de mão. Todas essas peças trabalham de maneira conjunta, portanto, a falha de qualquer um deles compromete todo o sistema.

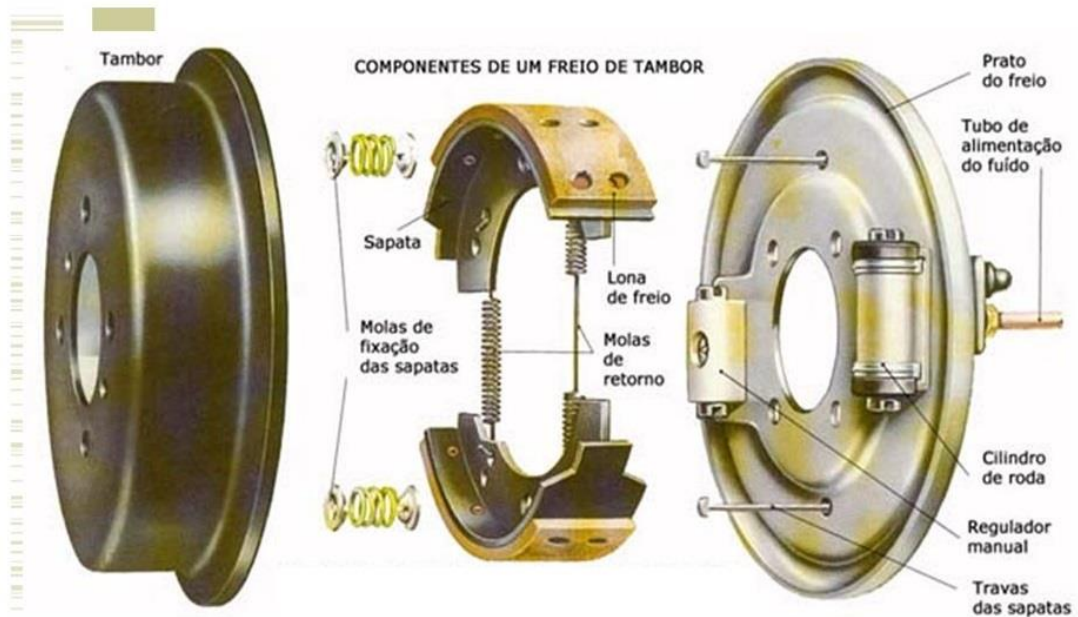


Figura 2.4 - Componentes do sistema de freio a tambor (Adaptado de Costa, 2001)

Segundo Dias (2016), o espelho, tem a função de alinhar o conjunto. As sapatas e o cilindro estão fixos ao espelho. As sapatas alojam as lonas de freio. As lonas de amianto têm estabilidade de atrito durante sua vida útil. O cilindro de Freio tem a função de acionar as sapatas via pressão hidráulica do fluido de freio. Molas são responsáveis por retornar as sapatas a sua posição inicial depois de concluída a força no pedal de freio. E o tambor, sua função principal é formar a superfície de atrito com qual a lona de freio irá ser comprimida. Ele também serve como tampa para o sistema, evitando a entrada de poeira ou qualquer outro detrito.

O sistema de freios a tambor também pode ser Simplex ou Duo-servo. No tipo simplex (figura 2.5), as sapatas de freio agem independentes uma da outra. As extremidades de ancoragem são livres para se movimentarem, deslizando durante a ação de frenagem. Por essa razão, são chamadas de flutuante. É utilizada em veículos leves por possuir menor torque por

força exercida pelo pedal A sapata primária também tende a desgastar mais em relação a sapata secundária.

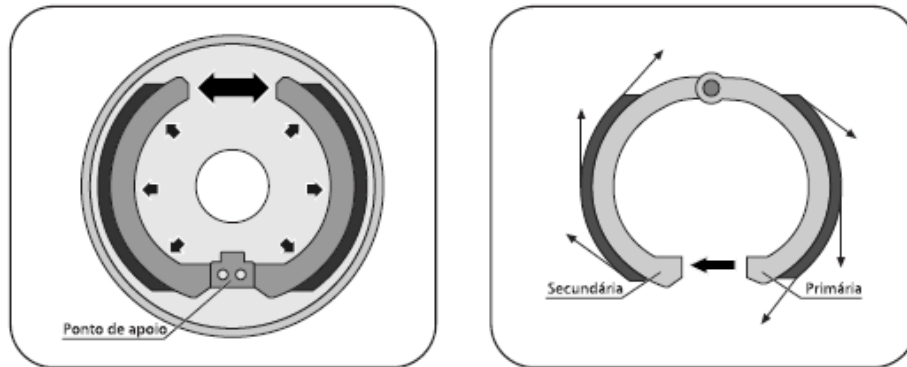


Figura 2.5 - Sistema de freio a tambor Simplex (Adaptado de Nakata, 2013)

No sistema Duo-servo (figura 2.6), possui cilindro com dois êmbolos, ou seja, dois sentidos de aplicação atuando sobre as sapatas primarias e secundarias. A ação de frenagem duo-servo atua tanto para movimentos para frente quanto para ré. Esse freio é conhecido pela servo-ação da sapata primária sobre a secundaria e vice-versa. A pressão exercida contra o tambor por uma das sapatas e aumentada substancialmente pelo servo-ação da outra sapata.

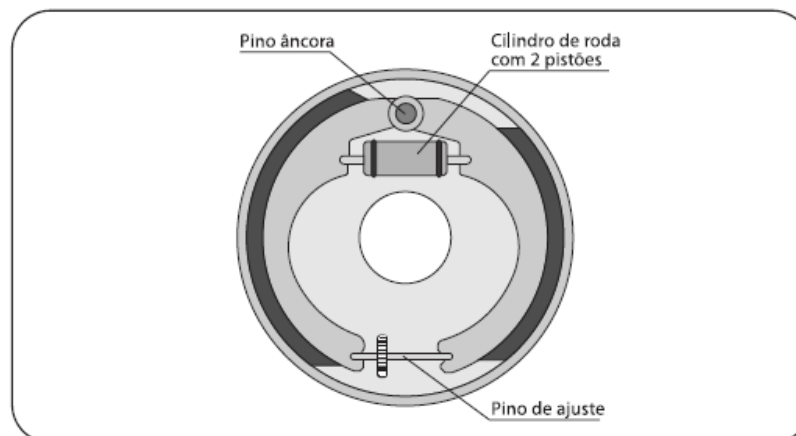


Figura 2.6 - Sistema de freios a tambor duo-servo (Adaptado de Nakata 2013)

Os tambores de freio é a ser parte integrante do mecanismo responsável pela dissipação do calor gerado durante a frenagem, possuindo uma participação preponderante no desempenho

do freio. Com os atuais projetos de motores de alto rendimento, criou-se a necessidade de se frear maiores pesos em velocidades mais altas, o que traz como consequência direta, maiores torques de frenagem, maior velocidade relativa entre a lona de freio e o tambor, resultando em maiores exigências ao elemento em destaque e controle de temperatura e atrito. (DIULGHEROGLO, 2009)

Segundo Francisco (2019), para limitar o aumento da temperatura no freio a tambor, é necessário que o calor produzido durante a frenagem se dissipe rapidamente na massa de material do tambor de freio e se transfira imediatamente ao ar ambiente. O tambor de freio deve ter suficiente condutibilidade térmica e deve ainda resistir à fadiga causada pela diferença de temperatura entre a superfície interior e a exterior. A superfície interna do tambor serve de contato para a lona de freio. Para uma frenagem eficiente, é necessário que este contato seja superior a 90% da área de trabalho da lona.

2.1.4 Sistema de freios a disco

Freios a disco são sistemas construtivamente mais simples que os freios a tambor, uma vez que além de utilizarem menos componentes para montagem, possuem melhores características de performance do que os freios a tambor, melhor resposta de frenagem, um sistema de auto ajuste bem dimensionado, menor propensão ao fade do material de fricção uma vez que possuem maior grau de recuperação térmica, pois dissipam mais rapidamente o calor para o ambiente em função de serem sistemas abertos. (DIULGHEROGLO, 2009).

A figura 2.7 abaixo as diferenças entre o esforço de frenagem para freios a disco e o esforço de frenagem para freio a tambor.

Sistema de freio a disco



Sistema de freio a tambor



Figura 2.7 - Esforços de frenagem (Adaptado de Diulgheroglo, 2009)

Segundo Messias (2015), freio a disco é um tipo de freio de atrito onde tem um disco que está solidário a roda e por meio das pinças de freio pressionando-se as pastilhas contra o disco, promove a frenagem por compressão axial, ele é normalmente utilizado em veículos leves, pela alta capacidade de refrigeração e pelo menor peso.

O sistema de freios a disco (figura 2.8), é constituído basicamente pela pinça de freio, ou cáliper, e disco de freio ou rotor. Quando o motorista aciona o sistema de freio, através do pedal de freios transmitindo a força para o cilindro, o fluido hidráulico pressurizado aciona os pistões da pinça de freio que por sua vez pressionam as pastilhas, responsáveis pela fricção, contra o rotor ou disco. O disco de freio gira e, conjunto com a roda, e a pinça está fixada. Durante este processo, a energia cinética do veículo é dissipada sobre forma de calor.

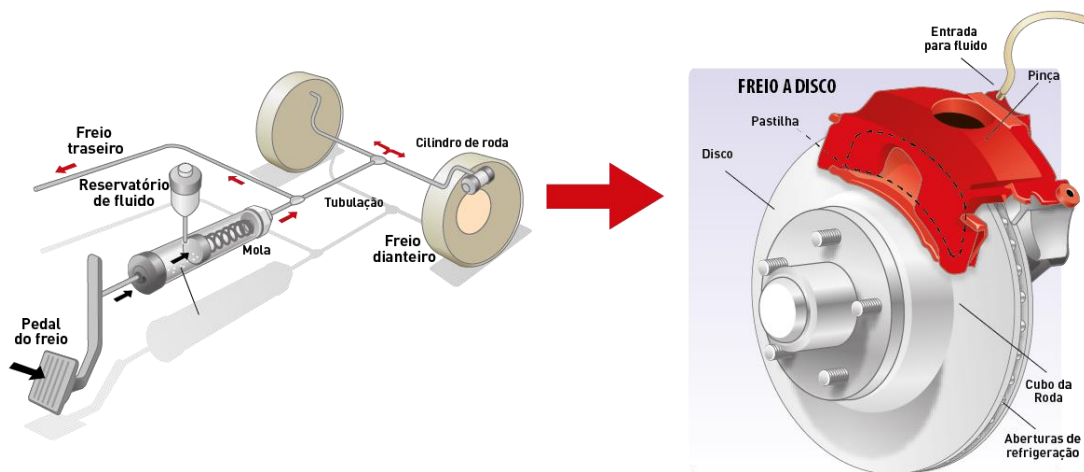


Figura 2.8 - Esquema do sistema de freios a disco (Adaptada de Alvorada, 2017)

2.1.4.1 Disco de Freio

Um disco plano que propicia a superfície de atrito necessária para um freio efetuar seu trabalho. Quando a pressão hidráulica é aplicada aos pistões do calíper, as pastilhas de freio são pressionadas contra ambos lados do disco de freio, ocasionando através desse par de contato, a redução de sua rotação através do atrito, e conseqüentemente geração de calor. (DIULGHEROGLO, 2009)

Os discos de freio podem ser sólidos (figura 2.9), que em comparação aos outros, dissipam menos calor ou seja, possuem uma menor eficiência de frenagem em consequência de sua superfície sólida, feito de ferro maciço. São os mais comumente utilizados em veículos de pequeno porte.



