

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SEM

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Identificação das falhas utilizando FMEA no sistema de freios de
carros de competição *on-road* – Fórmula®-SAE

Aluna: Fabíola Bailão Gradela
Orientadora: Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

São Carlos – SP
2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS – EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – SEM

Identificação das falhas utilizando FMEA no sistema de freios de
carros de competição *on-road* – Fórmula®-SAE

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica, da Escola de
Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos necessários para conclusão
do curso de Graduação em Engenharia
Mecânica.

Área de concentração: Engenharia
Mecânica.

Aluna: Fabíola Bailão Gradela
Orientadora: Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira

São Carlos – SP
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B732i Bailão Gradela, Fabiola
Identificação das falhas utilizando FMEA no sistema
de freios de carros de competição on-road -
Fórmula®-SAE / Fabiola Bailão Gradela; orientadora
Zilda de Castro Silveira. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2013.

1. freios automotivos. 2. FMEA. 3. Fórmula® SAE. 4.
falhas. 5. qualidade. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

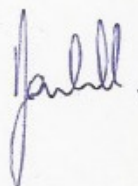
Candidata: **Fabíola Bailão Gradela**

Título: **Identificação das falhas utilizando FMEA no sistema de freios de carros de competição on-road - Fórmula®-SAE**

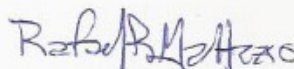
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecânica/Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jonas de Carvalho
Instituição: SEM- EESC - USP
Nota atribuída: noze e meio (9,5)



Eng. Rafael Rocha Mattazio
Instituição: SEM - EESC - USP
Nota atribuída: noze e meio (9,5)



Profa. Dra. Zilda de Castro Silveira (Orientadora)
Instituição: SEM - EESC - USP
Nota atribuída: noze e meio (9,5)



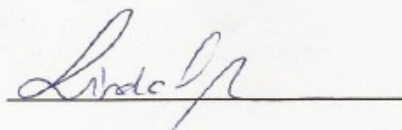
Média: noze e meio (9,5)

Resultado: Aprovada

Data: 15/07/2013

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC:

SIM NÃO Visto do orientador



AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por terem criado os alicerces.

Ao meu namorado, por compartilhar os sonhos de um futuro melhor.

Aos meus amigos, antigos e novos, pela ampliação dos meus horizontes.

E à Equipe EESC USP de Formula SAE, que deu outro sentido à graduação em engenharia mecânica.

Fizeram-me muitas críticas, tanto pela guerra quanto pela paz; mas tudo veio em sua hora, tudo vem na hora certa pra quem sabe esperar.

Leon Tolstoi

RESUMO

Gradela, F.B. (2013) **Identificação das falhas utilizando FMEA no sistema de freios de carros de competição on-road – Fórmula®-SAE**. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 91p.

Neste trabalho é feito um levantamento das falhas potenciais e catastróficas, do ponto de vista de projeto mecânico, fabricação, montagem e manutenção no sistema de frenagem para veículos tipo Fórmula® SAE da EESC-USP. O objetivo deste trabalho é apresentar uma teoria geral de frenagem, componentes de sistemas de freios de maneira simplificada e como foi desenvolvido seu projeto pela Equipe. A partir dessa apresentação, identificar e apresentar um estudo, baseado em FMEA, do sistema de freios dos veículos tipo Fórmula SAE desenvolvidos pelas equipes da EESC-USP, entre os anos de 2004 e 2010. A constante evolução das tecnologias, principalmente nas indústrias automotiva e aeroespacial, promove o uso cada vez mais intensivo de modelos numéricos e estatísticos para prever o comportamento de todo o conjunto que integra o projeto de engenharia, bem como determinar os itens críticos de projeto e assim estimar a vida útil dos mesmos e do projeto, podendo ser útil na estimativa dos tempos de reparo e sobrevida. Este estudo é realizado com o auxílio da teoria de confiabilidade de sistemas, dividida em duas etapas básicas: a determinação dos tipos de falhas e a aplicação de modelos estatísticos e de probabilidade para a determinação da qualidade do projeto e de seus elementos ao longo do tempo.

Palavras-chave: freios automotivos; FMEA; Fórmula® SAE; falhas; qualidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Princípios físicos, arranjos básicos e métodos de acionamento para transferência de energia de um componente para outro.	15
Figura 2 – Freio de atrito a tambor.	16
Figura 3 – Freio eletromagnético monodisco.	17
Figura 4 – Freio a tambor de sapatas internas.	19
Figura 5 – Freio a disco.	19
Figura 6 – Freio cônico.	20
Figura 7 – Disco de freio submetido à situação extrema de frenagem.	21
Figura 8 – Servofreio.	24
Figura 9 – Componentes principais do sistema de freio de um veículo.	25
Figura 10 – Tipos de freio a disco: (a) tipo fixo; (b) tipo flutuante.	26
Figura 11 – Mecanismo de auto-regulagem dos freios a disco.	27
Figura 12 – Freio a disco tipo fixo.	28
Figura 13 – Freio a disco tipo flutuante.	28
Figura 14 – Desgaste adesivo.	32
Figura 15 – Desgaste abrasivo.	33
Figura 16 – Desgaste corrosivo.	33
Figura 17 – O ciclo PDCA de planejamento da qualidade.	38
Figura 18 – Ações recomendadas para minimizar as falhas.	43
Figura 19 – Dados e dimensões aproximadas, projeto E8.	46
Figura 20 – Circuitos hidráulicos.	47
Figura 21 – Força de alavanca.	48
Figura 22 – Simulação em elementos finitos do pedal, projeto E6.	49
Figura 23 – Ajuste de <i>Brake Bias Bar</i> (b), pedal em repouso.	50
Figura 24 – Ajuste de <i>Brake Bias Bar</i> (b), pedal acionado.	51
Figura 25 – Cilindro mestre com reservatório remoto, projeto E1.	52
Figura 26 – Gaxetas “Tipo U”.	53
Figura 27 – Cilindro mestre com reservatório integrado, projeto E4.	54
Figura 28 – Cilindro mestre com reservatório integrado, projeto E7.	55
Figura 29 – Pinça de freio fixa, quatro êmbolos, manufaturada pela Equipe. Projeto E1.	57

Figura 30 – Pinça de freio, projeto E1. Peso: 2470g, cada.	57
Figura 31 – CAD da pinça de freio, projeto E3. Peso: 930g, cada.	58
Figura 32 – Características básicas da pinça flutuante, projeto E6. Peso: 635g, cada.....	59
Figura 33 – O princípio de Pascal para fluidos incompressíveis.	60
Figura 34 – Sangria do sistema de freio.....	61
Figura 35 – Curva de coeficiente de atrito x temperatura para vários compostos de pastilha.....	62
Figura 36 – Montagem do disco dianteiro e pinça na suspensão, projeto E1.....	63
Figura 37 – Montagem do disco de freio dianteiro e pinça na suspensão, projeto E7.	63
Figura 38 – Simulação em elementos finitos do disco de freio, projeto E5.	64
Figura 39 – Planilha de dimensionamento e dinâmica da frenagem, projeto E6.....	66
Figura 40 – Válvula proporcional.....	67
Figura 41 – Uma das novas planilhas para dimensionamento do sistema, variável desejada: diâmetro dos cilindros mestres, projeto E8.....	68
Figura 42 – Divisão dos elementos básicos do sistema de freios.	70
Figura 43 – Árvore de funções para os elementos básicos.....	71
Figura 44 – Análise FMEA completa do sistema de freios da Equipe EESC USP.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades importantes dos materiais de atrito operando a seco.....	31
Tabela 2 – Valores representativos do coeficiente de atrito para materiais de fricção operando em óleo.	31
Tabela 3 – Grupos considerados para o cálculo do coeficiente de prioridade. (a) Severidade; (b) Ocorrência; (c) Detecção.....	42
Tabela 4 – Modos de falha dos componentes do sistema de freios.....	73
Tabela 5 – Critérios de severidade (S) sob perspectivas do piloto e das regras da competição.....	74
Tabela 6 – Efeitos das falha e seus índices de severidade (S).....	75
Tabela 7 – Critérios de ocorrência (O)	76
Tabela 8 – Causas de falha e seus índices de ocorrência (O).....	77
Tabela 9 – Critérios de detecção (D).....	78
Tabela 10 – Controle das falhas e seus índices de detecção (D)	79
Tabela 11 – Índice de prioridade de risco (R) para os modos de falha do sistema de freios.	80
Tabela 12 – Propostas de soluções para prevenir os modos de falha.....	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivo	13
2. EMBASAMENTO TEÓRICO	14
2.1. Freios: definição e tipos.....	14
2.1.1. Freios por atrito.....	18
2.2. Considerações sobre freios automotivos.....	22
2.2.1. O torque de frenagem em veículos.....	23
2.2.2. Freios a disco.....	25
2.2.3. Materiais utilizados.....	29
2.2.4. Modos de falha entre superfície de atrito e a metálica.....	31
2.3. Qualidade e aspectos da Confiabilidade	34
2.3.1. Planejamento da qualidade.....	35
2.3.2. Análise do Modo e do Efeito da Falha/ <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (FMEA)	39
3. ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DOS COMPONENTES	45
3.1. O Fórmula® SAE.....	45
3.2. O sistema de freios da Equipe EESC USP.....	46
3.2.1. Pedal.....	48
3.2.2. <i>Brake Bias Bar</i>	49
3.2.3. Cilindro mestre.....	51
3.2.4. Pistão	52
3.2.5. Gaxeta	53
3.2.6. Reservatório de fluido	53
3.2.7. Fluido de freio	55
3.2.8. Mangueiras hidráulicas	56

3.2.9. Caliper.....	56
3.2.10. Êmbolo.....	59
3.2.11. Parafuso sangrador.....	60
3.2.12. Pastilha.....	61
3.2.13. Disco.....	62
3.3. Dimensionamento: cilindro mestre, êmbolo e disco.....	64
4. ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS NO PROJETO DO FÓRMULA® SAE	69
4.1. Funções características dos componentes do sistema de freios.....	70
4.2. Modos de falha dos componentes do sistema de freios.....	71
4.3. Efeitos das falhas e análise de severidade (S).....	73
4.4. Causa da falha e análise de ocorrência (O)	76
4.5. Controle dos modos de falha e detecção (D)	78
4.6. Índice de prioridade de risco (R).....	79
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
5.1. Resultados.....	81
5.2. Conclusões.....	85
5.3. Recomendações para trabalhos futuros.....	85
REFERÊNCIAS.....	86
ANEXOS.....	89
ANEXO A – As regras da competição para o sistema de freios	89

1. INTRODUÇÃO

A indústria atual apresenta uma configuração peculiar entre características de competitividade e qualidade, na qual as reduções de custos são constantemente buscadas. Essa relação deve satisfazer um cliente ou usuário, em constante alteração de perfil resultante da intensa quantidade de informações de mercado (SILVESTRE, 2012).

A identificação e a localização de falhas é uma preocupação antiga, desde os artesãos, que eram responsáveis por toda a “cadeia produtiva” de seus produtos, até os dias atuais, nos quais, uma infinidade de produtos e equipamentos apresenta alta complexidade, em função das novas tecnologias aplicadas. Essa complexidade pode ser exemplificada, pelos produtos gerados pelas indústrias eletro-micro-eletrônicos e eletro-mecânicos, usinas de geração de energia, indústria aeroespacial e a própria indústria metal-mecânica.

Os requisitos de confiabilidade tem se tornado cada vez mais necessários em produtos industriais e bens de consumo. Na década de 50, a engenharia de confiabilidade se aplicava quase que, exclusivamente a projetos que envolviam alto risco à vida humana, como usinas nucleares, aviões, sistemas de transmissão de energia. Porém, a competitividade crescente do mercado nos últimos 15 anos tem caracterizado um usuário mais consciente da escolha de seus “produtos”. A falha de um “produto”, mesmo que prontamente reparada pelo serviço de assistência técnica e amparada por termos de garantia de qualidade, causa, no mínimo, uma insatisfação do consumidor ao privá-lo do uso do produto por determinado tempo.

Um estudo mais amplo da engenharia de confiabilidade se inicia com a identificação das possíveis falhas, que um sistema e seus itens possam apresentar. Uma das técnicas consagradas e difundidas para esse estudo é o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). As primeiras aplicações do FMEA ocorreram na década de 50, com a finalidade da análise crítica de projetos de produto e de processo. O objetivo era a identificação de todos os modos de falha em potencial dentro de um projeto, todas as probabilidades de falhas catastróficas e críticas, de forma a

eliminá-las ou atenuá-las durante a fase de desenvolvimento do produto (TEIXEIRA, 2004).

Apesar de ter sido desenvolvida com um enfoque no projeto de novos produtos e processos, a metodologia FMEA, pela sua grande utilidade, passou a ser aplicada de diversas maneiras. Assim, ela atualmente é utilizada para reduzir as falhas de produtos e processos existentes e para diminuir a probabilidade de falha em processos administrativos. Tem sido empregada também em aplicações específicas tais como análises de fontes de risco em engenharia de segurança e na indústria de alimentos.

Pode-se aplicar a análise FMEA nas seguintes situações:

- Para diminuir a probabilidade da ocorrência de falhas em projetos de novos produtos ou processos;
- Para diminuir a probabilidade de falhas potenciais (ou seja, que ainda não tenham ocorrido) em produtos/processos já em operação;
- Para aumentar a confiabilidade de produtos ou processos já em operação por meio da análise das falhas que já ocorreram;
- Para diminuir os riscos de erros e aumentar a qualidade em procedimentos administrativos.

A técnica FMEA é importante porque pode proporcionar para a empresa:

- Uma forma sistemática de se catalogar informações sobre as falhas dos produtos/processos;
- Melhor conhecimento dos problemas nos produtos/processos;
- Ações de melhoria no projeto do produto/processo, baseado em dados e devidamente monitoradas (melhoria contínua);
- Diminuição de custos por meio da prevenção de ocorrência de falhas;

- Benefícios de incorporar dentro da organização a atitude de prevenção de falhas, a atitude de cooperação e trabalho em equipe e a preocupação com a satisfação dos clientes.

Com o objetivo de complementar a formação dos alunos de engenharia de graduação e pós-graduação, a *Society of Automotive Engineers* (SAE) lançou nos Estados Unidos, na década de 1980, o Projeto Fórmula SAE. Tal projeto constitui uma oportunidade para que os futuros engenheiros possam participar de todo o ciclo de projeto: concepção, dimensionamento e otimização, fabricação, montagem e avaliação de desempenho de um veículo automotivo. Esse empenho é avaliado em competições internacionais promovidas pela SAE nas quais os protótipos são avaliados por profissionais da indústria automotiva, quanto a projeto, custos relativos à manufatura, proposta de investimento na equipe, segurança e aderência às regras da competição, desempenho e resistência.

Do ponto de vista de projeto mecânico, o projeto de um sistema de freios requer o equacionamento estático e a avaliação térmica do par superfície de atrito-disco. Considerando ainda, parâmetros operacionais como pressão de contato, taxa de desgaste e estimativa da energia dissipada pode-se estimar a vida útil da pastilha/lona e disco/tambor de freios automotivos e industriais. Porém, esses resultados também são fortemente dependentes de fatores operacionais como: tipo de pista, dirigibilidade do motorista/piloto e condições ambientais.

Neste contexto, a engenharia experimental com seu conjunto de técnicas de rastreabilidade e métodos estatísticos auxiliam na melhoria do projeto e processo, após avaliação do desempenho, seja em condição operacional ou em ensaios de confiabilidade e durabilidade.

1.1. Objetivo

Neste trabalho, é feito um relato dos projetos e posterior estudo das falhas ocorridas no sistema de freios do protótipo, ao longo dos sete primeiros anos das diferentes Equipes EESC-USP, totalizando 10 projetos: E1, E2, E2-M, E3, E3-M, E4, E5, E6, E7, E8. Espera-se que esse material possa se tornar literatura básica de apoio para as futuras Equipes de projeto de sistemas de freio, contribuindo como primeiro contato destes estudantes com as teorias de frenagem e principais componentes desse sistema, bem como fonte de dados sobre os primeiros protótipos de Fórmula® SAE projetados e construídos na Escola de Engenharia de São Carlos.

O objetivo principal é identificar os principais modos de falha no sistema de freios de veículos tipo Fórmula® SAE e analisar a causa e o efeito destas falhas sobre o desempenho do freio. Através desse desmembramento, propor algumas soluções para minimizar e/ou evitar possíveis falhas potenciais, que podem evoluir para uma condição catastrófica.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

O sistema de freio é parte fundamental de um veículo, pois permite seu uso adequado e seguro em condições de tráfego nas ruas e estradas. Devido a sua importância na segurança do veículo, requisitos legais que regulamentam o seu funcionamento e o seu desempenho são estabelecidos por vários órgãos reguladores do tráfego de automóveis em diversos países (KAWAGUCHI, 2005).

Freios são essencialmente dispositivos de dissipação e, portanto, geram uma grande quantidade de calor durante sua operação. Assim, eles devem ser projetados para absorver e transferir esse calor sem causar danos a si mesmos ou a seu entorno. Frequentemente, é a habilidade de transferir calor de um dispositivo que limita sua capacidade, e não sua habilidade em transmitir torque mecânico (NORTON, 2004).

2.1. Freios: definição e tipos

Quando se deseja conceituar um freio, é inevitável citar o sistema de embreagem. Segundo Norton (2004) freios e embreagens são, conceitualmente, o mesmo dispositivo. Cada um deles provê uma conexão de atrito, magnética, hidráulica, ou mecânica entre dois elementos. Se os dois componentes são rotativos, possuem velocidades angulares distintas, e o objetivo é acoplá-los de modo que atinjam a mesma velocidade angular, diferente de zero, esse dispositivo é uma embreagem. Se um dos elementos possui velocidade angular, enquanto o outro é fixo com velocidade zero, e o objetivo é acoplá-los de modo que alcancem o repouso, esse dispositivo é um freio.