Figura 2.9 - Disco de freio sólido (Adaptado de quatro rodas, 2014)

Os discos de freios ventilados (figura 2.10), muito comuns em eixos dianteiros de veículos compactos mais potentes e esportivos, possuem menor massa e ranhuras que facilitam a dissipação de calor do componente. O disco de freio ventilado oferece maior desempenho de frenagem quando comparado com o disco de freio sólido.



Figura 2.10 - Disco de freio ventilado (Adaptado de Quatro Rodas, 2014)

Veículos esportivos com motores de alto desempenho e carros de luxo utilizam os discos de freio perfurados (figura 2.11). Pequenos furos no disco têm como objetivo principal aumentar o atrito, ganhando poder de frenagem, quando utilizados em umidade, presença de água ou situações adversas. Os furos também facilitam dispersar o calor.



Figura 2.11 - Disco de freio perfurado (Adaptado de Quatro Rodas, 2014)

Possuem algumas vantagens em comparação ao freio á tambor, das quais se incluem a maior dissipação e distribuição de calor e autolimpeza. Os discos de freio são fabricados principalmente de ferro fundido ou aço inoxidável.

2.1.4.2 Cilindro Mestre

Diulgheroglo (2008) afirma que o cilindro mestre dos automóveis, comerciais leves e alguns caminhões leves, é o responsável direto pelo início do processo de frenagem de um veículo, uma vez que quando acionamos o pedal de freio, o pistão do cilindro mestre, que está interligado a haste do sorvo-freio, passa a comprimir o fluido que está em seu compartimento, e a partir desta primeira compressão inicia-se a geração de pressão em todo o sistema do circuito de atuação hidráulica. É sua função também, manter a pressão residual nos circuitos de freio.

A força aplicada no pedal é ampliada pelo servo freio, aliviando o esforço que o motorista precisa fazer na frenagem. Essa força, então, é transmitida para o cilindro mestre (figura 2.12), onde fica o fluido de freio, líquido que faz todo o sistema hidráulico funcionar. No cilindro mestre ficam os pistões. Quando o motorista aciona o pedal de freio, a força mecânica gerada pressiona o fluido em uma das extremidades do circuito hidráulico (o fluido circula por todo o sistema de frenagem através de tubulações). Essa pressão move outro pistão, situado na extremidade oposta do sistema, acionando os freios. (ATUAL, 2019).



Figura 2.12 - Cilindro Mestre (Adaptado de Quatro Rodas, 2015)

A pressão gerada pelo sistema é proporcional a força aplicada pelo motorista e o diâmetro do êmbolo do cilindro (Equação 2.1). As configurações do veículo a ser utilizado, e variáveis como velocidade máxima, terreno e peso do veículo são utilizadas no dimensionando desse componente.

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Eq.2.1}$$

Conforme Puhn (1985), nos primeiros sistemas de freio, um único cilindro mestre era responsável por pressurizar todo o sistema de freio. Porém, caso houvesse falha em algum ponto do sistema, a potência total de frenagem seria perdida. Devido a isto, a legislação DIN74000 exige dois circuitos independentes entre os freios (REIF, 2014). Assim, atualmente são utilizados cilindros com duas câmaras e dois pistões (figura 2.13), um para cada eixo, de forma que se houver falha em algum sistema, o outro ainda esteja disponível para utilização.

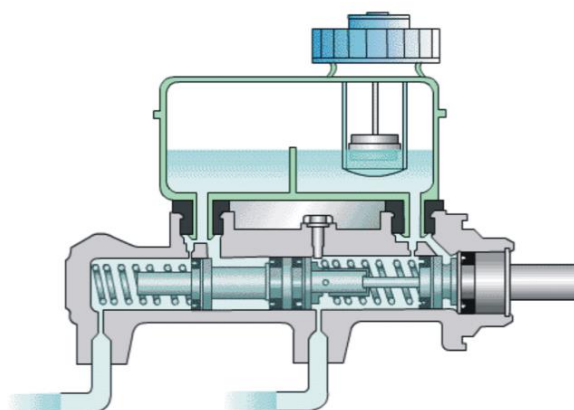


Figura 2.13 - Cilindro Mestre Dupla Ação (Adaptado de Freios Breque, 2016)

2.1.4.3 Pedal de freio

O pedal de freio é o primeiro componente do acionador hidráulico e está em contato direto com o operador. O pedal de freio é uma haste pivotada que tem como função transmitir e ampliar a força aplicada pelo condutor até o cilindro-mestre. (CARVALHO, 2014)

O pedal de freio é uma alavanca do tipo inter-resistente, podendo ser suspensa, ou modular. No momento da frenagem, o motorista aplica uma força no pedal de freio e a alavanca transmite a força para o servo-freio e o cilindro mestre, assim a força é convertida em pressão hidráulica. A intensidade da frenagem vai depender da força aplicada pelo condutor no pedal de freio, o desenho da alavanca é um dos fatores que influenciam na sensação que o motorista experimenta ao acionar o freio (GARDINALLI, 2005).

O funcionamento do pedal de freio (figura 2.14), é similar a uma alavanca. A multiplicação da força do operador se dá por equilíbrio de momentos em relação ao ponto de pivotamento. Quando uma barra está em equilíbrio estático, o somatório de forças e momentos é necessariamente igual a zero. O momento é descrito como o produto vetorial da força com o seu braço de aplicação, escolhendo adequadamente os pontos de articulação do pedal com a estrutura e do pedal com o cilindro-mestre, temos o aumento da força transmitida. Este agente multiplicador da força de acionamento é chamado razão de pedal e pode ser quantificado através da grandeza C .

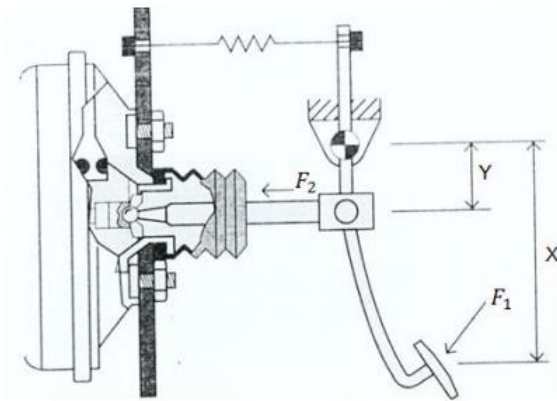


Figura 2.14 - Pedal de freio (Adaptado de Pietro, 2014)

A força transmitida ao servo freio pode ser determinada pela equação 2.2.

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{X}{Y} \quad \text{Eq. 2.2}$$

2.1.4.4 Fluido de freio

O fluido de freio é um componente fundamental do sistema hidráulico. Sua função é transmitir a força, através da pressão hidráulica, gerada pelo cilindro mestre, fazendo com que chegue as pinças de freio. O fluido deve apresentar algumas características, tais como ser quimicamente estável sob altas temperaturas, apresentar alto ponto de ebulição, não ser corrosivos às partes metálicas do sistema e não degradar as borrachas dos anéis de vedação. A viscosidade também é uma característica importante, pois baixa viscosidade pode causar vazamentos nas conexões, enquanto alta viscosidade aumenta a perda de carga, diminuindo a eficiência do sistema.

2.1.4.5 Pinça de freio

Também chamada de Cáliper de Freio, que origina do termo inglês *caliper* (figura 2.15), é montada sobre o disco, geralmente utilizando um parafuso de fixação em um suporte da manga de eixo. Esta é responsável por receber o fluido de freio e transformar a pressão imposta

pelo cilindro mestre em uma força de atrito, através das pastilhas de freio. Aloja grande parte dos componentes do sistema de freio a disco.



Figura 2.15 - Pinça de freio (Adaptado de Quatro Rodas, 2015)

Na pinça existe um ou mais cilindros, por dentro destes se deslocam os pistões que movimentam o fluido de freio quando este chega as pinças. Existem uma série de componentes que irão proteger o cilindro de partículas que podem gerar falhas no sistema ou mesmo a redução de pressão. Exemplos destes componentes são anéis de vedação e a coifa. A pinça é, geralmente, fabricada em ferro fundido, pode ter diversos pistões e, em alguns casos, pode ter mais de um pistão em cada roda. As pinças com um único cilindro são chamadas de deslizante, (figura 2.16), quando a pinça possui mais de um pistão, esta terá pelo menos um pistão para cada pastilha, e é chamada de pinça do tipo fixo.

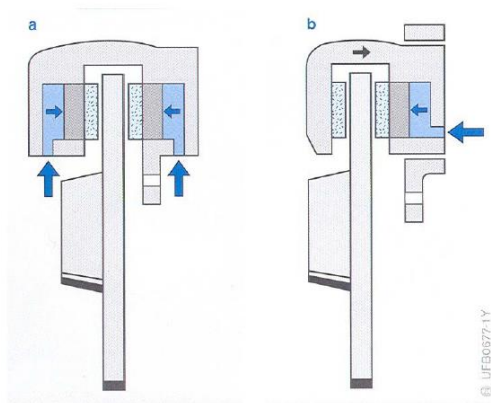


Figura 2.16 - Pinça de freio fixa (a) e flutuante (b). (Adaptado de BAUER, 2015)

Segundo Diulgheroglo (2008), para o cáliper flutuante se aplica com sucesso o princípio da física que diz “para cada ação, existe uma reação contrária de mesma intensidade, mas de sentido oposto”. O caliper flutuante não é uma estrutura rígida, mas desliza para frente e para trás sobre buchas ou pinos, e uma grande vantagem desse princípio é que um mínimo de *runout* do disco de freio será compensado pela flutuação característica da ponte sem criar nenhuma instabilidade. Seu design permite uma sangria do sistema mais fácil, porém requer mais volume de fluido de freio em função do tamanho do pistão.

Kakihara e Matsuzaki (2003), os freios a disco tipo fixo caracterizam-se por serem mais leves e mais robustos que os flutuantes. Esse possui dois êmbolos localizados em lados opostos ou quatro êmbolos em lados opostos, que movimentam as pastilhas contra o disco, quando a pressão hidráulica é aplicada pelo furo de alimentação.

Diferentes dos freios a tambor, que necessitam de um mecanismo auxiliar para realizar a regulagem automática, os freios a disco devido a sua concepção são autorreguláveis. O anel de vedação é projetado de modo a sofrer deformação elástica. Durante a aplicação do freio, ao mesmo tempo em que permite o deslocamento relativo do êmbolo, acompanha o desgaste da pastilha e do disco. Quando o freio é liberado, o anel de vedação arrasta o êmbolo até sua posição de repouso, gerando uma folga entre o disco e a pastilha da ordem de 0,15 mm, permitindo que o disco gire livremente. (BAUER, 2015)

2.2 Aços Inoxidáveis

O aço inox ou inoxidável é uma liga metálica composta de ferro, cromo, carbono e níquel com elevada resistência à oxidação. Suas aplicações são principalmente em função de suas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e tenacidade. Dependendo do tipo de aplicação, podem ainda fazer parte de sua composição, outros elementos que modificam e melhoram as suas características básicas, como o silício, titânio, nióbio, molibdênio, cobalto, boro e o nitrogênio.

Segundo Magalhães (2019), enquanto os aços comuns sofrem o processo de ferrugem, o aço inox é geralmente muito resistente à corrosão. O responsável por essa resistência é o cromo, que dependendo da quantidade em sua composição, quando entra em contato com o oxigênio, forma uma película protetora sobre a superfície do aço, que os torna impermeável. O aço inox deve apresentar, no mínimo, 10,50% de cromo. A adição do níquel ao aço inox, lhe confere a ductilidade, ou seja, permite que seja trabalhado em sua superfície, além de resistência a altas temperaturas e soldabilidade, melhorando sua resistência geral.

Uma vez que a microestrutura tem efeito dominante sobre as propriedades, os aços inoxidáveis são classificados com base em sua microestrutura a temperatura ambiente. Os efeitos de diversos elementos d ligas sobre a microestrutura dos aços podem ser apreciados a partir de diagramas de equilíbrio de fases. Para fins de classificação, os aços inoxidáveis podem ser classificados em cinco categorias: martensíticos, ferríticos, austeníticos, ferrítico-austeníticos (duplex) e endurecidos por precipitação. (SILVA E MEI, 2010)

2.2.1 Aço inoxidável Martensítico

Os aços inoxidáveis Martensíticos podem ser considerados equivalentes aos aços para têmpera e revenimento (carbono ou ligados), com diferença principal no alto teor de cromo. O elevado teor de cromo desses aços produz elevadíssima temperabilidade, abaixamento da temperatura M1 e aumento da resistência ao amolecimento no revenimento. (SILVA E MEI, 2010)

Segundo o ASM Metals Handbook (2005), os aços inoxidáveis martensíticos são essencialmente ligas de ferro, cromo e carbono, sendo o teor de cromo na faixa de 10,5 a 18%, são ferromagnéticos, endurecíveis por tratamentos térmicos e geralmente só resistem à corrosão em ambiente não muito agressivo. Possuem estrutura cúbica de corpo centrado e quando endurecidos apresentam estrutura martensítica. O cromo e o carbono são equilibrados para garantir a estrutura martensítica após o endurecimento. Com o aumento do teor de carbono a estrutura martensítica (Figura 2.17) torna-se mais fina e a quantidade de austenita também aumenta retida aumenta.

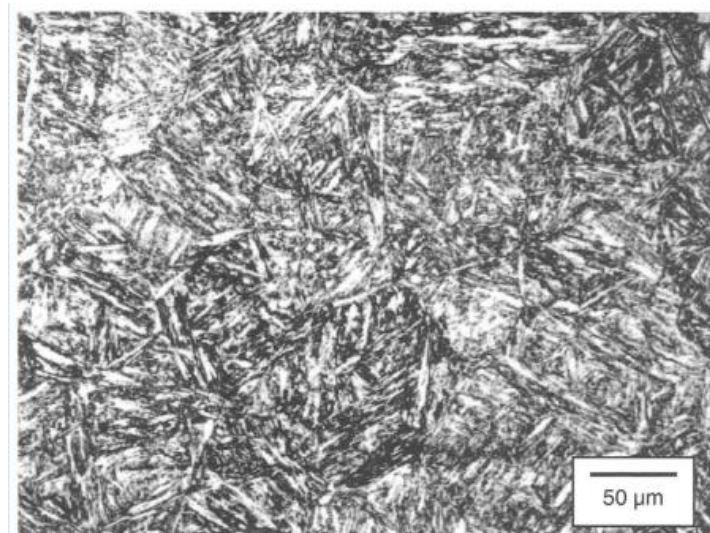


Figura 2.17 - Microestrutura aço inoxidável 410 no estado temperado e revenido (Adaptado de Lippold et al, 2015)

Nos aços inoxidáveis Martensíticos o carbono está em uma determinada concentração que permite a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas. Durante o resfriamento, a austenita se transforma em martensita. A martensita é uma fase rica em carbono, frágil e muito dura. Esses aços são fabricados e vendidos pela indústria siderúrgica no estado recozido, com estrutura ferrítica, baixa dureza e boa ductilidade. Somente depois de um tratamento térmico de têmpera, terão uma estrutura martensítica sendo muito duros e pouco dúcteis. Mas nestas condições (temperados) é que serão resistentes à corrosão. (CARBÓ, 2018)

2.2.2 Aço Inoxidável ferrítico

São essencialmente ligas de ferro e cromo com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado – CCC. O teor de cromo presente nesses aços está na faixa de 10,5 a 30%. Algumas ligas podem conter molibdênio, silício, alumínio, titânio e nióbio para conferir características particulares ao produto final. Por exemplo, o enxofre e selênio podem ser adicionados para aumentar a usinabilidade. Os aços inoxidáveis ferríticos, são ferromagnéticos e possuem boa ductilidade e conformabilidade, mas a altas temperaturas são menos resistentes que os aços inoxidáveis austeníticos. (ASM METALS HANDBOOK, 2005).

Segundo Infromet (2018), quando teor de cromo é alto e o de carbono baixo, mantêm-se ferríticos mesmo em temperaturas relativamente altas, havendo apenas crescimento de grão. Nestes aços a recristalização só é possível após deformação mecânica e recozimento. Teores de cromo muito elevados podem causar a formação da fase sigma (σ), que se forma durante aquecimento prolongado entre 400 e 500 °C, porém se solubiliza em temperaturas mais altas. Esta fase (um composto intermetálico Fe-Cr) provoca queda de tenacidade e de ductilidade, podendo ser restauradas com aquecimento longo a 800-850°C. A microestrutura de um aço inoxidável ferrítico (figura 2.18), com elevado teor de cromo apresenta claramente a fase sigma.

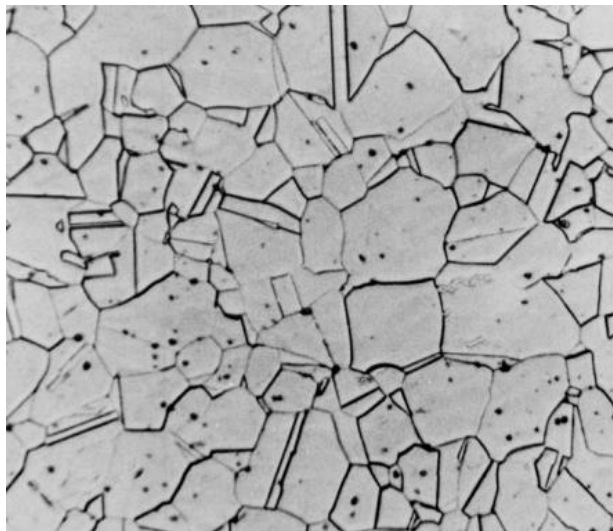


Figura 2.18 - Microestrutura Aço Inoxidável Ferrítico (Adaptado de Lippold et al, 2014)

Os aços inoxidáveis ferríticos contêm, em geral, uma quantidade de cromo superior à dos martensíticos. Isso melhora a resistência à corrosão, mas em parte sacrifica outras propriedades, como a resistência ao impacto. O mais popular dos aços ferríticos é o 430. Com cromo superior a 16%, é um material com ótima resistência à corrosão. Sua capacidade de estampagem também é boa, mas estampagens muito profundas não podem ser conseguidas com esse tipo de aço. A maior limitação para a utilização do aço 430 é a soldabilidade. As soldas nesse aço são frágeis e de menor resistência à corrosão. (CARBÓ, 2010)

Silva e Mei (2010) afirma que surpreendentemente, a maioria dos aços chamados ferríticos não atende a essa definição. Por exemplo, o AISI 430 (0,1% C max, 17% Cr, o mais popular dos ferríticos) pode apresentar de 30-50% de austenita, e aquecido acima de 800°C. Durante o resfriamento, a austenita se transformará em martensita, de forma que a estrutura bruta de forjado desse aço consistirá de uma mistura de martensita e ferrita. Mesmo os aços ferríticos de alto cromo podem apresentar alguma austenita à alta temperatura e, conseqüentemente apresentarão ferrita e martensita quando brutos de forjado.

Os aços inoxidáveis ferríticos fazem parte da série 400 (figura 2.19), que em geral apresentam o cromo mais alto e o carbono mais baixo. Os martensíticos também fazem parte dessa série, porém predomina um cromo mais baixo e um carbono mais alto (em comparação com os ferríticos).

Aços inoxidáveis da Série 400

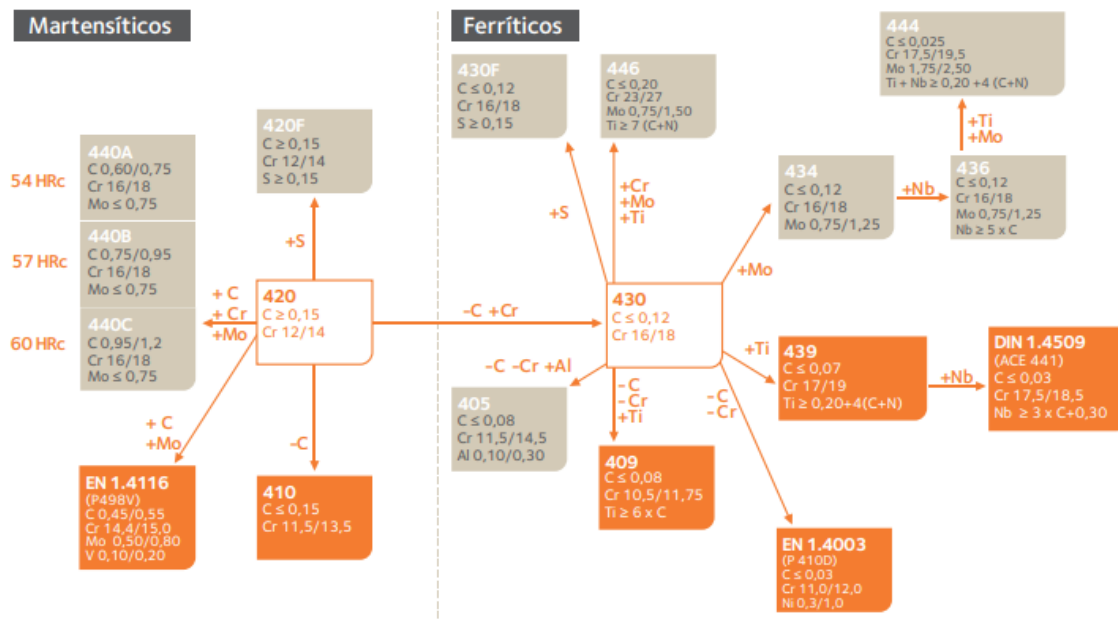


Figura 2.19 - Aços Inoxidáveis da série 400 (Adaptado de Carbó, 2010)

2.2.3 Aço inoxidável Austenítico

A adição de níquel como elemento de liga, em determinadas quantidades, permite transformar a estrutura ferrítica de um aço inox em austenítica e isso tem como consequência uma grande mudança em muitas propriedades. (CARBÓ, 2010)

ASM Metals Handbook (2005), afirma que o aço inoxidável austenítico apresenta uma estrutura de cúbica de face centrada – CFC. Essa estrutura proporciona o uso de elementos austenitizantes como, por exemplo, o níquel, manganês e nitrogênio. O teor de cromo presente pode variar de 16 a 26%, o de níquel no máximo 35% e o de manganês no máximo 15%. A micrografia típica de um aço inoxidável austenítico pode ser observada na figura 2.20, constituída essencialmente de grãos de austenita.