Freios podem ser classificados de várias maneiras, por meio da forma de atuação, pela maneira como transferem energia entre elementos e pelo caráter de acoplamento (NORTON, 2004), conforme apresentado abaixo na Figura 1.

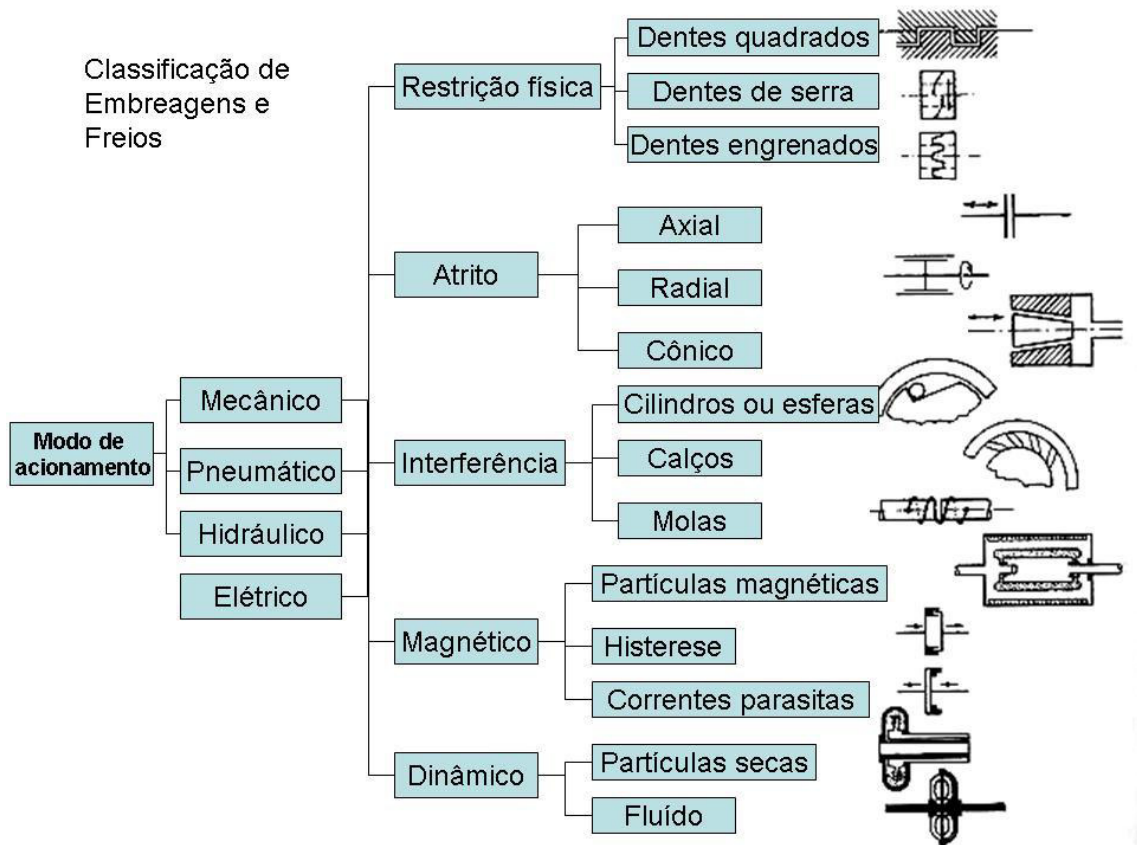


Figura 1 – Princípios físicos, arranjos básicos e métodos de acionamento para transferência de energia de um componente para outro.¹

Limpert (1999) sugere classificações para os freios segundo a forma de se transferir a energia entre atuador e pastilha/sapata:

1. Freios mecânicos: envolvem projetos nos quais apenas dispositivos mecânicos, como por exemplo, barras, cabos ou cames são utilizados para transmitir energia para os freios das rodas. Em muitas aplicações, freios de estacionamento são freios mecânicos.
2. Freios hidráulicos: utiliza um fluido como meio de transmissão de energia para os freios das rodas.

¹ Fonte: NORTON, 2004.

3. Freios a ar: utilizam ar para transmitir energia para os freios. Quando utilizado em freios automotivos, o ar é pressurizado. Freios a vácuo são utilizados em trens como meio de transmissão de energia para os freios das rodas.
4. Freios elétricos: utilizam corrente elétrica como meio de transmissão de energia para os freios das rodas.
5. Freios mistos: utilizam dois ou mais dos meios pelos quais energia pode ser transmitida para os freios.

Porém, se observarmos a forma de atuação, encontraremos três tipos principais: freios de atrito, freios eletromagnéticos e freios de bombeamento. Os freios de atrito utilizam uma condição de contato entre superfícies como meio de conversão da energia cinética em calor. Por ser o método de frenagem mais utilizado, sendo encontrado em veículos comerciais leves e pesados, máquinas de elevação como pontes rolantes, guindastes e elevadores, e equipamentos leves como motosserras e máquinas de lavar roupa, será descrito com mais detalhes nas seções seguintes. A Figura 2 apresenta um banco de testes para um freio de atrito a tambor.

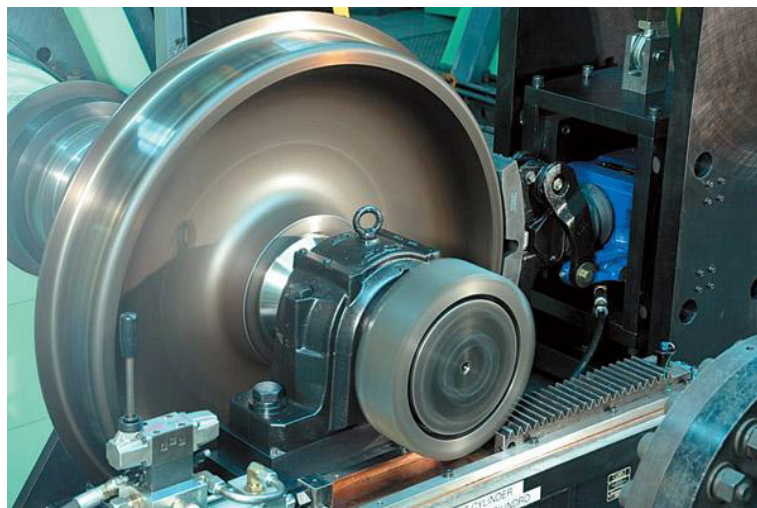


Figura 2 – Freio de atrito a tambor.²

² Fonte: <http://www.fras-le.com.br> (Acesso em Junho de 2013).

Os freios regenerativos ou eletromagnéticos (Figura 3) são aqueles que convertem a energia cinética em energia elétrica, que pode ser armazenada para uso posterior ou dissipada na forma de calor por meio de resistências elétricas. Esses freios operam da mesma forma que um gerador elétrico, segundo o princípio da indução eletromagnética. Sucintamente, a força resistiva do campo magnético induzido é responsável por inibir o movimento desejado. Sua utilização tem crescido com o advento dos carros híbridos, os quais aproveitam a energia da frenagem, que seria dissipada em forma de calor, para alimentar os motores elétricos que auxiliam o de combustão interna na propulsão do veículo. São, ainda, utilizados em trens de alta velocidade, metrô e em alguns ônibus urbanos.



Figura 3 – Freio eletromagnético monodisco.³

Há, ainda, métodos que convertem a energia do movimento em energia potencial, armazenada sob a forma de ar pressurizado, óleo pressurizado, ou volantes rotativos. Também conhecidos como freios de bombeamento, são utilizados em casos quando se tem um motor à combustão interna e a injeção de combustível é interrompida. Assim, o motor passa a se comportar como um compressor, e as perdas internas de bombeamento causam o efeito de frenagem no veículo ou na máquina.

³ Fonte: <http://www.tecnopower-mg.com.br/?products=freio-eletromagnetico-monodisco> (Acesso em Junho de 2013).

2.1.1. Freios por atrito

Juvinall e Marshek (1991) exemplificam que a maioria dos componentes de máquinas opera por meio de superfícies deslizantes, como engrenagens, rolamentos e *comes*. Nesses dispositivos, que tem o objetivo de transmitir o movimento, os esforços da engenharia se concentram no intuito de diminuir o atrito entre as superfícies, a fim de reduzir ao máximo as perdas de energia por atrito. Em contrapartida, os freios por atrito são componentes que dependem desta perda de energia por meio de superfícies de atrito, para desempenharem sua função. Nesse caso, o projeto desses componentes visa maximizar o coeficiente de atrito, ao mesmo tempo em que se deseja o menor desgaste possível.

Em termos de função de projeto, os freios de atrito são dispositivos que operam de modo que há um componente fixo em uma estrutura, portanto possui velocidade angular nula, e há outro componente rotativo. Quando o sistema de freio é acionado, duas ou mais superfícies são pressionadas entre si por meio de uma força normal, gerando uma força de atrito que, por sua vez, gera um torque de arrasto capaz de reduzir gradualmente a velocidade angular até que esta se torne nula. Os freios atuantes por superfícies de atrito dividem-se, principalmente em três tipos: freios a disco, freios a tambor e freios cônicos.

Os freios a tambor são aqueles que forçam o material de atrito contra uma superfície cilíndrica, sejam internamente, externamente ou em ambas as faces, conforme ilustra a Figura 4. O elemento de atrito é denominado lona e está fixado através de rebites, parafusos ou união adesiva à sapata de freio, a qual corresponde ao componente estrutural do mesmo. A força de frenagem, oriunda do sistema hidráulico – em se tratando de veículos de passeio populares – é aplicada na sapata, a qual é responsável por forçar o elemento de atrito contra o tambor, gerando o torque de frenagem. O tambor é o componente cilíndrico que fica acoplado à roda, portanto tem a mesma velocidade angular da mesma, a qual se deseja parar.

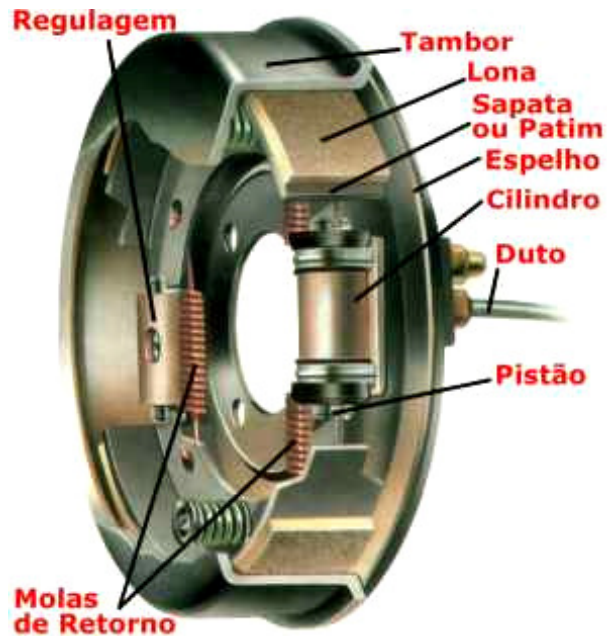


Figura 4 – Freio a tambor de sapatas internas.⁴

Existem casos em que as superfícies de atrito são planas e perpendiculares ao eixo de rotação, com a força normal na direção axial. Esta situação é mais aplicada nos freios a disco, conforme mostra a Figura 5, e será explicada com mais detalhes nas próximas seções.



Figura 5 – Freio a disco.⁵

⁴ Fonte: <http://www.jalopnik.com.br> (Acesso em Junho de 2013).

⁵ Fonte: Manual de treinamento TRW (2011)

Há, ainda, a situação em que a força normal é a soma vetorial de uma força na direção radial com uma força na direção axial. São os freios cônicos ilustrado na Figura 6, com aplicações em talhas elétricas de máquinas de elevação e em rodas de pontes rolantes.

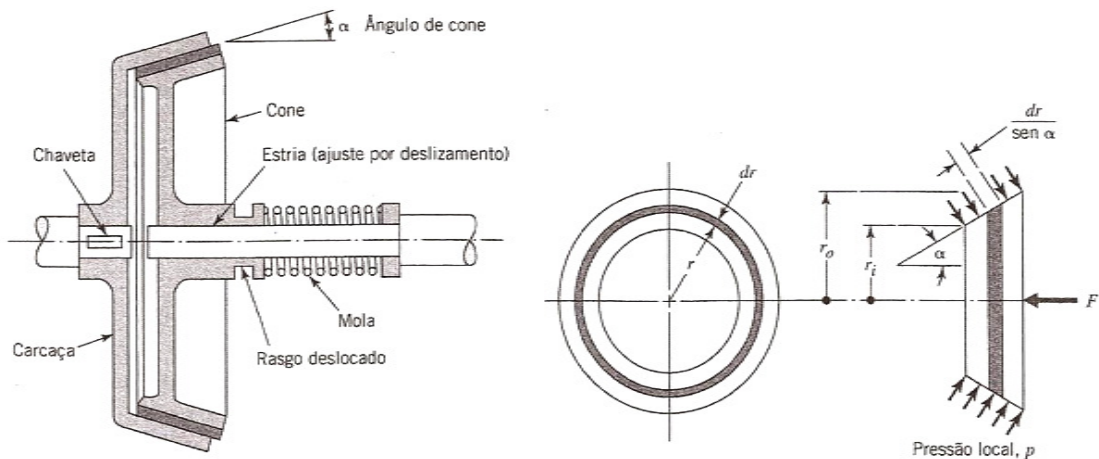


Figura 6 – Freio cônico.⁶

Como a principal função de um freio por atrito é a transformação da energia cinética ou potencial em calor, o sistema deve ser projetado para resistir a temperaturas muito altas. Nos freios utilizados para serviços contínuos, o projeto deve permitir altas taxas de trocas térmicas com o ar atmosférico circundante. Por outro lado, em freios operados de forma intermitente, a capacidade térmica de seus componentes deve permitir que a maioria do calor seja armazenado e, então, dissipado por um longo período de tempo.

Juvinall e Marshek (1991) afirmam que, de uma forma geral, um sistema de freios completo deve ser projetado para evitar tensões térmicas não desejáveis – expansões e contrações não uniformes e não controladas dos materiais ou até mudança de fase dos mesmos – capazes de distorcer os elementos de atrito, pinças ou sapatas. A Figura 7 apresenta um teste operacional de um freio automotivo a disco.

⁶ Fonte: JUVINALL; MARSHEK, 2006.



Figura 7 – Disco de freio submetido à situação extrema de frenagem.⁷

A equação básica da transferência de calor (Lei do Resfriamento de Newton) modificada para aplicações em freios por atrito, de acordo com Juvinal e Marshek (1991) é dada pela equação (2.1).

$$H = C \times A \times (T_s - T_a) \quad (2.1)$$

Onde, no Sistema Internacional de Unidades:

H = taxa de dissipação de calor [W];

C = coeficiente global de transferência de calor [W/m².K];

A = área da superfície exposta à dissipação do calor [m²];

T_s = temperatura média da superfície de dissipação de calor [K];

T_a = temperatura do ar ao redor da superfície de dissipação de calor

[K].

Assim, a capacidade de freios em dissipar grandes quantidades de energia sem atingir temperaturas destrutivas pode ser melhorada de três maneiras. A primeira é o aumento na área da superfície exposta à dissipação do calor, por

⁷ Fonte: <http://f1visaotecnica.files.wordpress.com> (Acesso em Junho de 2013).

meio de aletas. A segunda é o aumento no fluxo de ar ao redor da superfície de dissipação de calor, minimizando-se as restrições ao fluxo de ar e maximizando-se a ação de bombeamento das partes rotativas do freio. Por último, pode-se trabalhar com o aumento da massa e do calor específico das partes em contato imediato com as superfícies de fricção, aumentando-se, assim, a capacidade de armazenamento de calor das partes metálicas durante curtos períodos de alta carga de frenagem.

2.2. Considerações sobre freios automotivos

Segundo Limpert (1999), as principais funções de um sistema de freios automotivo são: desacelerar o veículo, em algumas situações até a parada, manter a velocidade constante durante uma descida, ou manter o veículo estacionado após ele estar completamente parado.

Como conseqüência, de acordo com a proposta do projeto, os freios podem ser classificados como freios de serviço, usados em frenagens para situações de rotina do veículo, freios de emergência ou secundários, utilizados em casos de falha do sistema principal, e freios de estacionamento, cujo objetivo é manter o veículo parado com ou sem a presença do motorista.

O sistema mais comum nessas aplicações utiliza o princípio hidráulico para transmitir a energia de acionamento ao elemento de atrito (pastilha ou lona) durante a ação de frear. Esse sistema é preenchido com um fluido adequado e é pressurizado e forçado por meio de deslocamento de pistões mestres.

2.2.1. O torque de frenagem em veículos

Na maioria das situações de frenagem, a força com que o elemento de atrito atuará é diretamente controlada pelo motorista, através da força aplicada no pedal de freio. No entanto, a força que chega até os elementos de fricção (lona ou pastilha) é, muitas vezes, maior do que a atuante no pedal. A amplificação da força já começa no próprio pedal, que é projetado em formato de alavanca de maneira que pode multiplicar a força da perna diversas vezes antes mesmo que qualquer força seja transmitida ao fluido de freio.

Após o pedal, geralmente está localizado o *booster*, também conhecido como servofreio, o qual é responsável por amplificar novamente a pressão aplicada ao sistema hidráulico. O servofreio a vácuo (Figura 8), mais comum em carros a gasolina, etanol ou gás natural, opera da seguinte forma: o pedal do freio empurra uma haste, que passa através da câmara de vácuo para o cilindro-mestre, acionando o seu pistão. O motor cria um vácuo parcial dentro da câmara de vácuo, em ambos os lados do diafragma. Quando se pisa no pedal do freio, a haste abre uma válvula, permitindo a entrada do ar na câmara em um lado do diafragma, enquanto este isola o vácuo. Isto aumenta a pressão no outro lado do diafragma, ajudando a empurrar a haste, que por sua vez empurra o pistão no cilindro-mestre.

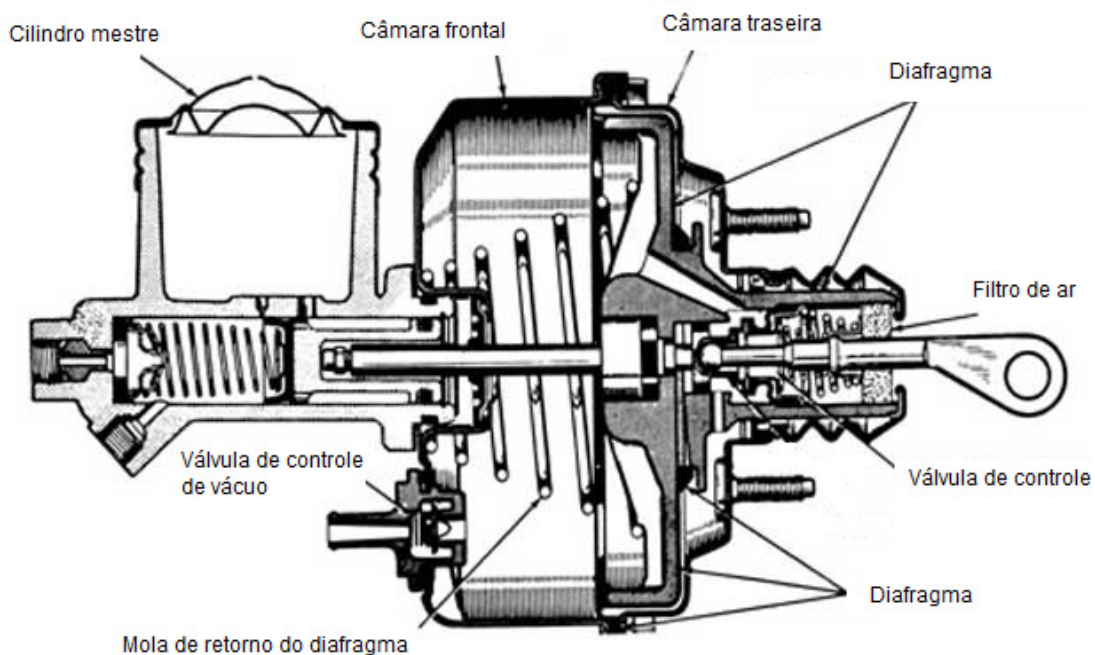


Figura 8 – Servofreio.⁸

Após o servofreio, encontra-se o cilindro mestre cuja função é de abastecer o sistema de freio com fluido vindo do reservatório e gerar a pressão hidráulica. É através do cilindro mestre que o processo de frenagem é iniciado e controlado, visto que ao acionar o pedal de freio, o pistão do cilindro mestre comprime o fluido que se encontra na câmara, gerando pressão em todo o circuito hidráulico do sistema.

Do cilindro mestre saem às linhas de freio, responsáveis por distribuir a pressão, gerada pelo motorista e todo o sistema de amplificação de força, para os cilindros atuadores. A Figura 9 mostra todo o circuito do sistema de frenagem em um veículo.

É importante ressaltar que nos cilindros atuadores das rodas, também há multiplicação da força de acionamento através do princípio de Pascal. Sabendo-se que a pressão propagada no fluido é a razão entre a força exercida pelo pistão, dentro do cilindro mestre, e sua área, podemos ampliar a força no conjunto da roda pelo simples aumento no diâmetro do cilindro atuador desta.

⁸ Fonte: <http://image.mustangmonthly.com> (Acesso em Junho de 2013).

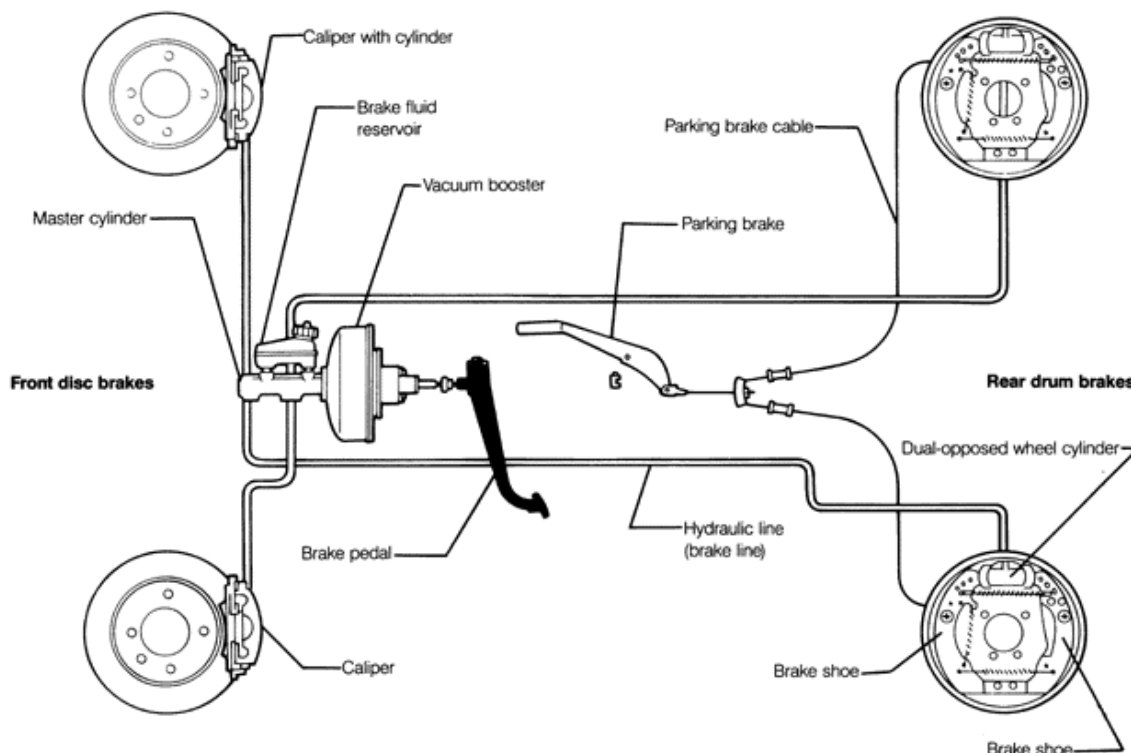


Figura 9 – Componentes principais do sistema de freio de um veículo.⁹

2.2.2. Freios a disco

Freios a disco, assim como freios a tambor, são comumente utilizados em automóveis de passeio. Seu princípio básico de funcionamento consiste na geração de força de frenagem através do contato das pastilhas nas superfícies laterais do disco por meio de sua movimentação axial provida pelo êmbolo do conjunto freio a disco ou “*caliper*”, como também é conhecido (KAWAGUCHI, 2005).

Segundo Limpert (1999), a maior vantagem do uso de freios a disco baseia-se no fato de sua baixa degradação e desempenho a altas temperaturas, de até 900°C. O aumento da espessura devido à dilatação do disco de freio decorrente da frenagem não causa perda de volume do fluido de freio, isto é, não causa nenhum aumento de curso de pedal, nem afeta de modo algum o conforto de

⁹ Fonte: <http://image.mustangmonthly.com> (Acesso em Junho de 2013).

frenagem. Além disso, apresenta comportamento linear entre o torque de frenagem e o coeficiente de atrito entre pastilha e disco.

Baseado na sua forma construtiva, os freios a disco podem ser divididos em freio a disco tipo fixo e tipo flutuante, conforme ilustrado na Figura 10.

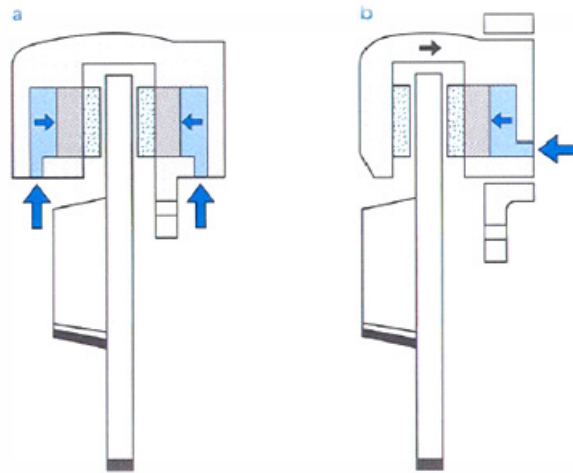
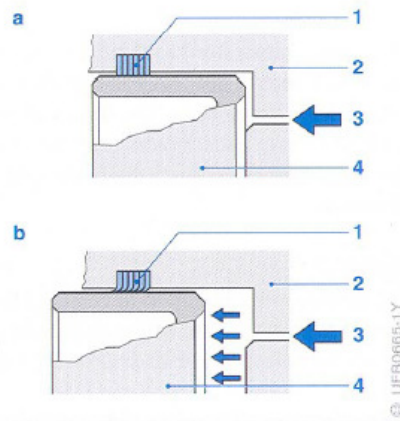


Figura 10 – Tipos de freio a disco: (a) tipo fixo; (b) tipo flutuante.¹⁰

Diferente dos freios a tambor, que necessitam de um mecanismo auxiliar para realizar a regulagem automática, os freios a disco são projetados para ser auto-reguláveis. A Figura 11 mostra princípio de funcionamento de freios a disco. O anel de vedação (item 1, Figura 11) é projetado de modo a sofrer deformação elástica (Figura 11 (b)). Durante a aplicação do freio, ao mesmo tempo em que permite o deslocamento relativo do êmbolo (item 4, Figura 11), 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 (Figura 11 (a)). Gerando uma folga entre o disco e a pastilha da ordem de 0,15 mm, permitindo que o disco gire livremente. (KAWAGUCHI, 2005).

¹⁰ Fonte: KAWAGUCHI, 2005.



(a) freio não aplicado; (b) freio aplicado;

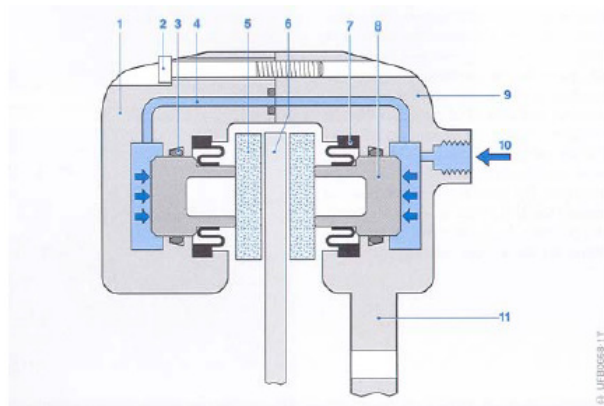
(1) anel de vedação; (2) corpo do caliper; (3) orifício de entrada de fluido; (4) êmbolo.

Figura 11 – Mecanismo de auto-regulagem dos freios a disco.¹¹

Um freio a disco tipo fixo (Figura 12) pode possuir dois êmbolos (item 8, Figura 12) localizados em lados opostos ou quatro êmbolos localizados em lados opostos, dois a dois, que movimentam as pastilhas (item 5, Figura 12) contra o disco (item 6, Figura 12) quando é aplicada pressão hidráulica pelo furo de alimentação (item 10, Figura 12). Desta forma, a força de contato pastilha/disco gera força de frenagem no veículo. Freios a disco do tipo fixo caracterizam-se por serem mais robustos que os do tipo flutuante, que são apresentados a seguir. Sua robustez resulta em baixa absorção volumétrica (KAWAGUCHI, 2005). Além disso, apresenta um desgaste de pastilha interna e externa mais balanceada, com baixo desgaste cônico comparado aos freios a disco flutuantes (LIMPERT, 1999).

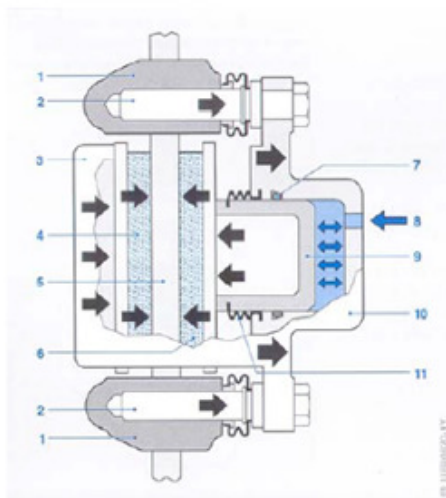
Um freio a disco do tipo flutuante pode possuir um êmbolo (item 9, Figura 13) ou dois êmbolos localizados no lado interno da carcaça, que também é denominado cilindro de roda (item 10, Figura 13) que movimenta a pastilha interna (item 6, Figura 13) pelo furo de alimentação (item 8, Figura 13). Ao mesmo tempo, a pressão hidráulica desloca a carcaça no sentido oposto ao êmbolo, movimentando a pastilha externa (item 4, Figura 13). Contra o disco de freio.

¹¹ Fonte: KAWAGUCHI, 2005.



- (1) carcaça externa; (2) parafuso de junção; (3) anel de vedação; (4) canal de fluido;
 (5) pastilha de freio; (6) disco de freio; (7) guarda-pó de borracha; (8) êmbolo;
 (9) carcaça interna flangeada; (10) furo de alimentação do fluido; (11) flange de montagem.

Figura 12 – Freio a disco tipo fixo.¹²



- (1) suporte; (2) pino-guia; (3) carcaça; (4) pastilha de freio externa; (5) disco de freio;
 (6) pastilha de freio interna; (7) anel de vedação; (8) furo de alimentação do fluido;
 (9) êmbolo; (10) carcaça; (11) guarda-pó de borracha.

Figura 13 – Freio a disco tipo flutuante.¹²

Segundo Limpert (1999), os freios a disco flutuantes apresentam uma série de vantagens comparada ao do tipo fixo. Caracterizam-se pela facilidade de instalação nas rodas, uma vez que não possuem pistões do lado externo, próximo às rodas. Além disso, apresentam temperaturas de trabalho do fluido de freio

¹² Fonte: KAWAGUCHI, 2005.

menores que os do tipo fixo, devido à inexistência de circulação do fluido próximo às áreas de geração de calor e onde há baixa circulação de ar para arrefecimento, evitando potencial vaporização do fluido de freio.

A desvantagem principal dos freios a disco flutuante consiste no maior potencial de torque residual decorrente do arraste da pastilha. Este fato se deve ao retorno do anel de vedação do êmbolo, quando a pressão hidráulica do freio é liberada. A existência de um número maior de graus de liberdade comparado aos do tipo fixo, tornam estes mais suscetíveis a ocorrência de ruídos (KAWAGUCHI, 2005).

2.2.3. Materiais utilizados

As superfícies de atrito são geralmente forradas com um material que possua boas características em condições de altas temperaturas e altos esforços aplicados. Segundo Shigley *et al.* (2004) essas características dependem da severidade do serviço e podem ser resumidas nos seguintes itens:

- Alto coeficiente de atrito dinâmico relativamente estável ao longo de toda a faixa de temperatura de trabalho;
- Alto coeficiente de atrito estático;
- Impermeabilidade às condições ambientais, principalmente à umidade, poeira e óleos lubrificantes;
- Capacidade de resistir a altas temperaturas, juntamente com alta condutibilidade e difusividade térmica, assim como alta capacidade térmica;
- Boa resiliência para melhor distribuição de pressão ao longo da lona;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo e adesivo;
- Alta resistência à fadiga térmica;

- Flexibilidade.

A maioria das aplicações usa materiais de atrito classificados como moldados, trançados ou metal sinterizado.

Os materiais moldados são os mais comuns e mais baratos. Eles consistem de um material ligante, fibras de reforço, aditivos de fricção e materiais de preenchimento. O material ligante é geralmente uma resina termorrígida ou borracha com a função de aglomerar os outros componentes em um composto resistente ao calor. As fibras de reforço podem ser compostas de asbestos, material que vem sendo substituído pela aramida devido ao risco causado pelo fato de ser cancerígeno.

Os materiais trançados têm mais flexibilidade, assim como requerido pelos freios de cinta, e não perdem muito suas características na presença de poeiras, lama e gotas de óleo. São produzidos por longos fios de fibras, reforçados com arames de zinco, cobre e bronze para dar mais resistência e, principalmente, aumentar a condutibilidade térmica. Esses arames e fibras são introduzidos em trançados ou fitas, saturados com resinas e elementos de atrito e, então, são curados sob calor e pressão.

Os materiais de atrito classificados como metais sinterizados são os mais caros, mas também são os que se comportam melhor em serviços pesados, particularmente quando o trabalho é contínuo a temperaturas elevadas. Eles são compostos por pó de metais e materiais de preenchimento inorgânicos moldados sob alta pressão e, assim, sinterizados. No processo de sinterização, as partículas metálicas são aquecidas para se misturarem ao composto, mas não chegam ao ponto de fusão. Existem, ainda, materiais sinterizados compostos de cerâmica e metal, com a diferença de que o pó de cerâmica é adicionado junto ao pó metálico antes da sinterização. As Tabelas 1 e 2 apresentam algumas características necessárias para o projeto de freios a disco, considerando o coeficiente de atrito, temperatura máxima de trabalho e pressão máxima.

Tabela 1 – Propriedades importantes dos materiais de atrito operando a seco.¹³

Material de Fricção ^a	Coeficiente de Atrito Dinâmico f^b	Pressão Máxima ^c		Temperatura Máxima de Compressão	
		psi	kPa	°F	°C
Moldado	0,25 – 0,45	150–300	1030–2070	400–500	204 – 260
Trançado	0,25 – 0,45	50–100	345–690	400–500	204 – 260
Metal sinterizado	0,15 – 0,45	150–300	1030–2070	450–1250	232 – 677
Cortiça	0,30 – 0,50	8–14	55–95	180	82
Madeira	0,20 – 0,30	50–90	345–620	200	93
Ferro fundido, aço duro	0,15 – 0,25	100–250	690–1720	500	260

^aQuando atritado contra ferro fundido ou aço liso.