Figura 2.20 - Microestrutura característica do Aço Inoxidável Austenítico (Adaptado de Barbosa et al, 2018)

Silva e Mei (2010), os aços inoxidáveis austeníticos estão entre os aços que apresentam melhores propriedades de resistência a temperaturas elevadas. Na aplicação em alta temperatura desses aços dois aspectos importantes devem ser considerados o coeficiente de expansão térmica dos aços austeníticos é aproximadamente 60% maior que o dos aços ferríticos usuais e a condutividade térmica dos aços austeníticos é aproximadamente 30% menor que a dos aços ferríticos. Por terem estrutura CFC, apresentam excelentes valores de resistência ao impacto e não sofrem o fenômeno de transição dúctil-frágil, sendo, portanto, os mais indicados para serviços criogênicos ou quando a garantia de tenacidade em qualquer situação é fundamental.

Segundo Carbó 2010, os aços inoxidáveis austeníticos, sendo o 304 (18%Cr-8%Ni) o mais popular, têm excelente resistência à corrosão, excelente ductilidade (existe aqui uma grande mudança nas propriedades mecânicas se os comparamos com os ferríticos) e excelente soldabilidade e tenacidade. Os inoxidáveis austeníticos são utilizados em aplicações em temperatura ambiente, em altas temperaturas (até 1.150° C) e em baixíssimas temperaturas (condições criogênicas), uma série de alternativas que dificilmente são conseguidas com outros materiais. A figura 2.21 abaixo ilustra os aços da série 300 e suas composições.

Aços inoxidáveis da Série 300

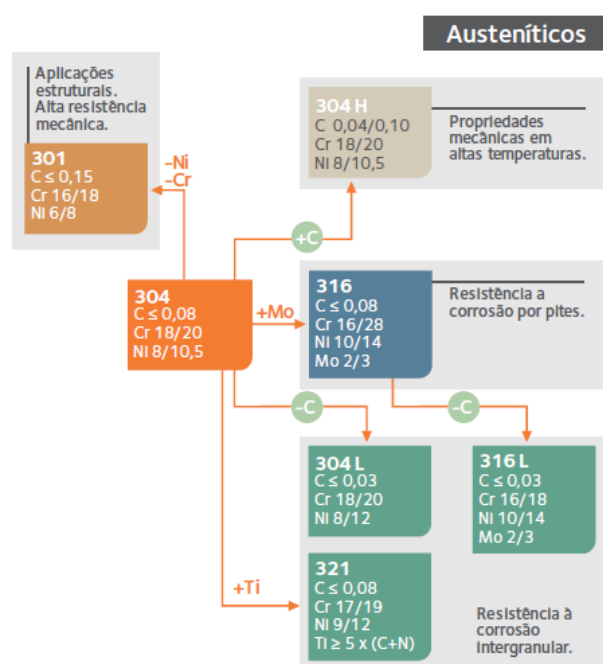


Figura 2.21 - Aços inoxidáveis Austeníticos da série 300 (Adaptado de Carbó, 2010)

Informet (2018) afirma que do mesmo modo que os aços inox ferríticos, os austeníticos não sofrem transformação alotrópica de fase com a mudança de temperatura. Como desvantagem, apresentam sensibilidade à corrosão intergranular (sensitização), e formação de carbonetos nos contornos de grãos. Ao serem adicionados, o titânio e o nióbio competem com o cromo para formar carbonetos, minimizando a sensitização. A adição de molibdênio e cobre aumentam a resistência à corrosão causada por ácido sulfúrico, ácidos orgânicos e cloretos em geral. O teor de carbono e cromo também deve ser baixo para evitar a formação excessiva de carbonetos de cromo que provoca sensitização. Entretanto, o teor de carbono muito baixo compromete a dureza/resistência mecânica do material.

O Aço Inox 304 (tabela 2.1), é uma liga metálica composta por Ferro, Carbono, Silício, Manganês, Fósforo, Enxofre, Cromo e Níquel. Entre as suas principais qualidades estão a resistência à corrosão a uma temperatura de até 920°C, pode ser soldado com facilidade, tem alta praticidade de conformação. O aço 304 é um material com excelente ductilidade. Em alguns casos de estampagem muito profunda, um aumento no níquel permite melhorar ainda mais esta

característica. A alta estabilidade dos graus austeníticos (figura 2.22), em uma grande faixa de temperatura torna possível seu emprego em situações criogênicas e em trocadores de calor.

Tabela 2.1 – Composição Química e propriedades mecânicas do AISI 304 (Adaptado de Operam, 2019)

304

Composição química							
Aperam	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
304	0,08	2,0	0,75	0,040	0,030	18,0 a 20,0	8,0 a 11,0

Propriedades mecânicas					
Aço	Valores	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento (%)	Dureza máxima (HRB)
K03	Norma ASTM	205	515	35	90
(304)	Típicos	340	700	62	90

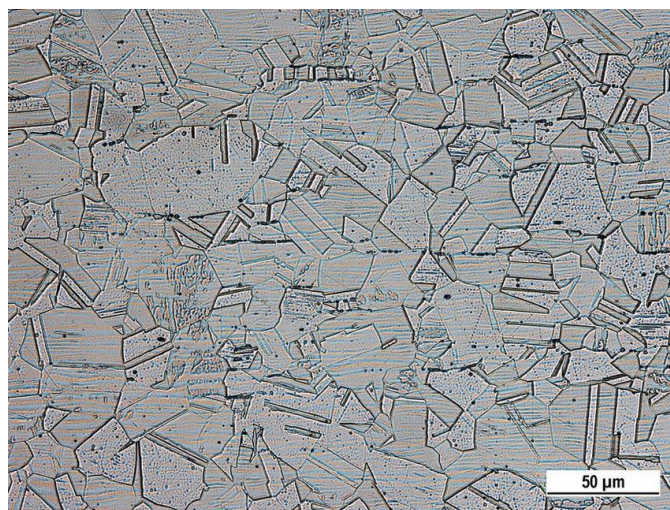


Figura 2.22 - Microestrutura do AISI 304 (Adaptado de Markovicova, 2019)

2.2.4 Aço inoxidável duplex

Senatore et al (2008), afirma que o aço inoxidável dúplex é o nome dado à classe de materiais com microestrutura bifásica, composta por uma matriz ferrítica e ilhas de austenita, com frações volumétricas de, aproximadamente, 50% de cada fase, sendo que o número de

contornos de grão alfa/alfa e gama/gama é similar ao número de interfaces alfa/gama. O balanceamento dos elementos de liga, nos aços inoxidáveis dúplex tem, por objetivo, controlar os teores de elementos estabilizadores de austenita, tais como níquel, carbono, nitrogênio e de elementos estabilizadores da ferrita, sendo estes o cromo, molibdênio e silício. Esses elementos constituem a composição química dos dúplex.

A combinação entre os elevados valores de alongamento da austenita com o elevado limite de escoamento da ferrita nos aços inoxidáveis dúplex, forma um conjunto de notáveis propriedades mecânicas. Os aços inoxidáveis dúplex apresentam elevado limite de escoamento, na ordem de duas vezes o valor dos aços austeníticos. Além disso, apresentam um alongamento mínimo em torno de 25%. (NILSSON, 1992)

A microestrutura dos aços inox duplex (figura 2.23) é constituída por ilhas de austenita (mais escura) distribuídas em uma matriz ferrítica (mais clara). Para aços duplex contendo 70 % de ferrita é possível obter uma microestrutura ferrítica-austenítica para teores de cromo entre 22 e 28 % e teores de níquel entre 2 e 8 %. O teor de carbono entre 0,01 e 0,05 % proporciona resistência mecânica e ao desgaste. Teores de nitrogênio entre 0,10 e 0,35 % favorecem a resistência mecânica e à corrosão por pites. (INFORMET, 2018)

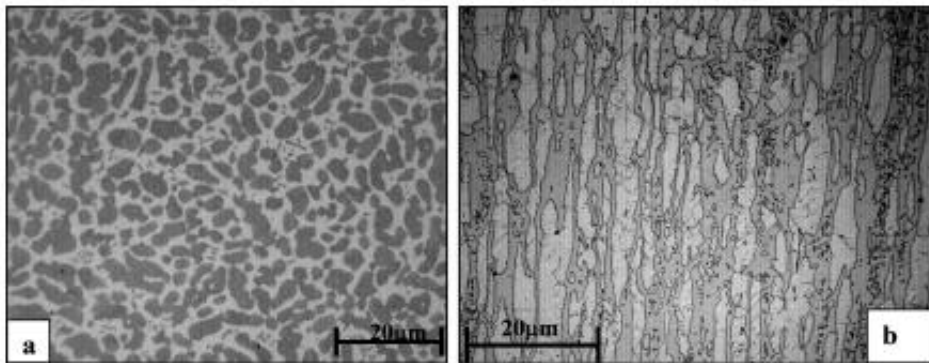


Figura 2.23 - Microestrutura típica de aço inoxidável duplex, (a) Seção transversal e (b) seção longitudinal. (Adaptado de Informet, 2018)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este projeto foi determinado que o disco de freio deve suportar as forças atuantes no sistema de freios sem que houvesse alteração na microestrutura do material resultante de fadiga térmica. Para essa análise, o primeiro passo foi definir as condições de trabalho do disco e como ocorre a dissipação de energia térmica ao longo da superfície, para que em um segundo momento, fosse realizado o ensaio de dureza e análise metalográfica das amostras. A figura 3.1 ilustra um fluxograma das etapas a serem desenvolvidas no trabalho.

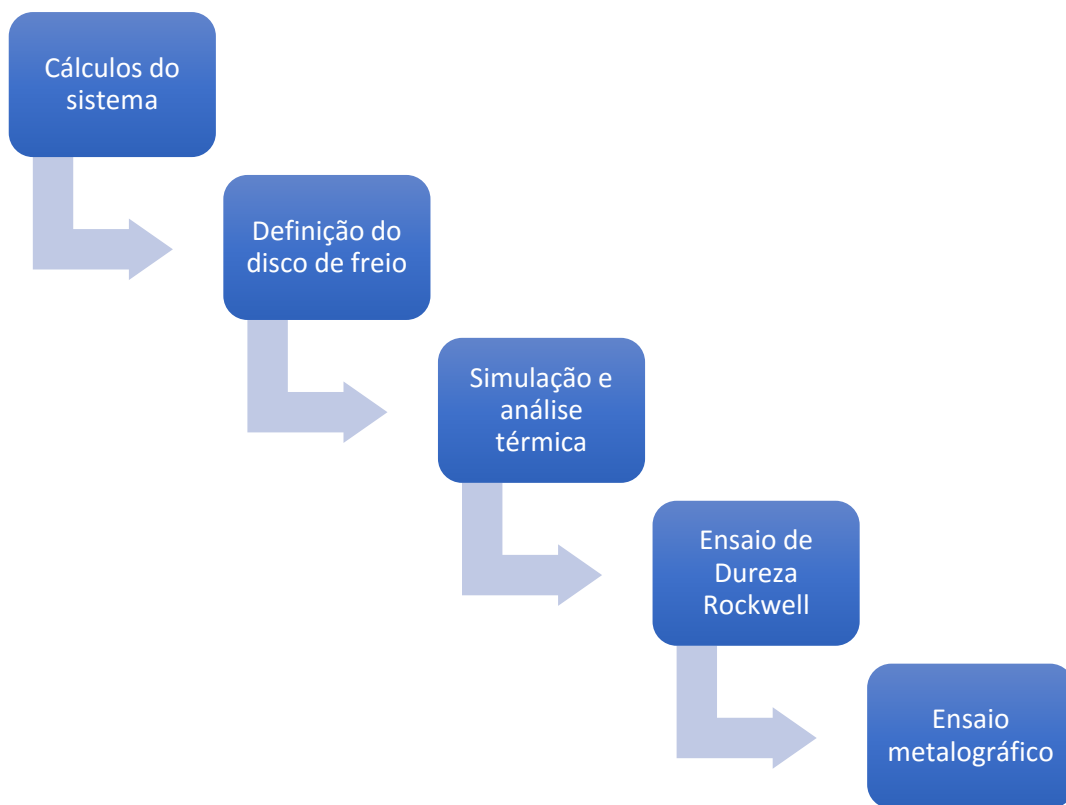


Figura 3.1 - Fluxograma de execução (Autor, 2019)

3.1 Força de frenagem

A força de frenagem será a força aplicada pela pastilha de freio no disco durante a ação de frenagem. Ela é resultante de uma força aplicada pelo piloto no pedal, que será transmitida as pinças através do fluido que transmite a pressão ao êmbolo da pinça através do princípio de pascal. A intensidade da força de frenagem depende do diâmetro do êmbolo do cilindro mestre e da pinça utilizada e outros dados presentes no quadro 3.1, utilizados como dados de entrada.