^bOs valores experimentais de f variam com a composição, velocidade de atrito, pressão, temperatura e umidade. Consulte o fabricante ou obtenha os dados a partir de ensaios. Para efeito de projeto, utilize, em geral, 50 a 75% dos valores de testes para propiciar um fator de segurança.

^cO uso dos valores mais baixos fornecerá uma vida mais longa. Consulte o fabricante ou obtenha dados de ensaios. Calcule a pressão média nas superfícies cilíndricas com base na área de contato projetada (como ocorreu para as tensões nos mancais e para as pressões nos mancais de deslizamento — veja a Seção 13.3).

Tabela 2 – Valores representativos do coeficiente de atrito para materiais de fricção operando em óleo.¹³

Material de Fricção ^a	Coeficiente de Atrito Dinâmico f
Moldado	0,06–0,09
Trançado	0,08–0,10
Metal sinterizado	0,05–0,08
Papel	0,10–0,14
Grafítico	0,12 (méd.)
Polimérico	0,11 (méd.)
Cortiça	0,15–0,25
Madeira	0,12–0,16
Ferro fundido, aço duro	0,03–0,06

^aQuando atritado contra ferro fundido ou aço, ambos lisos.

2.2.4. Modos de falha entre superfície de atrito e a metálica

Em freios por atrito, as falhas ocorrem devido a três fatores principais: elevadas pressões de interfaces, deslizamentos relativos e elevada geração de calor na interface. No que diz respeito às elevadas pressões e deslizamentos relativos, os principais tipos de desgaste são o adesivo, o abrasivo e o corrosivo. Já, com relação

¹³ Fonte: JUVINALL; MARSHEK, 2006.

às elevadas temperaturas, as falhas podem ocorrer por empenamento, fadiga térmica, escoamento e fluência.

O desgaste adesivo, mostrado na Figura 14, ocorre quando duas superfícies são pressionadas uma contra a outra, e algumas das asperezas em contato tenderão a aderir umas às outras devido às forças de atração entre os átomos superficiais dos dois materiais. À medida que se introduz um escorregamento entre as superfícies, essas adesões são quebradas, tanto ao longo da interface original, como em um novo plano. Nesse caso, um pedaço de uma peça é transferido à outra, causando rompimento superficial e danos.

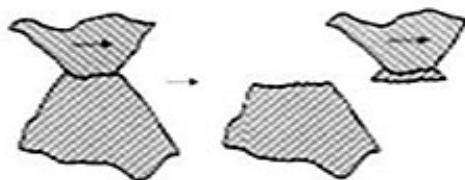


Figura 14 – Desgaste adesivo.¹⁴

O desgaste abrasivo (Figura 15) em freios ocorre de dois modos distintos: a dois corpos ou a três corpos. A abrasão a dois corpos, no caso em que as superfícies do tambor e da lona encontram-se limpas, refere-se a um material duro e rugoso deslizando sobre um material mais mole. A superfície mais dura penetra na superfície mais mole e dela retira material. A abrasão a três corpos, no caso em que há poeira e detritos entre as superfícies do tambor e da lona, refere-se à introdução de partículas duras entre duas superfícies deslizantes, sendo pelo menos um dos dois corpos mais mole do que as partículas. As partículas duras causam, assim, abrasão em uma das superfícies ou em ambas.

Norton (2004) define abrasão como um processo de remoção de material, no qual as superfícies afetadas perdem massa a uma taxa controlada ou não.

¹⁴ Fonte: <http://cadvital.wordpress.com> (Acesso em Junho de 2013).

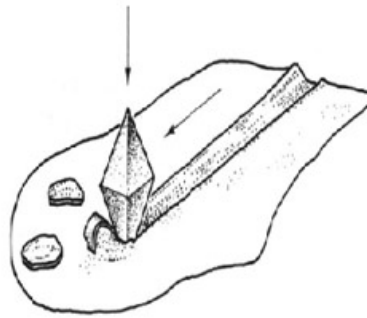


Figura 15 – Desgaste abrasivo.¹⁵

O desgaste por corrosão (Figura 16) ocorre principalmente no tambor do freio. A forma mais comum de corrosão é a oxidação presente na maioria dos metais, pois possuem elevado potencial de reagir com a água ou com o oxigênio, formando os óxidos. No caso do tambor, constituído de ferro fundido cinzento, assim como a maioria das ligas de ferro, é formado um filme de óxido descontínuo e poroso na superfície, que facilmente se lasca e expõe novamente mais substrato a elementos reativos, aumentando, assim, a taxa de corrosão. Se os produtos da reação química forem duros e frágeis (como os óxidos), as lascas dessa camada podem se tornar partículas livres na interface e contribuir para o desgaste abrasivo.

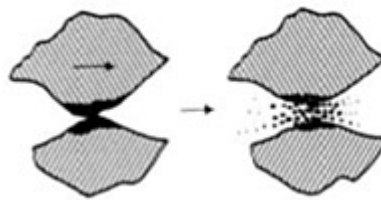


Figura 16 – Desgaste corrosivo.¹⁵

Por fim, há, ainda, a corrosão por fadiga. Como a peça é tensionada ciclicamente em um ambiente corrosivo, a trinca do filme de óxido cresce mais rapidamente do que cresceria se o componente não oxidasse.

Das falhas relacionadas à temperatura, a fadiga térmica é o modo mais provável da falha de um freio. A fadiga térmica é provocada por solicitações térmicas

¹⁵ Fonte: <http://cadvital.wordpress.com> (Acesso em Junho de 2013).

cíclicas (variações de temperatura), tais como resfriamentos ou aquecimentos bruscos repetitivos ao longo da vida do freio. As tensões atuantes, principalmente no tambor de freio na expansão ou na compressão térmicas são dadas por:

$$\sigma = E \times \alpha \times \Delta T \quad (2.2)$$

Verifica-se assim que as tensões podem ser minimizadas utilizando-se baixo módulo de elasticidade do material do disco (E), baixo coeficiente de dilatação térmica (α) e baixo gradiente de temperatura (T). Este último parâmetro é influenciado fortemente pela condutividade térmica do material do tambor. Se ocorrerem deformações plásticas no aquecimento, resultam tensões de tração no resfriamento, o que pode conduzir à formação de trincas. Deste modo, é importante que a resistência a quente do material não seja ultrapassada.

2.3. Qualidade e aspectos da Confiabilidade

O conceito de qualidade varia de forma individual, de um lugar para outro e ao longo do tempo. Portanto, a “medida” da qualidade é um conceito dinâmico. Uma das funções das organizações é criar mecanismos para acompanhar essa evolução, através de um gerenciamento contínuo da qualidade, a qual é formada por uma cadeia de processos e indivíduos responsáveis pela qualidade agregada ao produto, sendo que estes são influenciados, em grande parte, pela fase de desenvolvimento do produto.

Segundo Juran e Gryna (1993), o termo qualidade possui mais de um significado, mas dois são predominantes: a) a qualidade se relaciona com as características do produto, que estão relacionadas com as necessidades do cliente (ou usuário), proporcionando satisfação; (b) a qualidade é a ausência de falhas. As falhas podem ser potenciais e catastróficas e, ambas estão diretamente ligadas ao controle de qualidade de projeto e de processo: qualidade dimensional e confiabilidade (qualidade temporal).

Segundo Teixeira (2004), nos dias atuais, a confiabilidade tem se tornado o centro das atenções de muitas corporações, visto o aumento do número de falhas durante o período de garantia na área automotiva. Portanto, é de suma importância, criar mecanismos de prevenção capazes de reproduzir e quantificar com precisão efeitos indesejáveis ao produto final, pois quando se fala em otimização de produtos, se refere a conceber projetos que reduzam cada vez mais custos de fabricação, porém sem comprometimento do desempenho esperado pelo cliente quanto à funcionalidade e durabilidade do produto.

2.3.1. Planejamento da qualidade

Planejamento da Qualidade, segundo Juran (1992), é a atividade de (a) estabelecer as metas de qualidade e (b) desenvolver os produtos e processos necessários à realização destas metas. Segundo Teixeira (2004), envolve uma série de passos universais:

- Estabelecer metas de qualidade;
- Identificar os clientes;
- Determinar as necessidades dos clientes;
- Desenvolver características do produto que atendam às necessidades dos clientes;
- Desenvolver processos que sejam capazes de produzir aquelas características do produto;
- Estabelecer controles de processos e transferir os planos resultantes para as forças operacionais.

Teixeira (2004) também nos diz que é necessário que um grupo multidisciplinar traduza a linguagem informal do cliente para a técnica, utilizando

dados que possam ser quantificados e introduzidos na fase de desenvolvimento. Se um cliente descreve num questionário de pesquisa, que um de seus principais critérios de escolha de um automóvel é a “embreagem macia”, o fabricante da embreagem precisa, então, traduzir em requisito de projeto: “força de acionamento”.

O Controle da Qualidade Total (TQC) é um sistema gerencial baseado na participação de todos os empregados de uma empresa, no estudo e na condução do Controle da Qualidade. É um sistema de técnicas que permitem a produção econômica de bens e serviços que satisfaçam às necessidades do consumidor (WERKEMA, 1995).

Ainda segundo Werkema (1995), o “processo” é um conjunto de causas que têm como objetivo produzir um determinado efeito, o qual é denominado “produto do processo”. Se visualizarmos a empresa como sendo um processo, podemos subdividi-la em processos menores, com o objetivo de facilitar as atividades de gerenciamento. Esta divisibilidade permite que o processo seja controlado separadamente, facilitando a localização de possíveis problemas e a atuação na causa desses problemas. O controle do processo acontece segundo três passos:

- Estabelecimento da “diretriz do controle” (meta e método);
- Manutenção do nível de controle (atuação no problema a fim de se atingir a meta);
- Alteração das diretrizes de controle (implementação de melhorias).

Para garantir o alcance das metas necessárias à sobrevivência de uma organização, deve-se utilizar um método gerencial de tomada de decisões. O mais conhecido é o ciclo PDCA, apresentado na Figura 17. Segundo Fornari (2010), o PDCA é o caminho para se atingirem as metas atribuídas aos produtos dos sistemas empresariais. Portanto é necessário se determinar uma meta para a utilização dessa metodologia. Dessa forma, o ciclo PDCA é projetado para ser usado como um modelo dinâmico em que a conclusão de um ciclo irá fluir no começo do próximo ciclo, e assim sucessivamente. Além disso, o processo sempre pode ter uma nova análise, o que implica em novo processo de mudança.

Essa metodologia tem como função básica o auxílio no diagnóstico, análise e prognóstico de problemas organizacionais, sendo extremamente útil para a solução de problemas. Poucos instrumentos se mostram tão efetivos para a busca do aperfeiçoamento quanto este método de melhoria contínua, tendo em vista que ele conduz a ações sistemáticas que antecipam a obtenção de melhores resultados com a finalidade de garantir a sobrevivência e o crescimento das organizações (FORNARI, 2010).

Fornari (2010) ainda explica que o Ciclo PDCA está dividido em quatro fases bem definidas e distintas, e pode ser descrito da seguinte forma:

- a) *Plan* (Planejar): estabelecer os objetivos e os processos necessários para fornecer resultados de acordo com os requisitos do cliente e políticas da organização. Esta etapa abrange: a localização do problema, o estabelecimento de uma meta, a análise do fenômeno (utilizando diagramas estatísticos), a análise do processo (utilizando o diagrama de causa e efeito) e a elaboração do plano de ação;
- b) *Do* (Fazer): implementar os processos, ou seja, execução das ações estabelecidas no plano de ação definidas na fase anterior, sendo realizadas no cronograma determinado, tendo todas as ações registradas e supervisionadas;
- c) *Check* (Verificar): nesta fase deve-se executar a verificação da eficácia das ações tomadas na fase anterior. Utilizando para a mesma a comparação dos resultados (planejados e executados), listagem dos efeitos secundários (oriundos das ações executadas), verificação da continuidade ou não do problema (eficácia das ações tomadas);
- d) *Action* (Agir): esta fase é responsável pela padronização dos procedimentos implantados na fase “Do”, ou seja, sendo o resultado satisfatório devem-se padronizar essas ações, transformando-as em procedimentos padrão. Para realizar essa padronização é feita a elaboração ou alteração do padrão, comunicação, treinamento e acompanhamento da utilização do padrão.

A conclusão do projeto também ocorre nessa fase, sendo que poderão ser estipuladas novas metas futuras para que o processo de melhoria contínua possa ser desencadeado.



Figura 17 – O ciclo PDCA de planejamento da qualidade.¹⁶

Na utilização do método PDCA poderá ser preciso empregar várias ferramentas para a coleta, o processamento e a disposição das informações necessárias à condução das etapas do ciclo. Estas ferramentas são denominadas “ferramentas da qualidade” e podem ser divididas em três categorias (WERKEMA, 1995):

- a) Ferramentas estatísticas: o controle estatístico do processo (CEP) é uma das mais poderosas metodologias desenvolvidas visando auxiliar no controle eficaz da qualidade. Através de cartas ou gráficos de controle, podem-se detectar desvios de parâmetros representativos do processo, reduzindo a quantidade de produtos fora de especificações e com isso custos de produção.
- b) As “sete ferramentas do planejamento”: bastante utilizadas para o tratamento de dados não numéricos, são elas: diagrama de causa-

¹⁶ Fonte: <http://www.sobreadministracao.com/wp-content/uploads/2011/06/ciclo-pdca.jpg> (Acesso em Julho de 2013).

efeito, histograma, gráfico de pareto, diagrama de correlação, gráfico de controle e folha de verificação.

- c) **Análise do Modo e do Efeito da Falha (FMEA):** é utilizado com objetivo de melhorar resultados. Empregado na análise de falhas pertinentes ao projeto do produto, funciona como ferramenta para identificação das causas fundamentais dos problemas, a priorização das causas das falhas quanto à sua importância e risco e o estabelecimento de planos de ação para bloqueá-las. Seu uso ideal é na etapa de projeto do produto ou processo, quando são detectadas todas as possíveis falhas potenciais e estabelecidas contramedidas para evitá-las, antes que aconteçam.

2.3.2. Análise do Modo e do Efeito da Falha/*Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

Esta metodologia pode ser aplicada tanto no desenvolvimento do projeto do produto como do processo, com objetivo de identificar falhas anteriormente à fabricação de uma peça e/ou produto e localizar falhas aleatórias ocorridas durante a fase operacional do equipamento. Pode-se dizer que sua utilização diminui as chances do produto ou processo falhar, aumentando a confiabilidade do produto e/ou do processo.

As análises FMEA são classificadas em dois tipos, sendo que as etapas e a maneira de realização da análise são as mesmas, ambas diferenciando-se somente quanto ao objetivo:

- **FMEA DE PRODUTO:** na qual são consideradas as falhas que poderão ocorrer com o produto dentro das especificações do projeto. O objetivo desta análise é evitar falhas no produto ou nos processos decorrentes do projeto. É comumente denominada também de FMEA de projeto.

- FMEA DE PROCESSO: são consideradas as falhas no planejamento e execução do processo, ou seja, o objetivo desta análise é evitar falhas do processo, tendo como base as não conformidades do produto com as especificações do projeto.

Há ainda um terceiro tipo, menos comum, que é o FMEA de procedimentos administrativos. Nele analisa-se as falhas potenciais de cada etapa do processo com o mesmo objetivo que as análises anteriores, ou seja, diminuir os riscos de falha.

A análise FMEA consiste basicamente na formação de um grupo de pessoas que identificam para o produto/processo em questão suas funções, os tipos de falhas que podem ocorrer, os efeitos e as possíveis causas desta falha. Em seguida são avaliados os riscos de cada causa de falha por meio de índices e, com base nesta avaliação, são tomadas as ações necessárias para diminuir estes riscos, aumentando a confiabilidade do produto/processo.

Para aplicar-se a análise FMEA em um determinado produto/processo, forma-se um grupo de trabalho que irá definir a função ou característica daquele produto/processo e irá relacionar todos os tipos de falhas que possam ocorrer, descrevendo para cada tipo de falha suas possíveis causas e efeitos, relacionando as medidas de detecção e prevenção de falhas que estão sendo, ou já foram, tomadas. Por fim, para cada causa de falha, serão atribuídos índices para avaliar os riscos e, através destes, medidas de melhoria poderão ser discutidas.

As etapas de aplicação são descritas abaixo:

- a) Planejamento: Esta fase é realizada pelo responsável pela aplicação da metodologia e compreende:
 - Descrição dos objetivos e abrangência da análise: em que se identifica qual(ais) produto(s)/processo(s) será(ão) analisado(s);
 - Formação dos grupos de trabalho: em que se define os integrantes do grupo, que deve ser preferencialmente pequeno (entre 4 a 6 pessoas) e multidisciplinar (contando com pessoas de diversas áreas como qualidade, desenvolvimento e produção);

- Planejamento das reuniões: as reuniões devem ser agendadas com antecedência e com o consentimento de todos os participantes para evitar paralisações;
- Preparação da documentação

b) Análise de Falhas em Potencial: Esta fase é realizada pelo grupo de trabalho que discute e preenche o formulário FMEA de acordo com as seguintes etapas:

- 1 – Funções e características do produto/processo;
- 2 – Tipo(s) de falha(s) potencial (is) para cada função;
- 3 – Efeito(s) do tipo de falha;
- 4 – Causa(s) possível(eis) da falha;
- 5 – Controles atuais.

c) Avaliação dos Riscos: Os grupos são definidos em termos de: índices de severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D), para cada causa de falha, de acordo com critérios previamente definidos (um exemplo de critérios que podem ser utilizados é apresentado na Tabela 3. O procedimento ideal deve ser definido para cada empresa, com critérios próprios). A partir das classificações descritas acima, se obtém o coeficiente de prioridade de risco (R) dado pela multiplicação dos três grupos (S), (O) e (D).