Tabela 3.1 – Dados de entrada (Autor, 2019)

Dados de Entrada		
Peso total do Veiculo	300	kg
Gravidade	9,81	m/s ²
Distância entre eixos	1.5	m
raio do pneu	0.45	m
Diâmetro do Cilindro Mestre	0,021	m
Diâmetro do êmbolo da Pinça	0,032	m
Velocidade máxima	15,27	m/s
Força de aplicação no pedal	440	N
Coefficiente de atrito pneuxsolo	0.95	*
Coefficiente de atrito discoxpastilha	0.65	*

A força gerada pelo pedal pode ser calculada através da equação 5.1.

$$F_{pd} = F_{pil} \cdot C \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$F_{pd} = 440 \times 4 = 1760 \text{ N}$$

Onde C é a razão entre a distância do ponto de aplicação da força para o ponto de fixação e a distância do ponto de fixação do pedal e o ponto de transmissão para o cilindro. A força transmitida pelo pedal ao cilindro será sempre maior que a força de aplicação do piloto.

A força resultante pelo pedal no pedal é transmitida ao cilindro mestre de forma igualitária (Equação 3.2).

$$F_{pd} = F_{cm} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$F_{cm} = 1760 \text{ N}$$

Assim, a pressão no cilindro mestre pode ser calculada através da equação 3.3:

$$P_{cm} = \frac{F_{dp}}{A_{cm}} \quad \text{Eq. 3.3}$$

$$P_{cm} = \frac{1760}{3,463 \cdot 10^{-4}} = 5,082 \text{ Mpa}$$

A pressão no cilindro mestre deve ser distribuída de forma uniforme até as pinças, sendo igual nas duas extremidades (Equação 3.4).

$$P_{cm} = P_{pin} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Dada a pressão na pinça, a força na mesma é dada pela equação 3.5.

$$F_{pin} = P_{pin} A_{pin} \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$F_{pin} = 5,082 * 10^6 * 6,38 * 10^{-4} = 3242,31 \text{ N}$$

A força na pinça gera uma força de fechamento, realizará o atrito entre as pastilhas e o disco. Essa força de fechamento deve ser duas vezes a força das pinças. Essa força será a utilizada para análise térmica do sistema (Equação 3.6).

$$F_{fech} = 2F_{pin} \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$F_{fech} = 6484,632 \text{ N}$$

3.2 Escolha do disco de freio e calculo do raio efetivo

O disco de freio utilizado foi aplicado no veículo baja do projeto especial bumba-meu-baja (figura 3.2). O modelo pode ser visualizado na (figura 3.3), e foi utilizado por dois anos no veículo. O material utilizado foi o AISI 304 sem tratamento térmico, sujeito a força de frenagem calculada no tópico anterior. O disco sofria constantemente efeito de fadiga térmica, pois o atrito resultante do contato entre a pastilha e o disco resultava em uma energia térmica a ser dissipada rapidamente repetidas vezes. O disco é do tipo perfurado, com 3.5 mm de espessura e diâmetro de 160mm. A (figura 3.4) mostra o disco com suas dimensões.



Figura 3.2 – Veiculo baja (Autor, 2018)

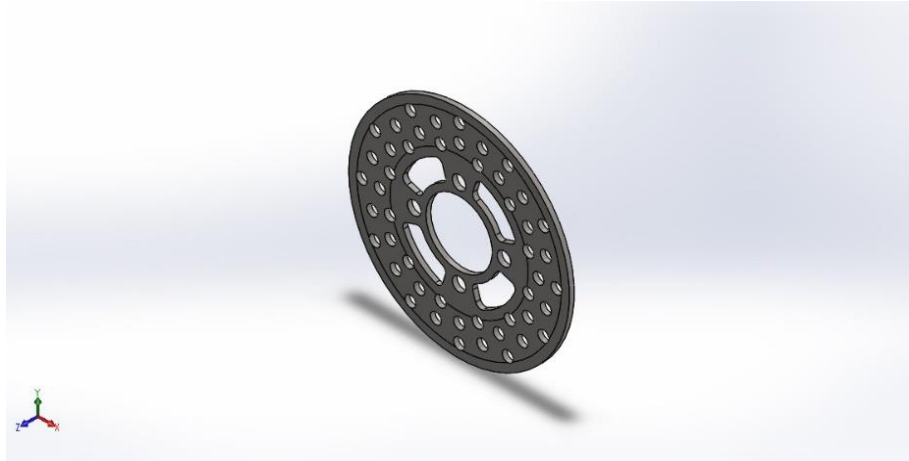


Figura 3.3 – Disco de freio (Autor, 2018)

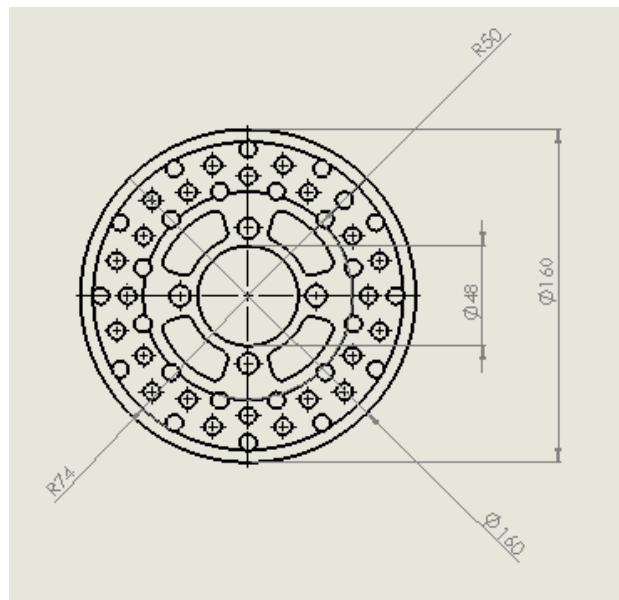


Figura 3.4 – Dimensões do disco de freio (Autor, 2018)

O raio efetivo de frenagem pode ser calculado através da equação 3.7 abaixo. Este indica o raio onde a temperatura é maior após a ação de frenagem. Esse ponto servirá de amostra para a análise metalográfica na próxima etapa.

$$\mu = \frac{M}{Re * Fn} \quad \text{Eq. 3.7}$$

O torque de frenagem (M) tem valor de 183,13 N.m, a força normal aplicada (Fn) tem intensidade de 6484,63 N e o coeficiente de atrito entre a pastilha e o disco é de 0.45 (μ). Logo, pode ser definido o valor do raio efetivo de frenagem na equação 5.8.

$$Re = \frac{M}{\mu * Fn} = 62,76 \text{ mm} \quad \text{Eq. 3.8}$$

Logo, através da equação, conclui-se que o raio efetivo teórico de frenagem é 62,76mm. Outros autores afirmam que o ponto onde a temperatura é a mais alta é dado pelo raio do disco onde, em um perfeito contato entre a pastilha e o disco, o centro da pastilha é aplicado. Fazendo a medição com o disco de freio, o raio efetivo teórico neste caso seria de 62mm, valor muito próximo do raio efetivo calculado acima.

3.3 Escolha do material

O disco de freio deve ser capaz de resistir às altas tensões térmicas envolvidas durante os repetitivos ciclos térmicos no decorrer do uso e a energia térmica gerada através do atrito entre a pastilha e o disco deve ser dissipada o mais rápido possível. O calor gerado pode induzir deformações térmicas, que associadas às deformações causadas pelas tensões resultantes da força de fechamento podem levar ao desenvolvimento de trincas.

O material aplicado deve ter propriedades que atenuem esses efeitos, aumentando a vida útil do disco de freio. Tais requerimentos como resistência ao desgaste, resistência a trincas formadas pelo calor, capacidade de suportar outras forças além da força de frenagem, usinabilidade e alta eficiência de frenagem (resultante da temperatura máxima alcançada) são pontos levados em consideração.

O aço inoxidável 304 é um aço austenítico possui propriedades correspondentes a esta análise (tabela 3.2). Além da ótima resistência á corrosão, propriedade oferecida pela presença de cromo, também possui uma matriz austenítica resultante da presença do níquel, não sofrendo transformação alotrópica de fase com a mudança de temperatura. Possui uma estrutura CFC

que favorece a ductilidade e tenacidade e resistência ao calor. Aços inoxidáveis austeníticos também não sofrem a transição dúctil-frágil.

Tabela 3.2 – Propriedades do AISI 304 (Adaptado de RolMetais, 2017)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA %							
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	N
≤ 0.07	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.015	≤ 0.045	17.0 - 19.5	8.00 - 10.5	≤ 0.11

CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS									
Solução-Recozido à temperatura ambiente (amostras longitudinais)									
Dureza HB 30	Limite Elasticidade		Resistência à tração Mpa	Alongamento $L_0=5 d_0 \geq \%$	Estricção $Z \geq \%$	Resiliência 0,2% J (prova DVM)			
≤ 215	0,2% \geq Mpa	1% \geq Mpa							
	190	225	500 - 700	45	60	≥ 100			
Estado solução-recozido a elevadas temperaturas									
0,2% Limite Elasticidade em Mpa									
100 °C	150 °C	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C	550 °C
1550	1400	1270	1180	1100	1040	980	950	920	900
Coeficiente de dilatação térmica entre 20 °C e °C (10 ⁻⁶ K ⁻¹)									
100	200	300	400	500	600	700	800		
16.0	16.5	17.0	17.5	18.0	18.5	18.5	19.0		

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS					
Densidade (20 °C) g/cm ³	Calor Especifico (20 °C) J/(g.K)	Condutividade Térmica (20 °C) W/(K.m)	Resistência Eléctrica (20 °C) .mm ² /m	Modulo de Elasticidade (20 °C) kN/mm ²	Magnético
7.9	0.50	15	0.73	200	Não*

3.4 Simulação térmica

A otimização de um material para discos de freio é conseguida quando se obtém uma boa relação entre condutividade térmica e resistência mecânica. Veículos com alta quantidade de movimento (velocidade x massa, tais como trens, caminhões de mineração e carros de corrida) requerem principalmente resistência mecânica enquanto que veículos leves (carros de passageiros) requerem, principalmente, condutividade térmica. (MEURER et al., 2007)

A simulação térmica é um parâmetro para analisar as condições de trabalho do disco e qual a reação e dissipação de energia térmica. O disco de freio deve reagir de maneira satisfatória, atingindo temperaturas máximas com valor médio abaixo de 400°C, já que valores acima já viriam a resultar em mudança de fase e perda de propriedades mecânicas do material, isso sem levar em conta o fenômeno de *Fading*, no qual altas temperaturas resultam em perda de eficiência de frenagem por conta do menor atrito entre as partes.

A simulação térmica foi realizada utilizando o software SolidWorks, aplicando a força de frenagem equivalente e calculada no tópico 5.1. Os dados da simulação estão disponíveis na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados de entrada para simulação (Adaptado de Autor, 2019)

Nome	AISI 304
Modelo	Isotrópico Linear Elástico
Condutividade Térmica	16 W/ (m.K)
Calor Especifico	500 J/ (kg. K)
Massa Especifica	8000 kg/m ³
Coefficiente de Convecção	14.9 W/ (m ² .K)
Temperatura ambiente	300 Kelvin
Potência térmica	4000 W
Total tempo de frenagem	3 s
Tipo de Elemento	Malha Solida
Malha	Blended Curvature Based Mesher
Pontos Jacobianos	4 Pontos

3.5 Ensaio de dureza Rockwell

A fadiga térmica pode ser definida como um modo de fadiga ou desgaste, causada pela aplicação cíclica de tensões com origem de calor, característica da frenagem. Essas tensões ocasionam gradientes de contração e dilatações térmicas que o material sofre no processo. Essas tensões podem gerar nucleação, propagação e formação de malhas de trincas na superfície do disco e tem maiores em materiais duros ou com elevação da dureza após a utilização.

O ensaio de dureza Rockwell tem como principal objetivo endentar o material que está sofrendo o teste com um cone de diamante ou um endentador de esfera de aço endurecido. O endentador sofre uma força contra a superfície do corpo de prova com uma pré-carga chamada F0, normalmente se aplica 10 Kgf. Quando se atinge o equilíbrio, um dispositivo indicativo da máquina que segue os movimentos do endentador e responde às variações da profundidade de

penetração é levado para a posição zero. (MASCARENHAS, 2016). O ensaio de dureza servirá para analisar possíveis variações dessas propriedades do disco, já que a tendência é a dureza aumentar como consequência do encruamento do material.

O ensaio de dureza utilizado foi o Rockwell, um ensaio não destrutivo. A dureza será determinada através da diferença de profundidade de penetração da aplicação de uma pré-carga e a carga aplicada. Essa pré-carga garante uma maior precisão no ensaio. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos e metalografia – LABEMM do NUTENGE (Núcleo Tecnológico de engenharia) na Universidade Estadual do Maranhão, utilizando o durômetro Rockwell RBS-M da marca Pantec (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Durômetro Rockwell RBS-M da marca Pantec (Autor, 2019)

O ensaio foi realizado em duas amostras do disco, uma nova, nunca utilizada, e uma amostra do disco já utilizada com 2 anos de vida útil (Figura 3.6). O método adotado foi Rockwell B, e as etapas foram: Aproximar a superfície do corpo de prova do penetrador, submeter o corpo de prova a uma pré-carga, aplicar a carga até o ponteiro parar e fazer a leitura no mostrador do equipamento. A pré-carga de 10 kgf e carga de 100 kgf. A leitura dos valores

foi dada em HRB, e a leitura foi realizada na escala interna de cor vermelha. As medições foram realizadas em 10 pontos para a amostra nova e 10 pontos para a utilizada.

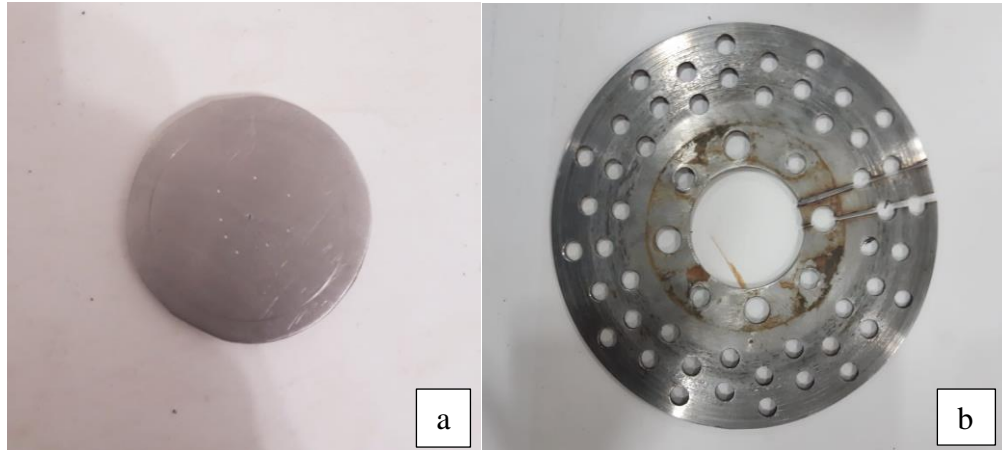


Figura 3.6 – Amostras para o ensaio de dureza Rockwell. (a) Representa a amostra nova e (b) representada o disco após a utilização. (Autor, 2019)

3.6 Ensaio Metalográfico

Para a análise microestrutural, foi necessário preparar uma amostra metalográfica representativa, sem arranhões de polimento, sem corrosão devido ao ataque químico e sem manchas. A amostra foi lixada, polida e atacada de forma a manter inclusões intactas e plana o suficiente para permitir a observação. Toda a preparação das amostras para a realização do ensaio foi realizada no laboratório de ensaios mecânicos e metalografia – LABEMM do NUTENGE (Núcleo Tecnológico de engenharia) na Universidade Estadual do Maranhão.

5.6.1 Seleção das Amostras

Para análise, foi solicitada uma amostra nova ao fornecedor, e retirada uma amostra do disco utilizado (figura 3.6). Quando a posição correta de corte do disco, foi utilizada uma área que fizesse parte do raio efetivo do disco, já que seria o ponto de maior temperatura por esta em maior contato com o disco. Para o corte, foi utilizada o cortador metalográfico Arcor 40 da

Arotec (figura 3.7). Foi utilizado fluido refrigerante para reduzir a possibilidade de transformações na superfície.



Figura 3.7 – Durômetro Rockwell RBS-M da marca Pantec (Autor, 2019)

5.6.2. Embutimento

O embutimento é aplicado em casos que o corpo de prova ou amostra possui pequenas dimensões e não permitem a manipulação durante o polimento e lixamento. O objetivo é facilitar o manuseio de amostras durante o preparo e observação da metalografia. A superfície deve estar em um só plano e ausente de arredondamento das bordas do copo de prova. Foi realizado o embutimento a quente sob pressão, utilizando uma prensa metalográfica modelo EM30D da Teclago (figura 3.8).



Figura 3.8 – Embutidora Metalográfica EM30D, Teclago (Autor, 2019)

A pressão foi controlada em 120 bar, e a temperatura de embutimento foi de aproximadamente 198°C. O embutimento foi realizado com baquelite preto, com 15 min de embutimento e 10 min de resfriamento. O resultado do embutimento se encontra na figura 3.9.

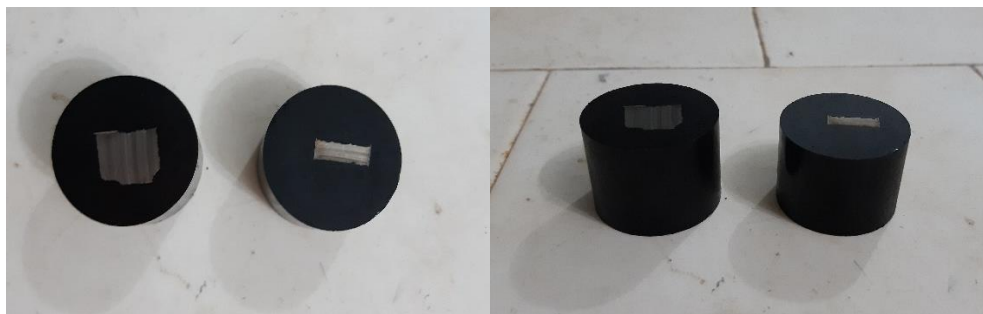


Figura 3.9 – Amostras embutidas (Autor, 2019)

5.6.3 Lixamento

O lixamento tem como principal objetivo retirar todas as danificações na amostra, tais como sulcos e riscos provenientes do desbaste, assim como a realização de uma superfície plana para a análise. Foram utilizadas as lixas de mesh #80, # 100, #220, #320, #400, #600 e #1200, com o lixamento realizado sempre na mesma direção, e utilizando água como fluido

refrigerante. A cada mudança de lixa, a superfície foi girada em 90° para a retirada dos riscos da lixa anterior. Para o lixamento, foi utilizado a lixadeira metalográfica manual LM 04, TTECLAGO (figura 3.10).

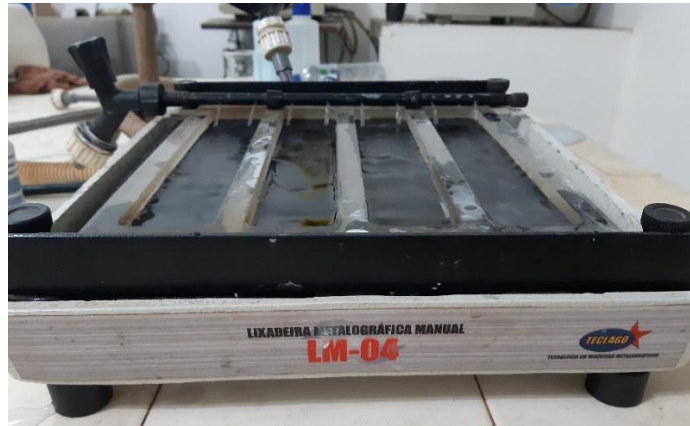


Figura 3.10 – Lixadeira Metalográfica Manuel (Autor, 2019)

5.6.4 Polimento

A finalidade do polimento é obter uma superfície plana, livre de riscos e com alta refletividade. Não é necessário que a amostra esteja totalmente ausente de riscos, mas para início, a amostra deve estar limpa. Para o polimento, foi utilizada alumina no estado líquido, com 1 μm , que resulta em melhor acabamento superficial no polimento. O pano de polimento também deve estar livre de impurezas, pois estas podem vir a arranhar a superfície da amostra. O álcool etílico para lubrificação. Para o processo de polimento das amostras foi utilizado a politriz Aropol 2V da Arotec.

5.6.4 Limpeza ultrassônica

O método de limpeza ultrassônica se dá através da cavitação, atuando desde as impurezas da superfície até áreas microscópicas e de difícil acesso. Esse fenômeno consiste no efeito de limpeza por meio de milhões de bolhas, geradas pelo contato entre a água, a solução de limpeza e a frequência do ultrassom, que implodem e criam um vácuo tirando as impurezas. (TAVARES, 2019). Após o polimento, as amostras foram submetidas a uma limpeza ultrassônica para que nenhuma impureza viesse a reagir com o ataque químico. Foi utilizado a lavadora ultrassônica UltraCleaner 800, Unique (figura 3.11), durante 5 minutos.