Tabela 3 – Grupos considerados para o cálculo do coeficiente de prioridade. (a) Severidade; (b) Ocorrência; (c) Detecção.¹⁷

(a)

SEVERIDADE		
Índice	Severidade	Critério
1	Mínima	O cliente mal percebe que a falha ocorre.
2 3	Pequena	Ligeira deteriorização do desempenho com leve descontentamento do cliente.
4 5 6	Moderada	Deteriorização significativa no desempenho de um sistema com descontentamento do cliente.
7 8	Alta	Sistema deixa de funcionar e grande descontentamento do cliente.
9 10	Muito Alta	Idem ao anterior, porém afeta a segurança.

(b)

OCORRÊNCIA			
Índice	Ocorrência	Proporção	Cpk
1	Remota	1:1.000.000	Cpk > 1,67
2 3	Pequena	1:20.000 1:4.000	Cpk > 1,00
4 5 6	Moderada	1:1.000 1:400 1:80	Cpk < 1,00
7 8	Alta	1:40 1:20	
9 10	Muito Alta	1:8 1:2	

(c)

DETECÇÃO		
Índice	Detecção	Critério
1 2	Muito Grande	Certamente será detectado.
3 4	Grande	Grande probabilidade de ser detectado.
5 6	Moderada	Provavelmente será detectado.
7 8	Pequena	Provavelmente não será detectado.
9 10	Muito Pequena	Certamente não será detectado.

¹⁷ Fonte:

http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/FMEAv2.html (Acesso em Julho de 2013).

Cabe ressaltar que, quando o grupo estiver avaliando um índice, os demais não podem ser levados em conta, ou seja, a avaliação de cada índice é independente. Por exemplo, se estamos avaliando o índice de severidade de uma determinada causa cujo efeito é significativo, não podemos colocar um valor mais baixo para este índice somente porque a probabilidade de detecção seja alta. Outra observação importante é que, no caso de FMEA de processo, pode-se utilizar os índices de capacidade da máquina, (Cpk) para se determinar o índice de ocorrência.

Estas medidas são analisadas quanto a sua viabilidade, sendo então definidas as que serão implantadas. Uma forma de se fazer o controle do resultado destas medidas é pelo próprio formulário FMEA por meio de colunas que onde ficam registradas as medidas recomendadas pelo grupo, nome do responsável e prazo, medidas que foram realmente tomadas e a nova avaliação dos riscos.

Uma sugestão de raciocínio que pode ser utilizada durante a avaliação dos critérios das falhas encontra-se na Figura 18.

	Para Reduzir	Considere	Com o objetivo
Severidade		Alterar o processo ou projeto (material, máquina)	Eliminar o Modo de Falha
Ocorrência		Alterar o processo ou projeto	Prevenir ou reduzir a ocorrência de uma ou mais causas
Detecção		Adicionar ou melhorar os controles	Aumentar a probabilidade de detectar o modo de falha

Figura 18 – Ações recomendadas para minimizar as falhas.¹⁸

d) Melhoria: Nesta fase o grupo, utilizando os conhecimentos, criatividade e até mesmo outras técnicas como *brainstorming*, lista todas as ações

¹⁸ Fonte: <http://agente.epse.com.br/banasqualidade/qualidade28281021282828.PDF> (Acesso em Julho de 2013).

que podem ser realizadas para diminuir os riscos. Estas medidas podem ser:

- De prevenção total ao tipo de falha;
- De prevenção total de uma causa de falha;
- Que dificultam a ocorrência de falhas;
- Que limitem o efeito do tipo de falha;
- Que aumentam a probabilidade de detecção do tipo ou da causa de falha.

e) Continuidade: o formulário FMEA é um documento “vivo”, ou seja, uma vez realizada uma análise para um produto/processo qualquer, esta deve ser revisada sempre que ocorrerem alterações neste produto/processo específico. Além disso, mesmo que não haja alterações deve-se regularmente revisar a análise, confrontando-as com as falhas potenciais imaginadas pelo grupo com aquelas que de fato ocorrem na rotina de processo e de uso do produto, de forma a permitir a incorporação de falhas não previstas, bem como a reavaliação, com base em dados objetivos, das falhas já previstas pelo grupo.

3. ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DOS COMPONENTES

3.1. O Fórmula® SAE

O conceito por trás do Fórmula® SAE é tal que uma empresa fictícia está contratando uma equipe de projeto para desenvolver um pequeno carro de corrida tipo Formula. O protótipo será avaliado pelo seu potencial de produção em série. No total, as equipes enfrentam oito provas diferentes durante a competição: três estáticas e cinco dinâmicas. As provas estáticas consistem em: Apresentação de *Marketing*, Prova de Custos e Prova de Projeto, enquanto que as provas dinâmicas são: Aceleração, *Skid-Pad*, *Autocross*, Enduro e Economia de Combustível.

Para fins de *marketing* do projeto, o público alvo são os corredores de autocross amadores. Dessa forma, cada equipe deverá projetar, construir e testar o protótipo seguindo uma série de regras, cujo propósito é garantir a realização do evento com segurança e forçar a proposta de soluções inteligentes. O veículo objeto desta atividade é um monoposto de competição em asfalto, com motor de até 600 cm³ e quatro tempos. A Figura 19 mostra as dimensões aproximadas do protótipo E8.

Assim como em outros projetos extracurriculares, a competição de Fórmula® SAE propicia aos alunos da EESC USP, dentro do seu campo de estudos, uma experiência que reflete a realidade do mercado que encontrarão em sua vida profissional. Essencialmente, envolve a visão sistêmica do desenvolvimento de produto, ou seja:

- Projeto, manufatura e análise de mercado;
- Trabalho em equipe;
- Desenvolvimento com restrição de tempo e prazo;

- Desenvolvimento com restrição de orçamento.



Figura 19 – Dados e dimensões aproximadas, projeto E8.¹⁹

3.2. O sistema de freios da Equipe EESC USP

Conforme a regra citada no Anexo A, ao longo dos sete primeiros anos de Equipe, as características básicas adotadas para o projeto de freio foram:

- Em conformidade com o item T7.2 da regra geral, o protótipo deverá frear as quatro rodas e manter seu movimento em linha reta, até que atinja o repouso. Isso só é possível se, na fase de projeto, adotarmos como ponto ótimo a condição de travamento simultâneo das quatro rodas do protótipo. É importante ressaltar, entretanto, que tal condição

¹⁹ Fonte: acervo da Equipe EESC USP

é indesejável em automóveis comerciais, pois leva a instabilidade no veículo.

- b) Freios a disco, ao invés de tambores, foram escolhidos pela facilidade que os discos apresentam de dissipar calor, já que o conjunto disco + pastilhas fica exposto à passagem de ar na roda. Além disso, a verificação do desgaste e a substituição das pastilhas são mais simples que nos freios a tambor e a quantidade de componentes no conjunto da roda, por ser inferior, facilita a manutenção do sistema.
- c) De acordo com o item T7.1.1 da regra geral, foi necessário dividir o circuito hidráulico para aumentar a segurança do evento. Dessa forma, optou-se por dividir o sistema em circuito dianteiro e traseiro, cada um com seu próprio cilindro mestre, facilitando o dimensionamento do sistema a fim de se atingir a condição descrita no item (a), conforme ilustra a Figura 20.

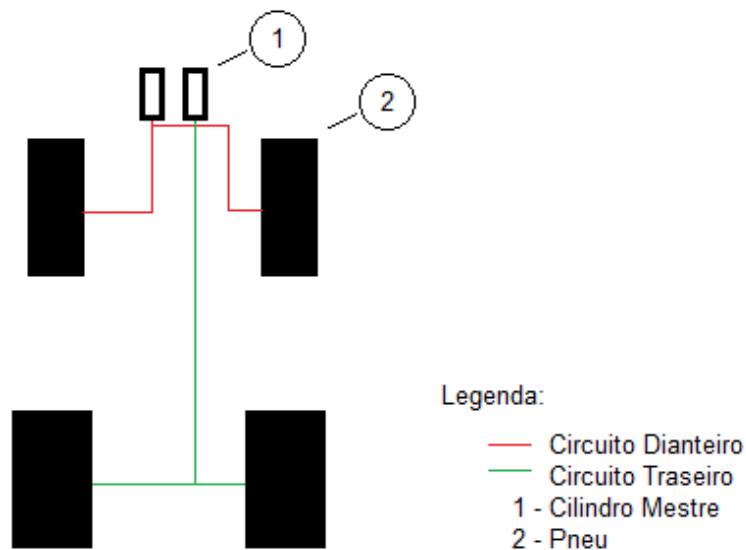


Figura 20 – Circuitos hidráulicos.

Com base nessas premissas, os demais componentes do sistema de freio foram dimensionados como segue.

3.2.1. Pedal

O pedal é dimensionado utilizando-se a chamada “força de alavanca”, que multiplica a força exercida pelo piloto antes de transmiti-la aos pistões. Esse fator multiplicativo deve ser tal que se possa obter equilíbrio entre comprimento final, curso e deslocamento total do componente e a força a ser exercida pelo piloto, sempre melhorando o conforto deste durante a frenagem. Um diagrama de corpo livre é apresentado na Figura 21.

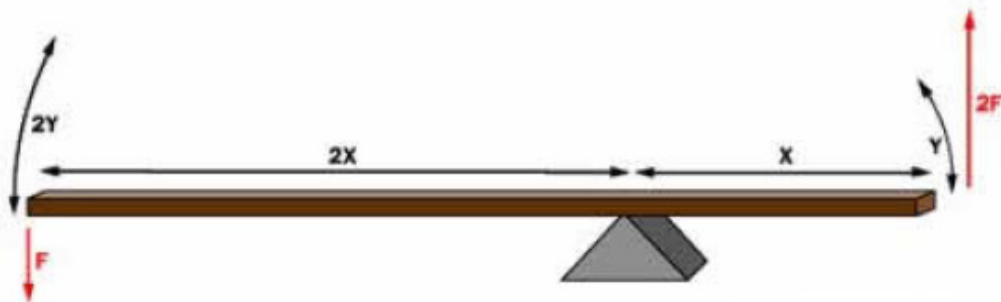


Figura 21 – Força de alavanca.²⁰

A partir do projeto E5, o pedal tem sido manufaturado em alumínio 7075 T6, buscando redução de peso do sistema, sem perda de resistência. Dessa forma, para garantir o item T7.1.8 da regra geral, simula-se o pedal antes da sua manufatura utilizando-se um modelo em elementos finitos, com objetivo de obter um coeficiente de segurança de aproximadamente 1,6 para o critério de Von Mises, conforme simulação apresentada na Figura 22.

²⁰ Fonte: NEVES, 2007.

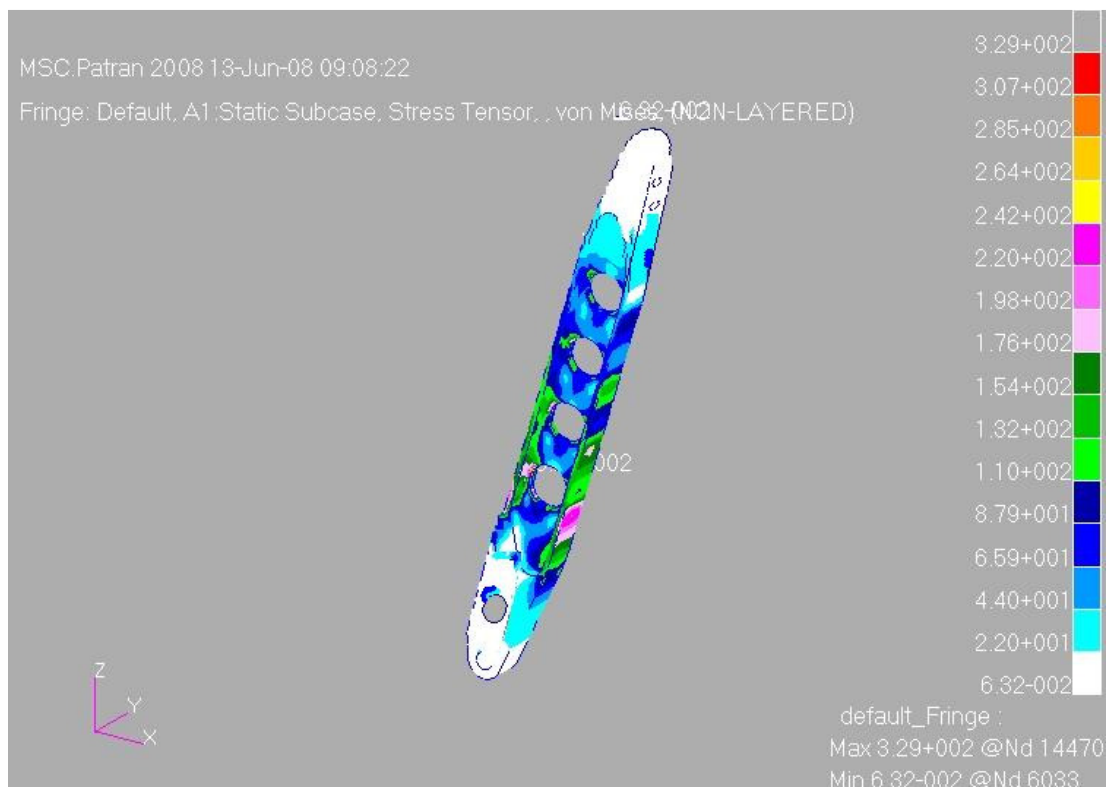


Figura 22 – Simulação em elementos finitos²¹ do pedal, projeto E6.²²

3.2.2. **Brake Bias Bar**

Sua função é permitir o ajuste fino na distribuição da força que chega aos cilindros mestres dianteiro e traseiro. Isto pode ser feito de duas formas: (a) através do deslocamento do pedal no eixo do *brake bias*, de forma que ele fique mais próximo de um ou outro cilindro. Dessa forma, quando o pedal estiver perfeitamente centralizado em relação aos cilindros, a força transmitida aos pistões será a mesma; (b) variando o comprimento da haste dos pistões, de forma que o volume total de fluido no cilindro dianteiro seja maior que no traseiro (Figuras 23 e 24). Esse ajuste é preferível quando se utiliza pinças de freio dianteiras com área de êmbolo maior que as pinças traseiras.

²¹ Licença do software MSC Patran® cortesia da parceira Multicorpos Engenharia.

²² Fonte: acervo da Equipe EESC USP.

A capacidade de efetuar o ajuste fino através do *brake bias* é útil para que pequenas alterações na suspensão e no peso total do veículo durante as diversas provas da competição não impactem negativamente a eficiência do sistema de freio.

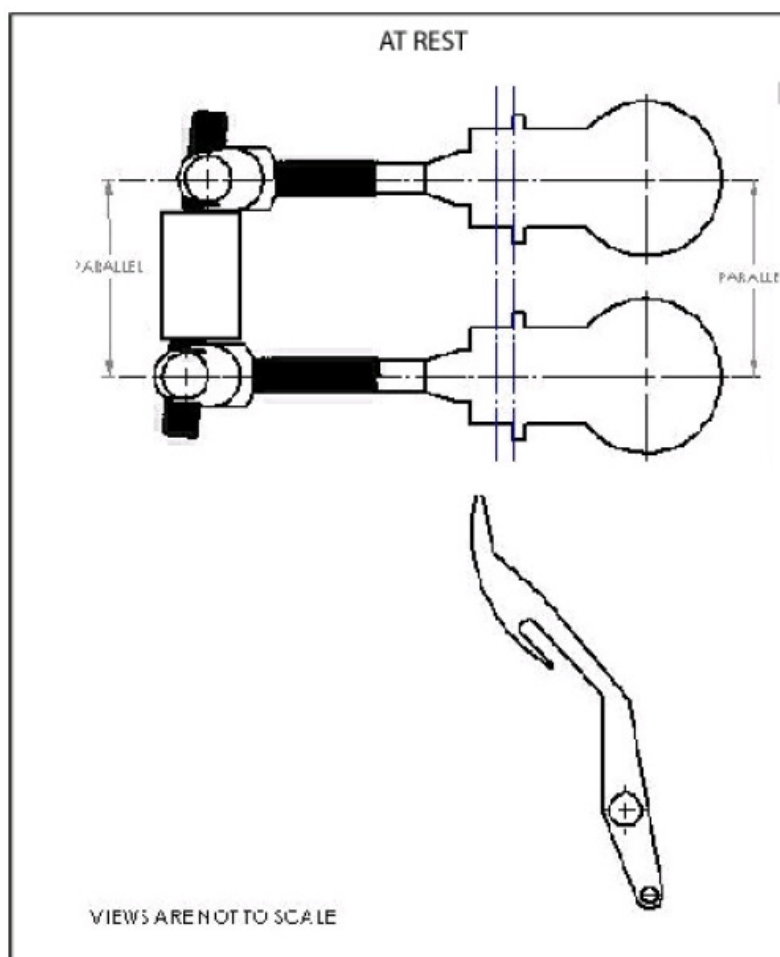


Figura 23 – Ajuste de *Brake Bias Bar* (b), pedal em repouso.²³

²³ Fonte: acervo da Equipe EESC-USP.