Figura 3.11 – Limpeza Ultrassônica (Autor, 2019)

5.6.5 Ataque químico

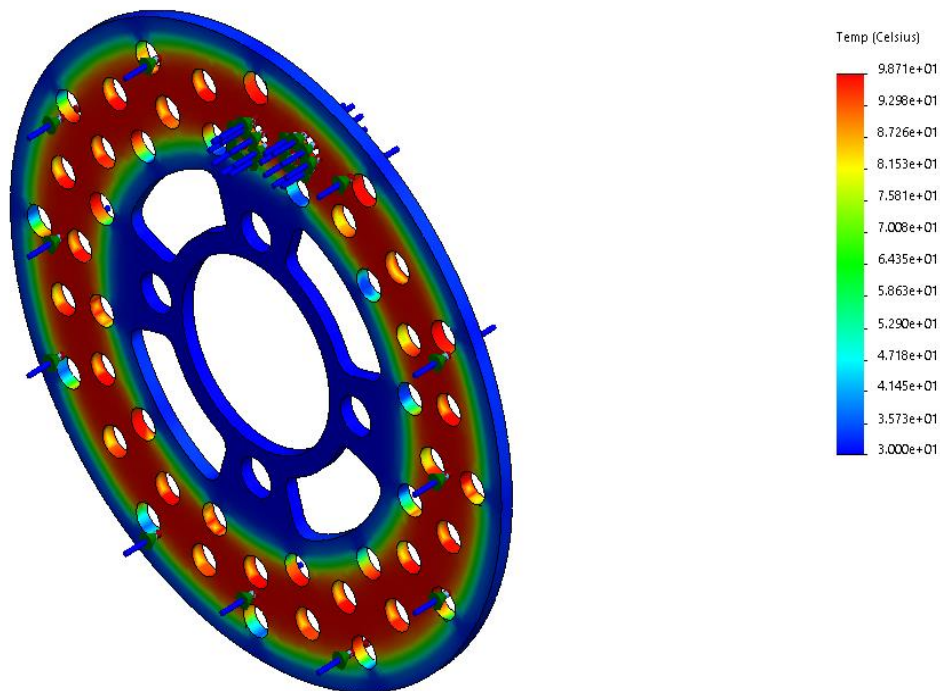
A superfície após o polimento correto reflete a luz de forma a não deixar distinguir os microconstituintes de sua estrutura. Dessa forma, para a revelação da microestrutura, é necessário atacar com a solução reativa apropriada.

Para aços inoxidáveis, o ataque químico pode ser realizado utilizando uma solução de água régia (ácido nítrico 65% e ácido clorídrico 37%, a uma proporção de 3 para 1). A amostra ficou em contato durante 5s com o reagente. O ataque químico foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos e metalografia – LABEMM do NUTENGE (Núcleo Tecnológico de engenharia) na Universidade Estadual do Maranhão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Simulação Térmica

A simulação térmica foi realizada utilizando o software SolidWorks buscando representar de o perfil de distribuição térmica e alongamento do disco de freio sobre a ação de frenagem. Recomenda-se que o disco de freio não deve ultrapassar 400°C, e temperaturas elevadas podem gerar o fenômeno de fading, e perda de eficiência de frenagem. A simulação foi realizada levando em consideração a área de aplicação da força, ou seja, a área de contato entre o disco e a pastilha. A figura 4.1 mostra o resultado da simulação térmica.



Produto educacional do SOLIDWORKS. Somente para fins de instrução.

Figura 4.1 – Simulação Térmica do disco de freio (Autor, 2019)

O resultado da simulação térmica, realizada mediante a aplicação da força calculada 5.1 mostra que a temperatura máxima atingida pelo disco, sendo esse raio o raio efetivo calculado no tópico 5.2, é de aproximadamente 98.71°C. Essa representa uma média satisfatória quando comparada a simulação com outros materiais. A simulação de deformação causada pela força de frenagem pode ser visualizada na figura 4.2.

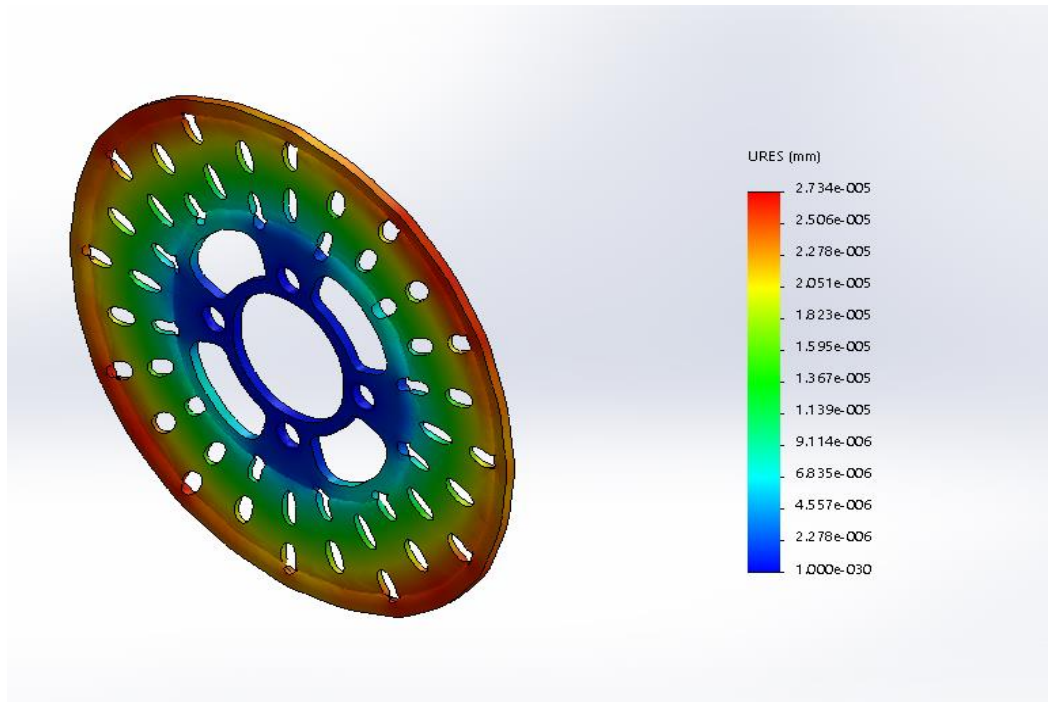


Figura 4.2 – Dilatação Térmica (Autor, 2019)

Para comprovar os resultados da simulação térmica foram realizadas medições no veículo, utilizando um termômetro a laser (Pirômetro). A temperatura atingida é um parâmetro essencial para análise da microestrutura, pois define a condição de operação do componente, sendo necessária a comprovação da simulação. Grandes variações entre a simulação e a medição podem indicar falha na montagem do sistema. A tabela 4.1 abaixo mostra os resultados das medições de temperatura realizadas no disco de freio.

Tabela 4.1 – Temperaturas medidas (Adaptado de Autor, 2019)

Amostras	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Média
1°	25	71	85,5
2°	26	82	85,5
3°	27	83	85,5
4°	27	90	85,5
5°	28	92	85,5
6°	28	95	85,5

Para analisar as variações entre a simulação e a temperatura real atingida pelo veículo após a frenagem, foi utilizado uma carta de controle. Carta de controle (Figura 4.3) é um tipo de gráfico utilizado para o acompanhamento de um processo e pode ser classificado como forma de métrica de uma atividade, limitada pela linha superior e uma linha inferior, além de uma linha média. Assim, pontos que estejam fora dos limites superior e inferior podem indicar problemas no processo ou possíveis variações. O objetivo foi verificar, por meio do gráfico, se o processo está sob controle, isto é, isento de causas especiais. O limite superior indica a temperatura máxima alcançada, o inferior a temperatura ambiente.

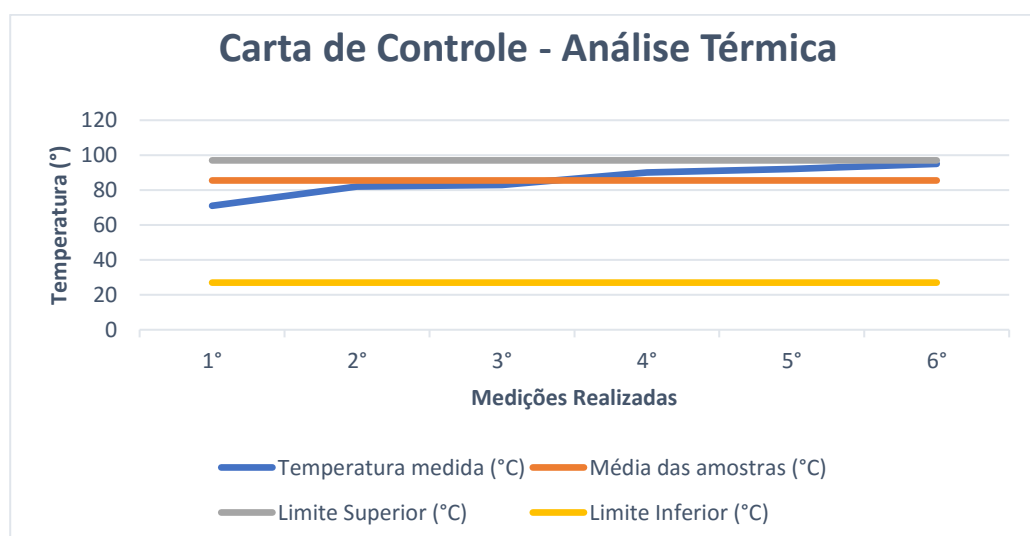


Figura 4.3 – Carta de Controle (Autor, 2019)

De acordo com o gráfico acima, a variação de temperatura real encontra-se dentro de um intervalo aceito pela metodologia. Dessa forma, a simulação pode sim ser um parâmetro de análise de temperatura.

4.2 Ensaio de dureza

A figura 4.4 mostra os resultados dos ensaios de dureza para a amostra nova e a amostra do disco utilizado. A dureza do disco com dois anos de uso apresenta um acréscimo quando em comparação ao novo. A dureza pode favorecer o aparecimento de trincas resultantes de fadiga térmica, porém, não há grande aumento dessa propriedade. A relação entre a temperatura máxima alcançada, que é relativamente baixa quando comparada com outros materiais, a baixa deformação resultante da ação de frenagem e o aumento de dureza indica que possivelmente, não haverá alteração microestrutural no disco e ausência de trincas, porém, a ação de frenagem também resulta em encruamento, e o aumento de dureza deverá ser representado em deformações na microestrutura do material

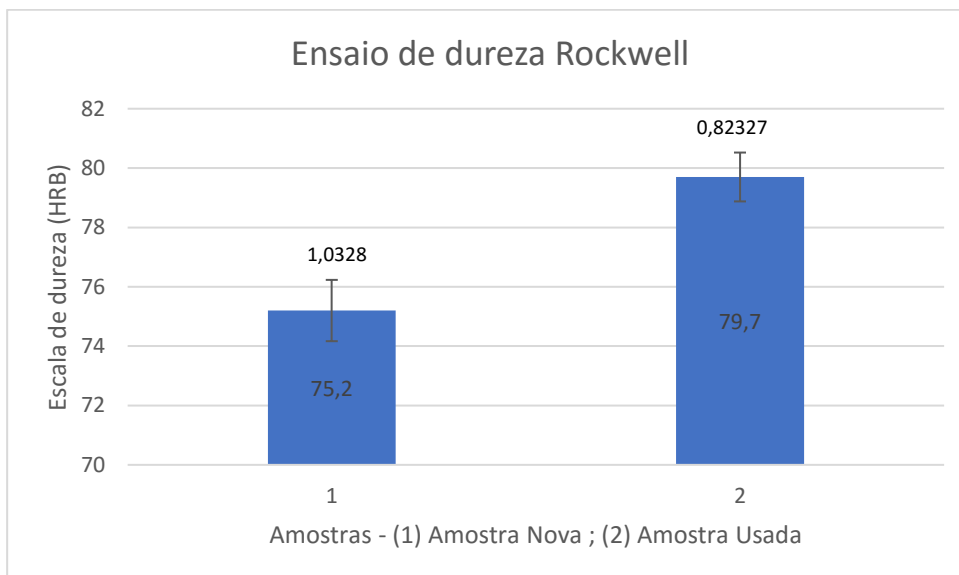


Figura 4.4 – Resultado do ensaio de dureza Rockwell (Autor, 2019)

4.3 Ensaio de metalográfico

O ensaio metalográfico foi realizado utilizando como reagente a água régia (Ácido nítrico e ácido clorídrico), com 5 segundos de imersão. A figura 4.5 mostra o resultado do ataque químico, onde fica visível a microestrutura da amostra nova, com grãos característicos austeníticos, com morfologias poligonais de tamanhos não uniformes, com ampliação de 500x e 1000x. A figura 4.6 é a representação da microestrutura da amostra usada, também em ampliação de 500x e 1000x.