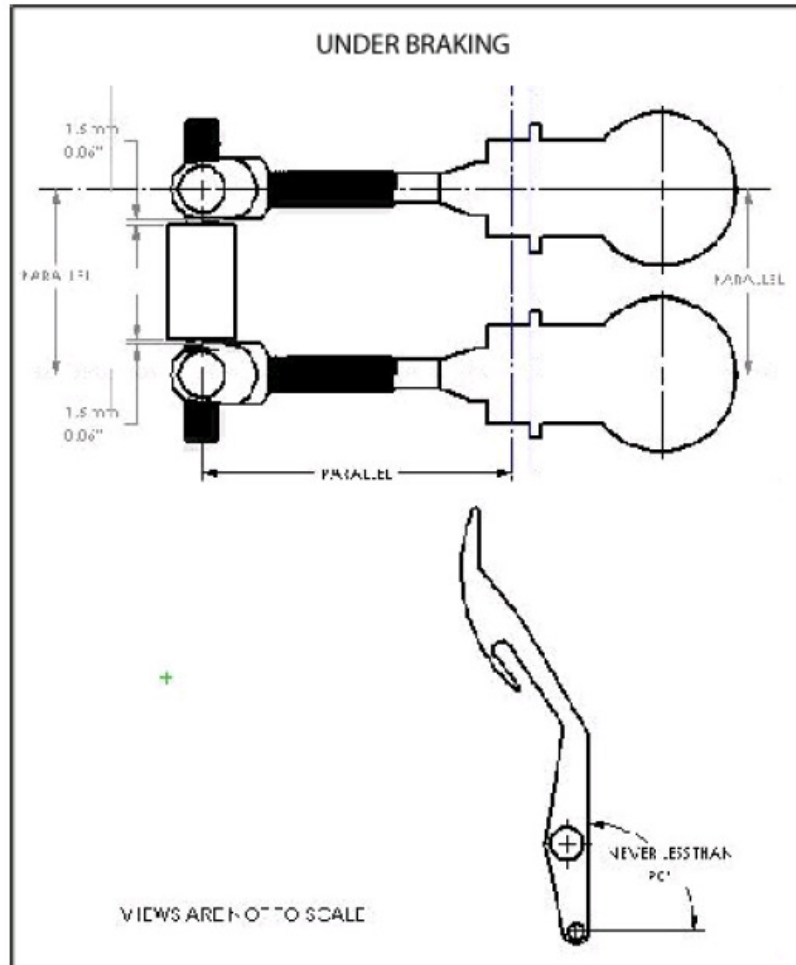


Figura 24 – Ajuste de *Brake Bias Bar* (b), pedal acionado.²⁴

3.2.3. Cilindro mestre

É o local no qual se gera a pressão hidráulica do sistema, ou seja, é onde há a conversão da força exercida pelo piloto em pressão hidráulica. O conjunto formado por cilindro, reservatório, pistão e gaxeta também é chamado de cilindro mestre. Seu dimensionamento, segundo Limpert (1999), está diretamente relacionado ao dos êmbolos das pinças e dos discos do sistema de freio e depende de parâmetros dinâmicos do veículo, determinados durante o projeto da suspensão.

²⁴ Fonte: acervo da Equipe EESC-USP.

Para facilitar o entendimento, o projeto destes itens será discutido na seção 3.3. Abaixo, o projeto do cilindro mestre do protótipo E1 (Figura 25).

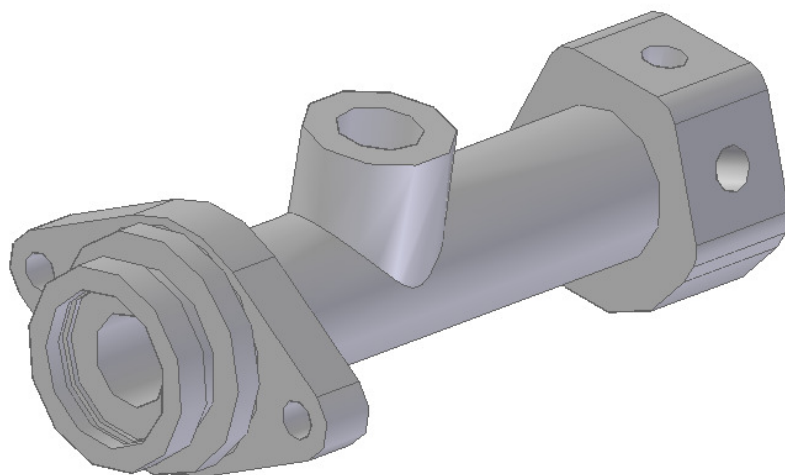


Figura 25 – Cilindro mestre com reservatório remoto, projeto E1.²⁵

3.2.4. Pistão

Com uma extremidade fixa no *brake bias bar* e a outra encaixada dentro do cilindro mestre, o pistão é responsável por transmitir a força do pedal diretamente para o fluido de freio. De maneira geral, sua geometria é simples e o diâmetro externo da extremidade final deve ser o mesmo que o diâmetro interno do cilindro mestre ao qual irá acoplado.

²⁵ Fonte: acervo da Equipe EESC USP.

3.2.5. Gaxeta

É um elemento de vedação em sistemas com movimento axial e/ou rotativo, largamente utilizado em hidráulica e pneumática. Geralmente, possui formato anular e é fabricado em materiais como elastômeros (borracha) ou compósitos, por vezes impregnados com grafite. Possui lábios que permitem vedação estática ou dinâmica. No sistema de freios, é utilizada na extremidade do pistão que está alojada no cilindro mestre, impedindo que o fluido de freio esorra para a parte dianteira do cilindro, e vaze do sistema, durante o deslocamento do pistão na frenagem. Seu dimensionamento é simples, basta pesquisar no catálogo do fornecedor a resistência do material ao fluido de freios, perfil, dureza do elastômero e diâmetros externo e interno, de forma haja o encaixe do diâmetro externo da gaxeta no cilindro mestre e do interno, no pistão.



Figura 26 – Gaxetas “Tipo U”.²⁶

3.2.6. Reservatório de fluido

É o compartimento no qual se armazena excesso de fluido. É necessário armazenar fluido além da quantidade que preenche as linhas do sistema

²⁶ Fonte: <http://www.vedatec.com.br/gaxetas.htm> (Acesso em Junho de 2013).

para que, ao pressionar o fluido em direção às pinças durante a frenagem, não haja entrada de ar nos circuitos. Podemos utilizar um reservatório para cada cilindro mestre ou um reservatório comum ao sistema, também chamado OEM. A vantagem da primeira configuração é permitir a sangria independente dos circuitos hidráulicos, além de evitar que um vazamento qualquer comprometa a eficiência de ambos os circuitos. Além disso, o reservatório pode ou não ser parte integrante do corpo do cilindro mestre. Escolhe-se a configuração que melhor se adapte às necessidades do projeto, já que quando formam uma peça única, evitam pontos de vazamento no sistema, mas em contrapartida elevam o custo de manufatura do componente.

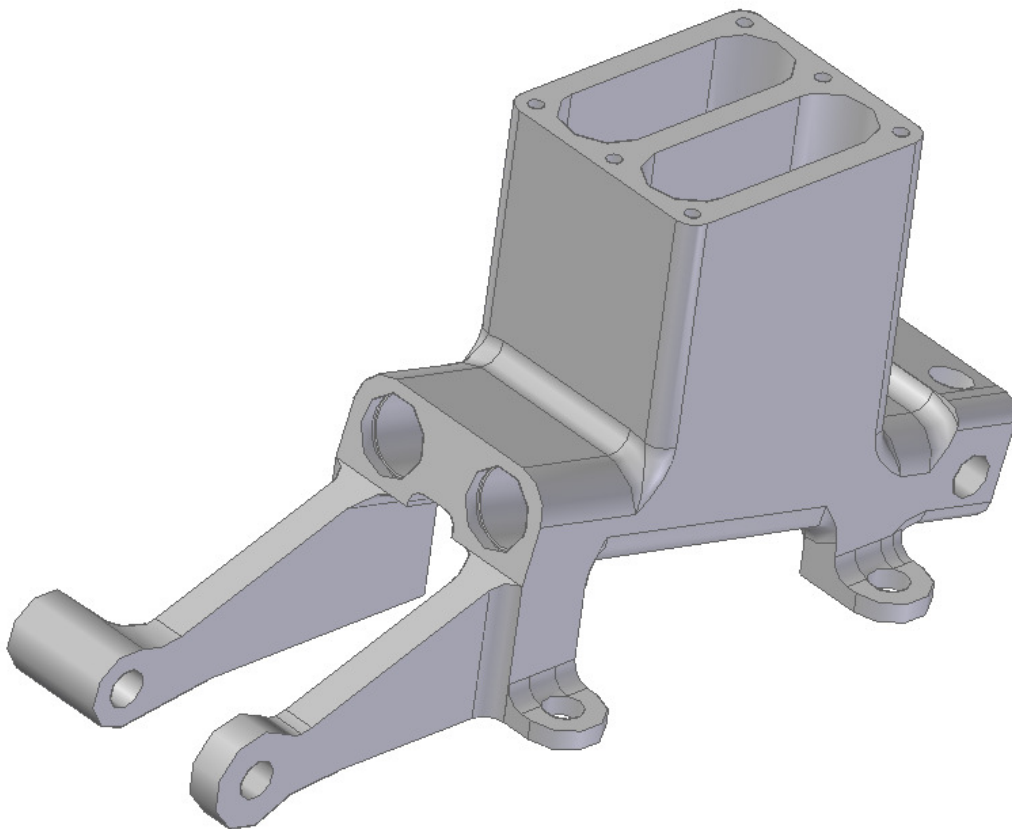


Figura 27 – Cilindro mestre com reservatório integrado, projeto E4.²⁷

²⁷ Fonte: acervo da Equipe EESC USP.

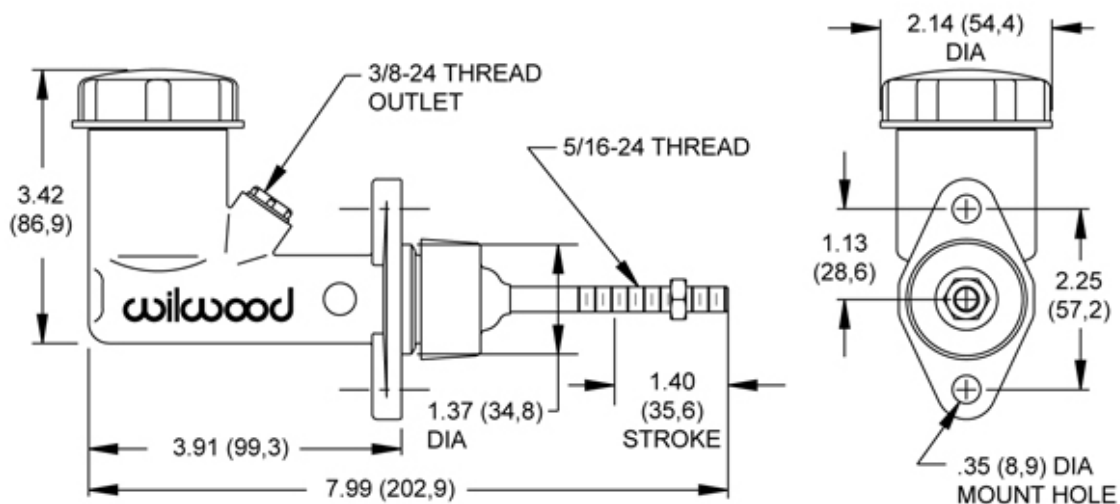


Figura 28 – Cilindro mestre com reservatório integrado, projeto E7.²⁸

3.2.7. Fluido de freio

É o meio de transmissão da força exercida pelo piloto até rodas, na forma de pressão. Para esse fim, é desejável que ele seja incompressível. O fluido de freio utilizado no Fórmula® SAE é do tipo DOT 4 que, segundo a norma americana *STANDARD 116: MOTOR VEHICLE BRAKE FLUIDS*²⁹, possui ponto de ebulição entre 155°C e 230°C e absorve eventual umidade nas linhas. A capacidade do fluido de absorver umidade é desejável para evitar a formação de bolsões de água no interior das linhas de freio, que alteraria a transmissão da pressão durante a frenagem, diminuindo o desempenho do sistema.

É importante ressaltar que o fluido do tipo DOT 3 também possui capacidade de absorção de água, porém como sua temperatura de ebulição é mais baixa, entre 140°C e 205°C, sua escolha foi rejeitada como fator de segurança, observando que o circuito traseiro encontra-se muito próximo das áreas quentes do veículo, como motor e escapamentos.

²⁸ Fonte: http://www.wilwood.com/Images/MasterCylinders/Master%20Cylinder_Drawings-Large/260-2636_dwg-lg.jpg (Acesso em Junho de 2013).

²⁹ Fonte: <http://www.fmcsa.dot.gov/rules-regulations/administration/fmcsr/fmcsrruletext.aspx?reg=571.116> (Acesso em Junho de 2013).

3.2.8. Mangueiras hidráulicas

Também conhecidas como linhas ou flexíveis de freio, fazem o transporte do fluido dos cilindros mestres até as pinças. De acordo com o item T7.1.5 da regra geral, as mangueiras devem possuir armadura metálica. Dessa forma, a Equipe utilizou, em todos os projetos do escopo desse trabalho, flexíveis de freio com miolo de teflon e armadura trançada de aço.

3.2.9. Caliper

Também conhecido como pinça de freio. No Fórmula® SAE, é o nome dado ao conjunto carcaça, êmbolo e parafuso sangrador. No circuito dianteiro, sempre foi acoplada à manga da suspensão. Entretanto, no projeto E5, o circuito traseiro apresentou conjunto da roda (caliper + pastilhas + disco) único e acoplado no mancal do diferencial da transmissão, enquanto que o disco foi acoplado no próprio diferencial.

Nos projetos E1, E2 e E2-M, a pinça de freio era fixa e, cada unidade, possuía quatro êmbolos (Figuras 29 e 30). Já nos projetos E3, E3-M e E4, a fim de reduzir o peso total do sistema, apesar de ainda adotarem o tipo fixa, cada pinça passou a ter dois êmbolos (Figura 31). Nesses protótipos, as pinças foram totalmente projetadas e manufaturadas pela Equipe.

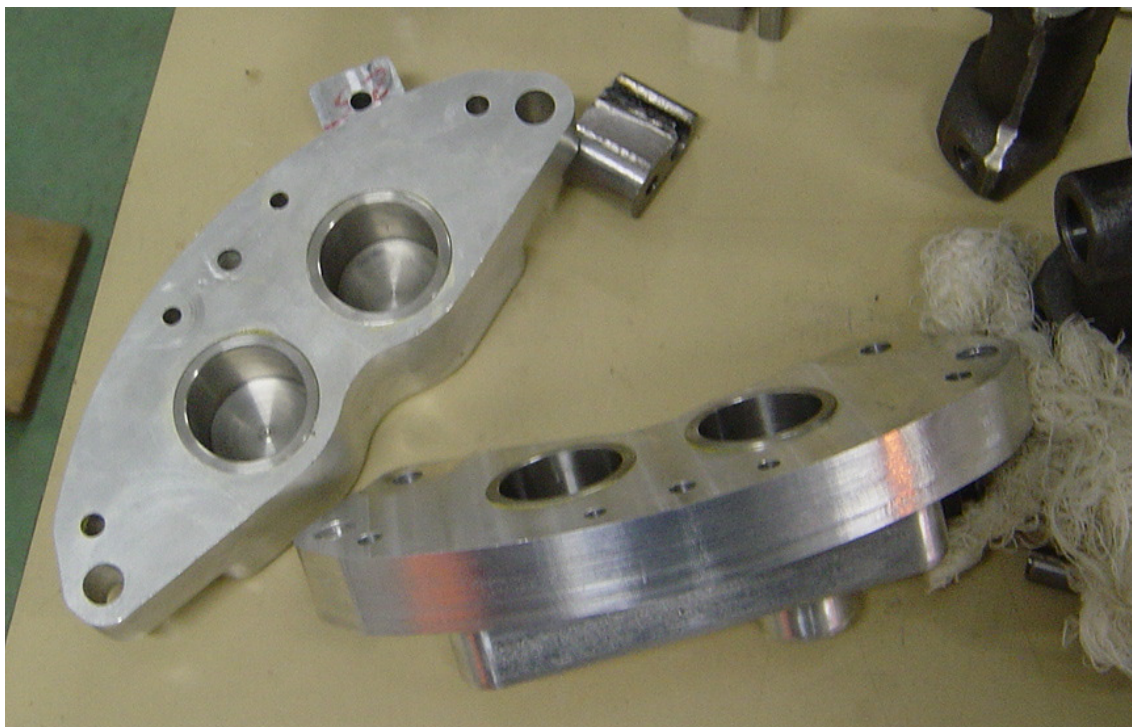


Figura 29 – Pinça de freio fixa, quatro êmbolos, manufaturada pela Equipe. Projeto E1.³⁰

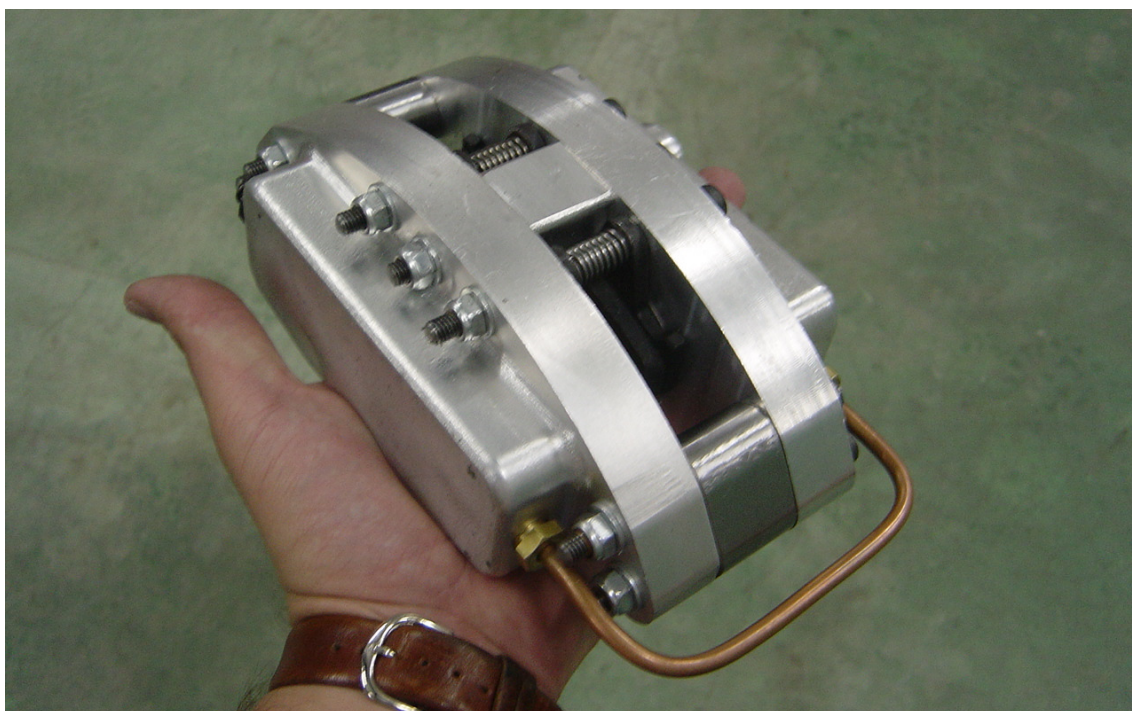


Figura 30 – Pinça de freio, projeto E1. Peso: 2470g, cada.²⁸

³⁰ Fonte: acervo da Equipe EESC-USP.