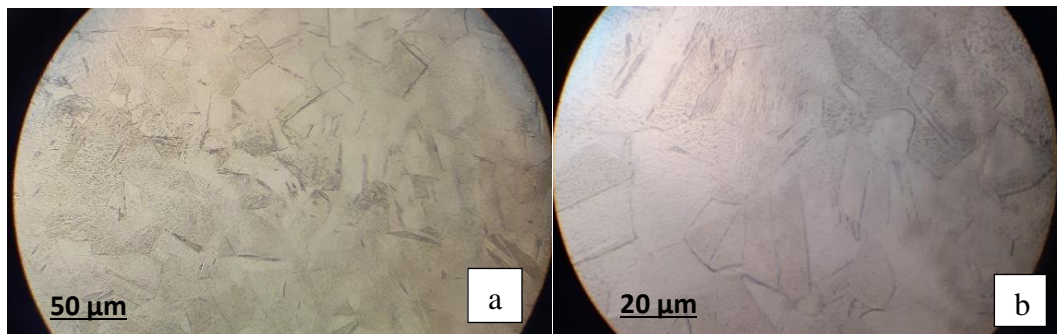


Figura 4.5 – Microestrutura do disco novo. (a) Ampliação em 500x e (b) ampliação em 1000x (Autor, 2019)

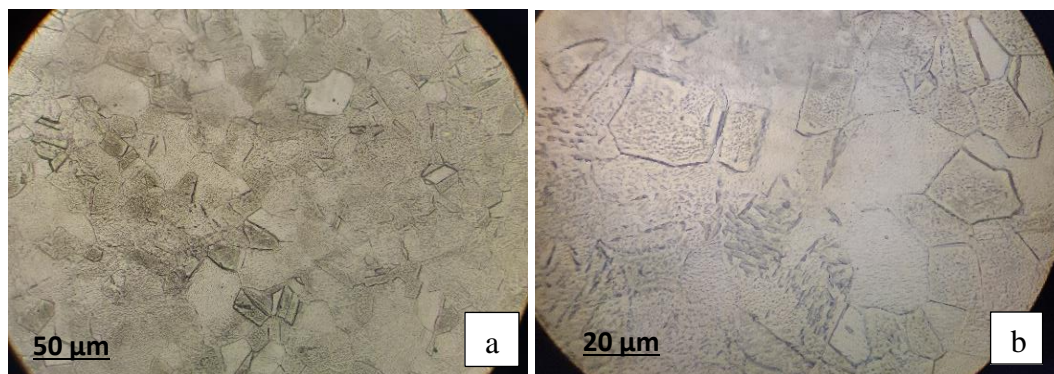


Figura 4.6 – Microestrutura do disco usado. (a) Ampliação em 500x e (b) ampliação em 1000x (Autor, 2019)

A amostra nova é caracterizada por graus austeníticos poligonais, com tamanhos de grãos não uniformes, e também presença de contornos de macla. Já a segunda amostra (figura 4.6) apresenta com mais definição os contornos de macla, porém, não há alteração nos tamanhos de grãos. Ficam visíveis zonas de escorregamento na amostra, deformação característica da ação de frenagem e deformação do material. Bandas de escorregamento e macla são defeitos cristalinos resultados da deformação plástica sofrida pelo disco em reação á força de frenagem.

A ação de frenagem também caracteriza o encruamento, o que explica o aumento de dureza do material. Durante a ação de frenagem, seguida de deformação plástica, as discordâncias movimentam-se e multiplicam-se, o material dúctil se torna mais duro e resistente, porém, mais suscetível á fadiga. Porém, quando investigada a existência de trincas superficiais resultantes da fadiga térmica, que tente a ser mais características em materiais de maior dureza, não se tem indícios.

A microestrutura do material não apresenta o fenômeno de sensitização, parâmetro em análise para aplicação desse material. Durante o processo de sensitização, sofrido pelo AISI 304 quando exposto continuamente a altas temperaturas, há migração do cromo da matriz para os contornos de grãos, formando carbonetos de cromo, comprometendo a resistência do material. A presença de carbonetos nos contornos se torna visível na análise metalográfica, e esse fenômeno inviabiliza a utilização desse material, que sofre uma perda característica de suas propriedades.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Os discos de freios devem ser caracterizados com propriedades de capacidade de amortecimento, resistência ao desgaste, ser capaz de resistir á fadiga térmica e dissipar toda a anergia térmica resultante. O desempenho do sistema de frenagem é uma associação de propriedades térmicas e mecânicas. Quando aplicado em um disco de freio, o aço inoxidável austenítico 304 apresenta resultados satisfatórios. Caracterizados pela tenacidade, ductilidade, resistência ao calor e resistência corrosão, quando combinadas, respondem a ação de frenagem de forma imediata sem sofrer grandes danos, e garantindo a vida útil do componente.

A simulação térmica e o ensaio de dureza foram usados como uma análise prévia para possíveis alterações microestruturais, porém, a análise térmica mostrou uma distribuição de energia térmica uniforme, com maior índice na área de contato entre o disco e a pastilha. A temperatura dentro da média diminui chances de deformação e trincas superficiais, além de reduzir a possibilidade do fading. O ensaio de dureza também apresenta variações mínimas.

Com esses dois anteriores parâmetros analisados, esperava-se que não houvesse grandes alterações microestruturais, comprovado através do ensaio de metalografia. Grãos austeníticos não uniformes e contornos de macla foram observados e bandas de escorregamento, porém, não se tem indicio de trincas e sensitização nessa amostra.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

O ensaio metalográfico utilizando água régia permite a visualização da microestrutura de aços inoxidáveis, porém, uma outra maneira seria utilizar o ataque eletroquímico. Também fica como sugestão o experimento com outro aço inoxidável ou mesmo uma comparação entre a utilização do aço inoxidável e o ferro fundido cinzento, usualmente utilizado em discos de freio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM METALS HANDBOOK, vol. 1. **Properties and Selection Irons, Steel, and HighPerformance Alloy**, 2005

BAUER, H ED. **Conventional and electronic braking systems**. 3ed plochingen: Robert bosch gmbH.2015

CARBÓ, HECTOR. **Aços inoxidáveis: Aplicações e especificações**. Apostila Técnica – Arcelor Mittal. 2010.

CARVALHO, Gustavo- **Projeto e Dimensionamento de um Sistema de Freios Aplicado a um Veículo Fórmula Sae**. 2014. Monografia (Bacharel em engenharia mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

DIULGHEROGLO, PEDRO. **Apostila de Freio**. Curso de Sistema de Freios. 2008.

FERROVIA, Planeta – **Sistema de freio a ar direto**. Disponível em <<http://planetaferrovia.blogspot.com/2013/10/sistema-de-freio-ar-direto-george.html>>. Acesso em 15 de outubro de 2019.

FONSECA, Marcelo Alves. **Recristalização de um Aço Inoxidável Austenítico / Uma Abordagem Estatística**. Artigo Científico - Dept. Engenharia Mecânica/UnilesteMG – 2017

FREIOS BREQUE. **Cilindro Mestre**. Disponível em: <https://freiosbreque.com.br/CilindroMestre>. Acesso dia 31 de janeiro de 2018, às 21:14h.

GARDINALLI, G.J **Comparação do desempenho de frenagem simulada x experimental de um veículo de passeio com freios hidráulicos e ABS**. 2005. Trabalho de conclusão (mestrado profissionalizante em engenharia automotiva) – escola politécnica, universidade de são Paulo, são Paulo, 2005.

INFORMET. **Aços e Ligas (Aços inoxidáveis, austeníticos, ferríticos e duplex.)** Disponível em < <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=204> > Acesso em 14 de outubro de 2019.

KAWAGUCHI, Hiroaki – **Comparação Da Análise De Conforto De Frenagem Subjetiva x Objetiva De Um Veículo De Passeio**. 2005.Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharel em Engenharia Automotiva). Escola politécnica da universidade de são Paulo. São Paulo.

LIMPERT, RUDOLF - **Brake Design and Safety** – EUA: SAE Internacional, 1999.

LIPPOLD, C. J.; DAMIAN, K. J. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. Canada. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. 2005.

LOBO, Marcos – Artigo Científico. **A presença da umidade no sistema de freios**. Portal Lubes. 2018. Disponível em < <https://portallubes.com.br/2019/09/fluido-de-freio>>. Acesso dia 13 de novembro de 2019

MAGALHÃES, Lana. **Aço Inoxidável 304**. 2019. Dissertação (Doutorado). doutoranda em biodiversidade e biotecnologia.

MARKOVICOVA, PALCEK; ZATKALIKOVA, L. V.: **Materials for biomedical engineering**. EDIS, University of Zilina, Zilina, 2015, ISBN 978-80-554-0988-7. 2009

MARTINS, R. **Controle Estatístico de Processo – CEP**. Disponível em: <https://blogdaqualidade.com.br/controle-estatistico-de-processo-cep/>. Acesso dia 1 de julho de 2019

MESSIAS, Nestor – **Dimensionamento de um freio para baja** – 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia mecânica) Faculdade de Tecnologia Fatec Santo André. São Paulo.

NAKATA - **Manual NAKATA para Sistemas de Freios** – 2015

NILSSON, J. O. **Super duplex stainless steels**. *Materials Science and Technology*, v. 8, p.685-700, Agosto 1992.

QUATRO RODAS. **Componentes do sistema de freios**. Disponível em: <https://www.google.com.br/quatroRodas/SistemadeFreios-Componentes>. Acesso dia 27 de janeiro de 2018, às 19:30h.

RAMOS, André. 2015. **Funcionamento do sistema de freios a disco**. Disponível em < <https://www.mtbbrasil.com.br/2015/08/23/conheca-o-funcionamento-do-sistema-hidraulico-dos-freios-a-disco/>> Acesso em 15 de outubro de 2019.

RODAS, Quatro. **Componentes do Sistema de Freios**. SP, 2014 <<https://www.google.com.br/quatroRodas/SistemadeFreios-Componentes>> Acesso dia 27 de março de 2018, às 14:49h.

RODAS, Quatro – **Discos de freios ventilados, perfurados e sólidos**. Disponível em <<https://quatorodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-os-freios-ventilados-perfurados-e-solidos/>>. Acesso em 15 de outubro de 2019.

TAVARES, William. **Análise comparativa das características mecânicas e estruturais do aço AISI 304 por meio dos processos de soldagem manual AGTW E SMAW**. 2019. Trabalho de conclusão de curso. (Bacharel em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual do Maranhão.