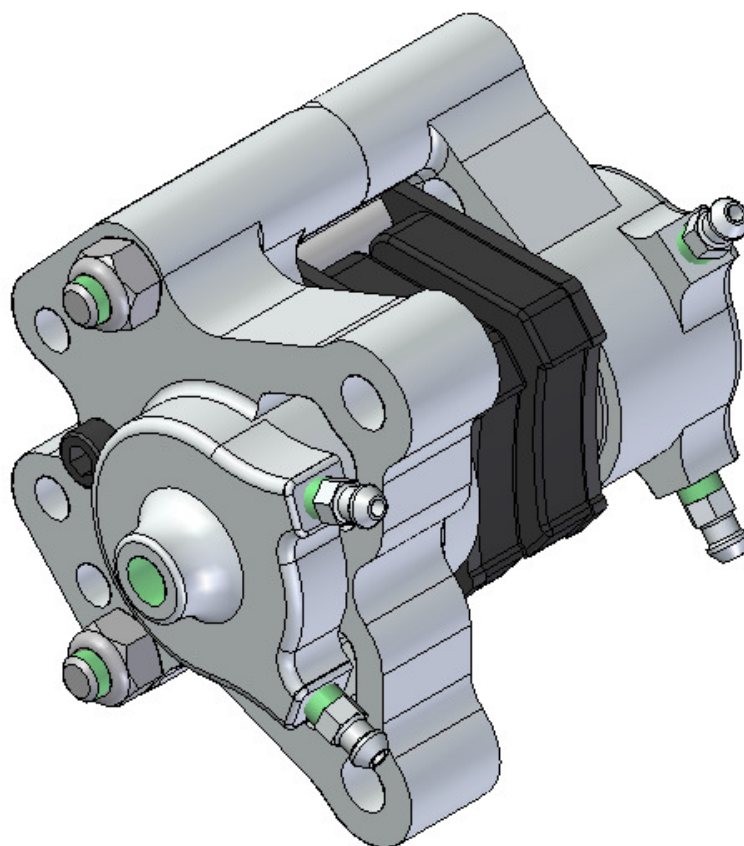


Figura 31 – CAD da pinça de freio, projeto E3. Peso: 930g, cada.³¹

A partir do projeto E6, começaram a ser utilizadas pinças comerciais, do tipo flutuante, cada uma com apenas um êmbolo (Figura 32). A escolha dessas características deve-se às dimensões reduzidas da roda aro 10” adotada a partir desse projeto, que limita o espaço dos componentes do freio ali localizados. Além de serem mais leves, essas pinças comerciais possuem menos componentes que os protótipos manufaturados da Equipe, utilizados nos primeiros carros, facilitando sua montagem e manutenção.

³¹ Fonte: acervo da Equipe EESC-USP.

DYNALITE SINGLE FLOATER, MOUNTING DIMENSIONS:

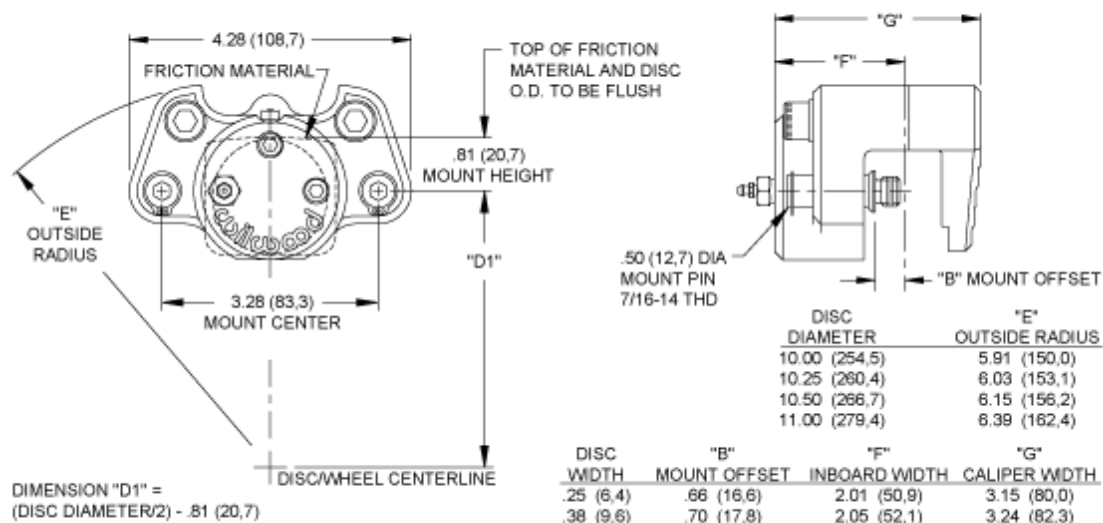


Figura 32 – Características básicas da pinça flutuante, projeto E6. Peso: 635g, cada.³²

3.2.10. Êmbolo

É um dos componentes que encontramos alojados nas pinças de freio. Quando pressionado pelo fluido, sua função é exercer força normal nas pastilhas, gerando o atrito necessário para a frenagem. Utilizando o princípio de Pascal (Figura 33), podemos melhorar o sistema em dois aspectos: (a) gerando uma nova multiplicação na força de frenagem do sistema, aumentando a relação entre os diâmetros dos êmbolos e dos pistões; (b) diminuindo o tamanho dos componentes da roda, já que, mantendo o volume deslocado no sistema constante, ao aumentarmos a relação entre as áreas dos êmbolos e pistões teremos deslocamentos menores no conjunto da roda, durante a frenagem.

³² Fonte:

<http://www.wilwood.com/Calipers/CaliperList.aspx?subname=Dynalite%20Single%20Floater> (Acesso em Junho de 2013).

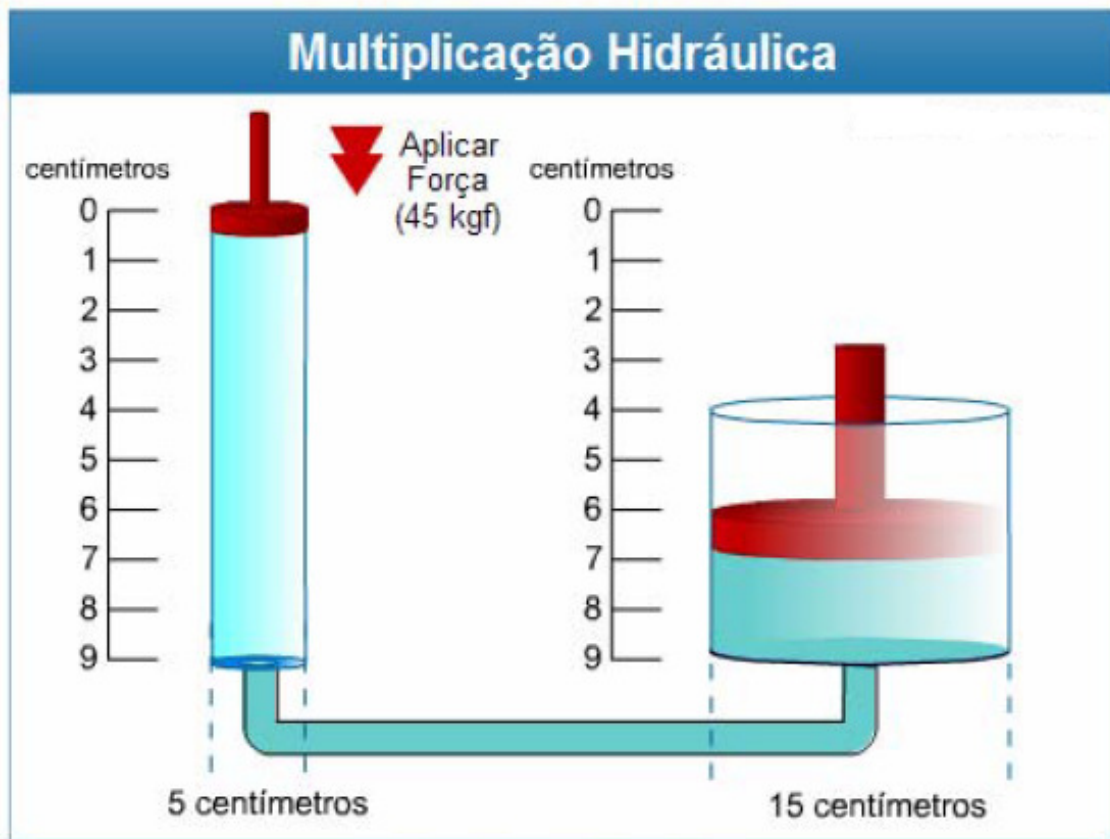


Figura 33 – O princípio de Pascal para fluidos incompressíveis.³³

3.2.11. Parafuso sangrador

Também alojado na carcaça da pinça, é responsável por retirar as bolhas de ar presentes no sistema durante a chamada “sangria” do freio, explicada na Figura 34. Não é necessário projetar esse componente, mas sua presença é de fundamental importância, já que a presença indesejável de bolhas de ar absorve a pressão propagada pelo fluido, tornando a frenagem ineficiente.

³³ Fonte: NEVES, 2007.

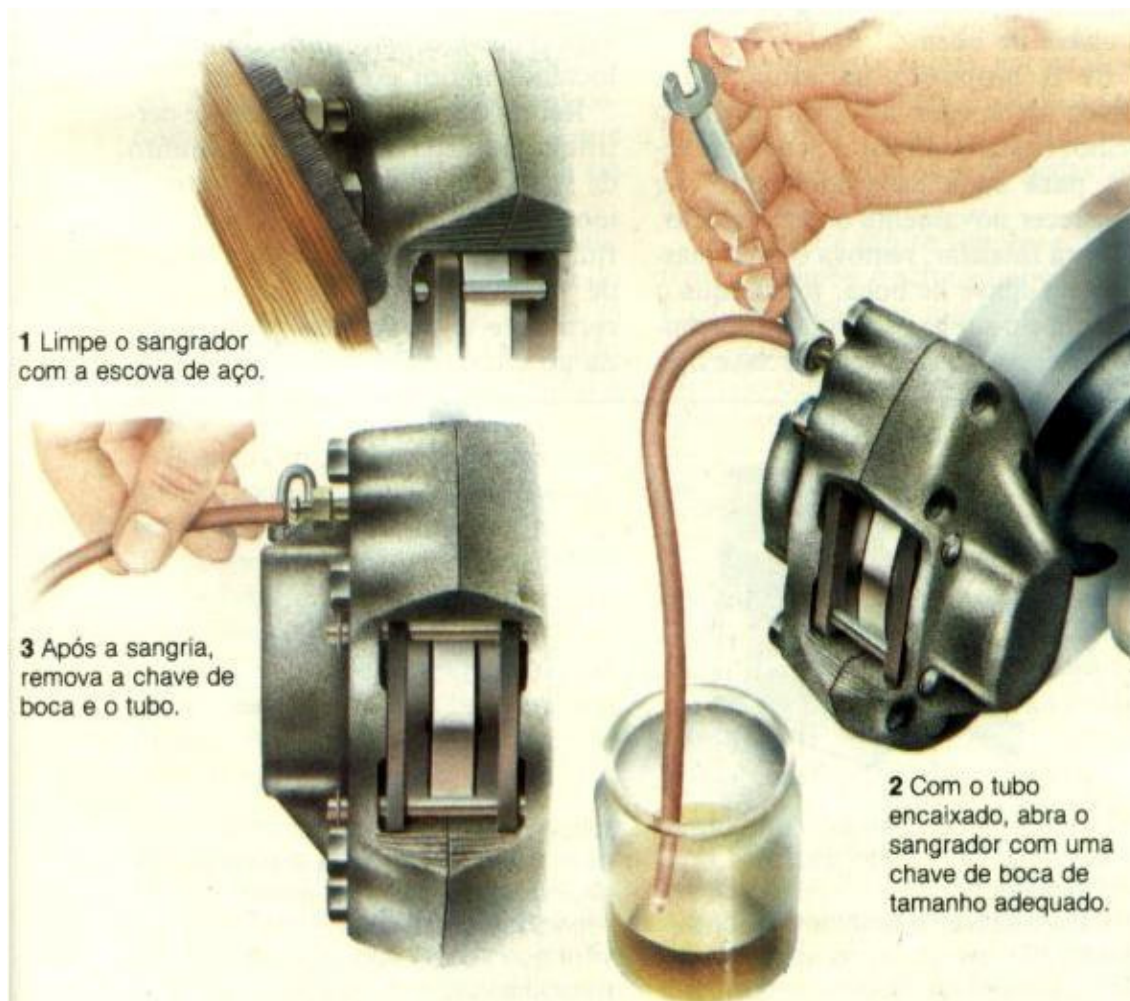


Figura 34 – Sangria do sistema de freio.³⁴

3.2.12. Pastilha

A escolha das pastilhas é baseada em gráficos e tabelas dos diferentes fabricantes, nas quais procuramos um componente que apresente resposta rápida e que seja resistente a altas temperaturas de funcionamento. Não há dados referentes à escolha das pastilhas para os protótipos E1, E2 e E2-M. A partir do E3, entretanto, sabe-se que a Equipe optou por um composto denominado **Polimatrix A**, da Willwood (Figura 35), pois, além das características acima citadas, apresentava:

³⁴ Fonte: acervo da Equipe EESC-USP.

baixas taxas de desgaste mesmo em frenagens severas, mantendo a alta temperatura de frenagem; resposta imediata mesmo em baixas temperaturas para voltas classificatórias e largadas; compatíveis com discos de aço, ferro fundido e titânio.

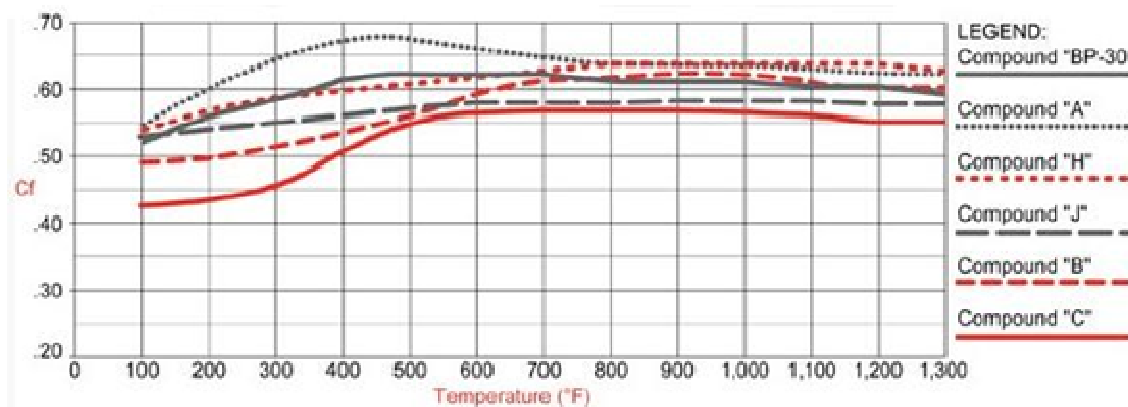


Figura 35 – Curva de coeficiente de atrito x temperatura para vários compostos de pastilha.³⁵

3.2.13. Disco

Projetado e usinado pela Equipe, tem seus diâmetros externo e interno limitados pelo dimensionamento dos componentes da suspensão do protótipo. Em todos os dez projetos citados ele foi usinado utilizando-se fresa de topo e aço SAE1045 como material, com posterior têmpera (aquecimento a 850°C e banho de água), revenido (a 600°C durante 1,5h) e retificação. Apresenta furos para alívio de peso, distribuídos por todo o centro da peça. Sua montagem nos componentes da suspensão pode ser vista nas Figuras 36 e 37.

Utiliza-se análise em elementos finitos nesse componente (Figura 38), com objetivo de obter um coeficiente de segurança de aproximadamente 2 para a tensão de Von Mises, para assegurar sua resistência mecânica durante a prova de enduro, principalmente na região de fixação no cubo da roda.

³⁵ Fonte:

<http://www.wilwood.com/BrakePads/BrakePadsApp.aspx?compound=PolyMatrix%20A> (Acesso em Junho de 2013).

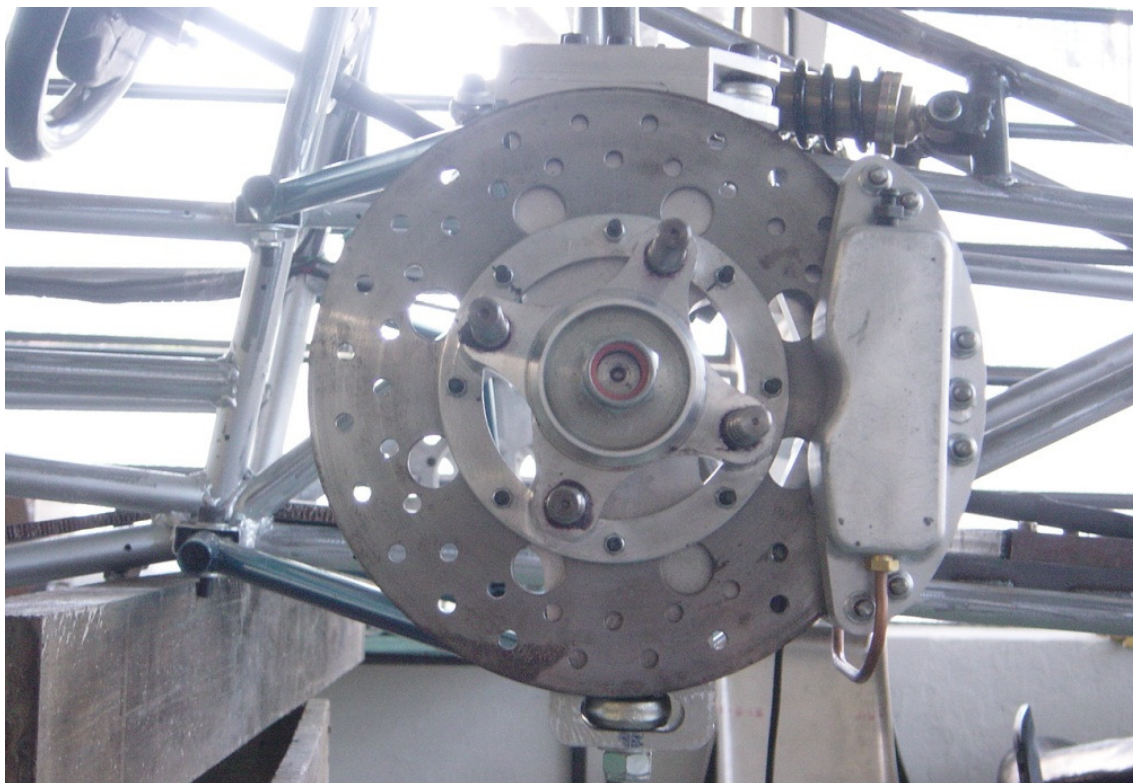


Figura 36 – Montagem do disco dianteiro e pinça na suspensão, projeto E1.³⁶

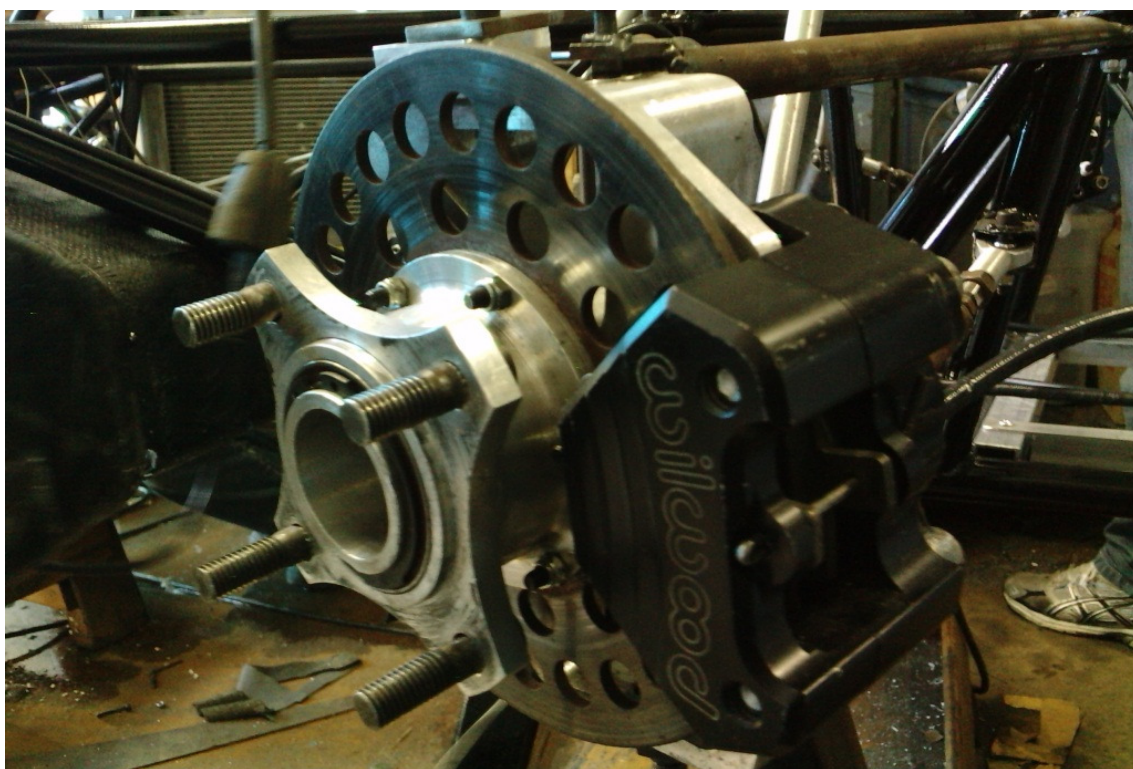


Figura 37 – Montagem do disco de freio dianteiro e pinça na suspensão, projeto E7.³⁴

³⁶ Fonte: acervo da Equipe EESC-USP.

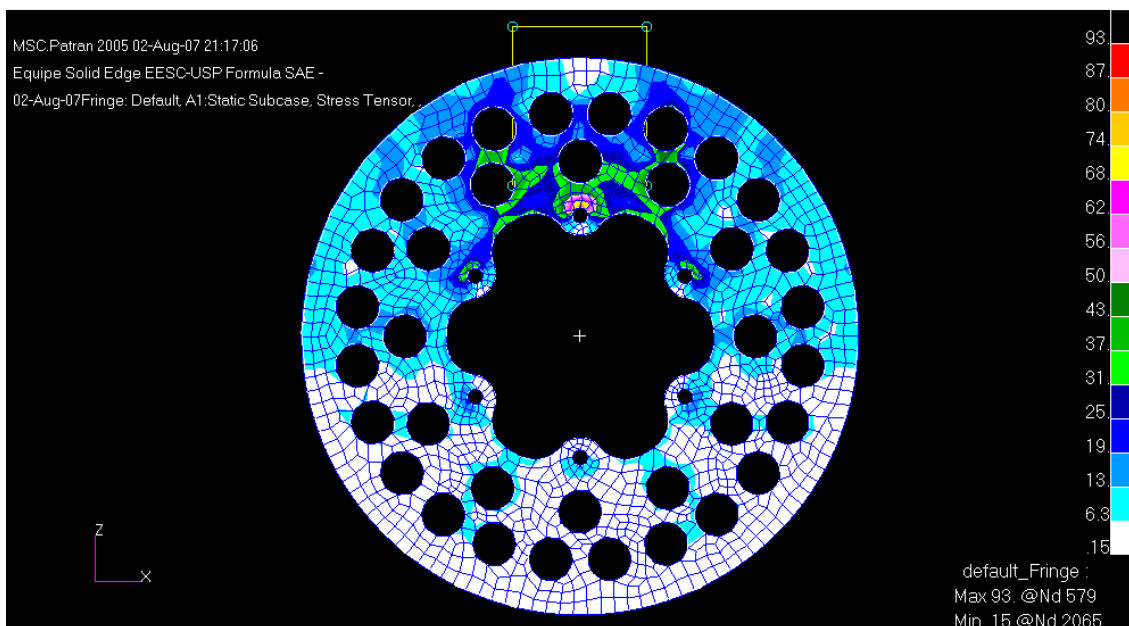


Figura 38 – Simulação em elementos finitos³⁷ do disco de freio, projeto E5.³⁸

3.3. Dimensionamento: cilindro mestre, êmbolo e disco

Em se tratando de projeto de freios, no início, temos três variáveis de frenagem principais: raio efetivo dos discos dianteiro e traseiro (r); diâmetro dos êmbolos da pinças dianteira e traseira (D_{WC}); diâmetro dos cilindros mestres dianteiro e traseiro (D_{MC}). LIMPERT (1999) nos mostra que se fixarmos valores a duas das variáveis de frenagem, encontraremos o valor ótimo da terceira, de forma a termos um sistema eficiente. Os dados gerais necessários a esse projeto são:

a) Do projeto da suspensão:

- Distância entre-eixos (d), em mm;
- Altura do CG (h), em mm;
- Distribuição das cargas estáticas (ψ), em porcentagem, nos eixos dianteiro e traseiro;

³⁷ Licença do software MSC Patran® cortesia da parceira Multicorpos Engenharia.

³⁸ Fonte: acervo da Equipe EESC-USP.

- Coeficiente de atrito entre pneu e pavimento (μ_{PP});
- Porcentagem de aumento na massa devido a inércia rotativa (I);
- Raio do conjunto roda + pneu (R), em mm;
- Peso do carro + piloto (W), em kg;

b) Da literatura:

- Eficiências (η), em porcentagem, do pedal e do êmbolo da pinça;
- Pressão das linhas em repouso (P_0), em Mpa;
- Força aplicada no pedal (F_P), em kg;

c) Escolha do projeto de freio:

- Coeficiente de atrito entre pastilha e disco (μ_{PD});
- Ganho do Pedal (g).

Até o protótipo E5, a Equipe utilizava rodas de aro 13", o que resultava em espaço suficiente para o grupo de freio desenvolver pinças manufaturadas pelo próprio time. Dessa forma, fixando-se o raio efetivo dos discos e os diâmetros dos cilindros mestres, encontrava-se os diâmetros ideais dos êmbolos das pinças dianteira e traseira. A fim de facilitar os cálculos durante a etapa de projeto do sistema de freio, Neves (2007) propôs a criação de uma planilha de dimensionamento e dinâmica de frenagem (Figura 39).

Quando as pinças passaram a ser flutuantes, adotou-se diâmetro de êmbolos iguais para as quatro rodas e cilindros mestres também com diâmetros idênticos. Ao mesmo tempo, o grupo da suspensão passou a adotar rodas de aro 10". Nesse cenário, a alternativa de balancear as forças de frenagem utilizando a terceira variável, raio efetivo dos discos de freio, tornou-se inviável, já que o diâmetro reduzido do aro limitou as dimensões do conjunto da roda do freio. A alternativa encontrada foi instalar uma válvula proporcional no sistema (Figura 40), a fim de garantir a condição de frenagem simultânea das quatro rodas. Uma válvula proporcional é tal que, ao fechá-la, somos capazes de limitar a pressão que sai do componente. No caso do Formula, esta é a pressão utilizada pelo circuito traseiro.

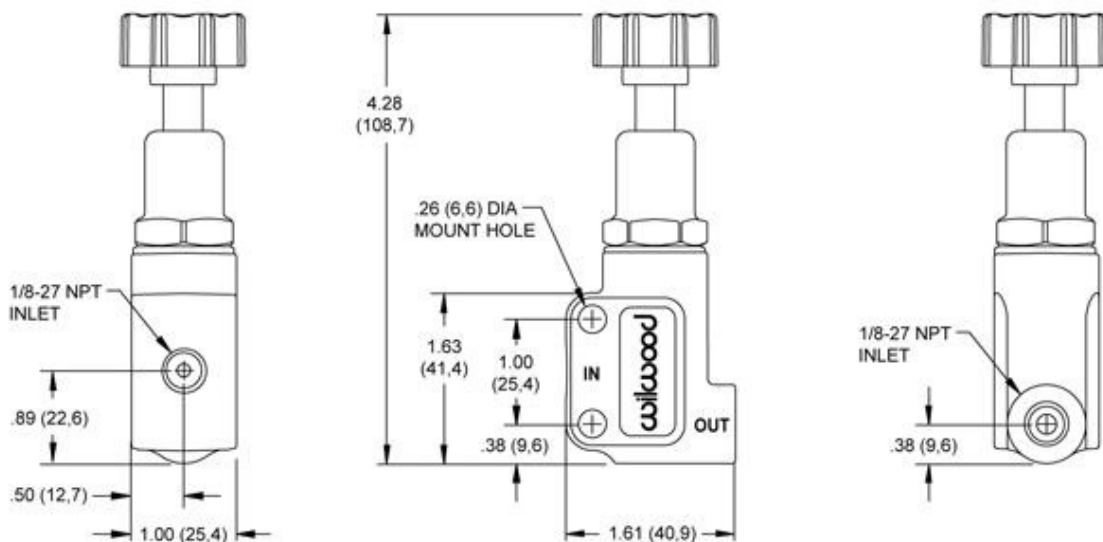


Figura 40 – Válvula proporcional.⁴⁰

Por fim, no projeto E8, foram desenvolvidas as novas planilhas de dimensionamento e dinâmica da frenagem. A planilha original foi desmembrada em três novas (Figura 41), cada uma possibilitando o projetista a melhorar o sistema em relação a uma das variáveis de frenagem. Com isso, foi possível a remoção da válvula proporcional, diminuindo a perda de carga do sistema e eliminando pontos de vazamento nas linhas de freio.

⁴⁰ Fonte: <http://www.wilwood.com/MasterCylinders/MasterCylinderValves.aspx> (Acesso em Junho de 2013).

Dimensionamento e Dinâmica da Frenagem

INPUTS			
Distância Entre-Eixos (mm)		Peso do Carro + Piloto (kg)	
1540		282	
Altura do CG (mm)		Pressão Inicial nas Linhas (MPa)	
340		2,3	
Distribuição das Cargas Estáticas (%)		Força Aplicada no Pedal (kg)	
Dianteira: 0,45	Traseira: 0,55	44	
Coeficiente de Atrito entre Pneu e Pavimento		Coeficiente de Atrito entre Pastilha e Disco	
1,4		0,55	
Aumento na Massa devido à Inércia Rotativa (%)		Raio Efetivo dos Discos (mm)	
1,15		Dianteiro: 67,5	Traseiro: 62,5
Raio do Conjunto Roda + Pneu (mm)		Diâmetro do Cilindro da Pinça (mm)	
228,6		Dianteiro: 44,5	Traseiro: 44,5
Eficiências (%)		Ganho do Pedal	
Pinça: 0,98	Pedal: 0,8	4,5	
OUTPUTS			
Transferência de Carga (%)		Pressão necessária nas Linhas (Mpa)	
0,18		Dianteira: 7,98	Traseira: 5,88
Forças de Frenagem por Eixo (N)		Ajuste no Brake Bias (%)	
Dianteiro: 2814,08	Traseiro: 1639,86	0,74	
Diâmetro do Cilindro Mestre (mm)		Balanço da Frenagem (Φ)	
Dianteiro: 15,875	Traseiro: 18,50	0,37	

Figura 41 – Uma das novas planilhas para dimensionamento do sistema, variável desejada: diâmetro dos cilindros mestres, projeto E8.⁴¹

⁴¹ Fonte: acervo da Equipe EESC-USP.

4. ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E EFEITOS NO PROJETO DO FÓRMULA® SAE

Com base na revisão bibliográfica e na descrição dos projetos desenvolvidos pela Equipe, foi possível dividir os componentes do sistema de freios em duas categorias: (a) elementos auxiliares; (b) elementos básicos. Foram chamados de elementos auxiliares aqueles que se tornam dispensáveis ao alterarmos as premissas do projeto, durante a fase de concepção deste. São exemplos: servofreio e válvula proporcional.

Devido às dimensões reduzidas do protótipo do Fórmula® SAE, sua massa total pode chegar a até 240kg (desconsiderando o piloto), aproximadamente $\frac{1}{4}$ da massa de um veículo automotivo comercial popular. Dessa forma, é possível desenvolver um sistema de freios com acionamento confortável apenas variando as relações de diâmetros do êmbolo da pinça e do cilindro mestre, sem que isso resulte em componentes com dimensões desproporcionais ao conjunto. Tal característica torna dispensável a utilização do servofreio no sistema. A válvula proporcional pode ser substituída, como explicado anteriormente, pela adoção de conjuntos de pinça dianteira com êmbolos maiores que os da traseira, por exemplo. Já os elementos básicos, são aqueles indispensáveis ao projeto, já que sua ausência implicará danos ao sistema, quase sempre na forma de falha na transmissão da força exercida pelo piloto. Assim, podemos afirmar que para ser eficaz, o sistema de freios da Equipe EESC USP de Formula SAE necessitará, no mínimo: pedal, brake bias bar, reservatório, cilindro mestre, mangueira hidráulica, pinça, pastilha, disco, pistão, gaxeta, parafuso sangrador, êmbolo e fluido.

A Figura 42, a seguir, nos mostra como esses componentes podem ser agrupados em subconjuntos dentro do sistema de freios.



Figura 42 – Divisão dos elementos básicos do sistema de freios.

Para a discussão a seguir, apenas foram considerados os elementos básicos do sistema de freios. Foram mesclados os conceitos referentes à FMEA de produto e de processo, em busca das prováveis causas de falha, a fim de evitar tanto as que aparecem devido às especificações do projeto, quanto aquelas decorrentes da execução da montagem e manutenção dos componentes do sistema.

4.1. Funções características dos componentes do sistema de freios

É possível organizar os elementos básicos do sistema de freios da Equipe EESC USP em uma árvore de funções (Figura 43). O objetivo desta imagem é facilitar a visualização do papel desempenhado por cada componente ao longo do processo de frenagem do veículo.

Atribuir um papel a cada componente do sistema de freios significa dizer que cada elemento pode ser descrito pela ação que ele executa no sistema, durante o processo de frenagem. Conhecer a ação a ser desempenhada pelo componente é uma das formas de antecipar possíveis falhas de execução do projeto

e de montagem, bem como nos auxilia a determinar o tipo de manutenção que o elemento necessitará.

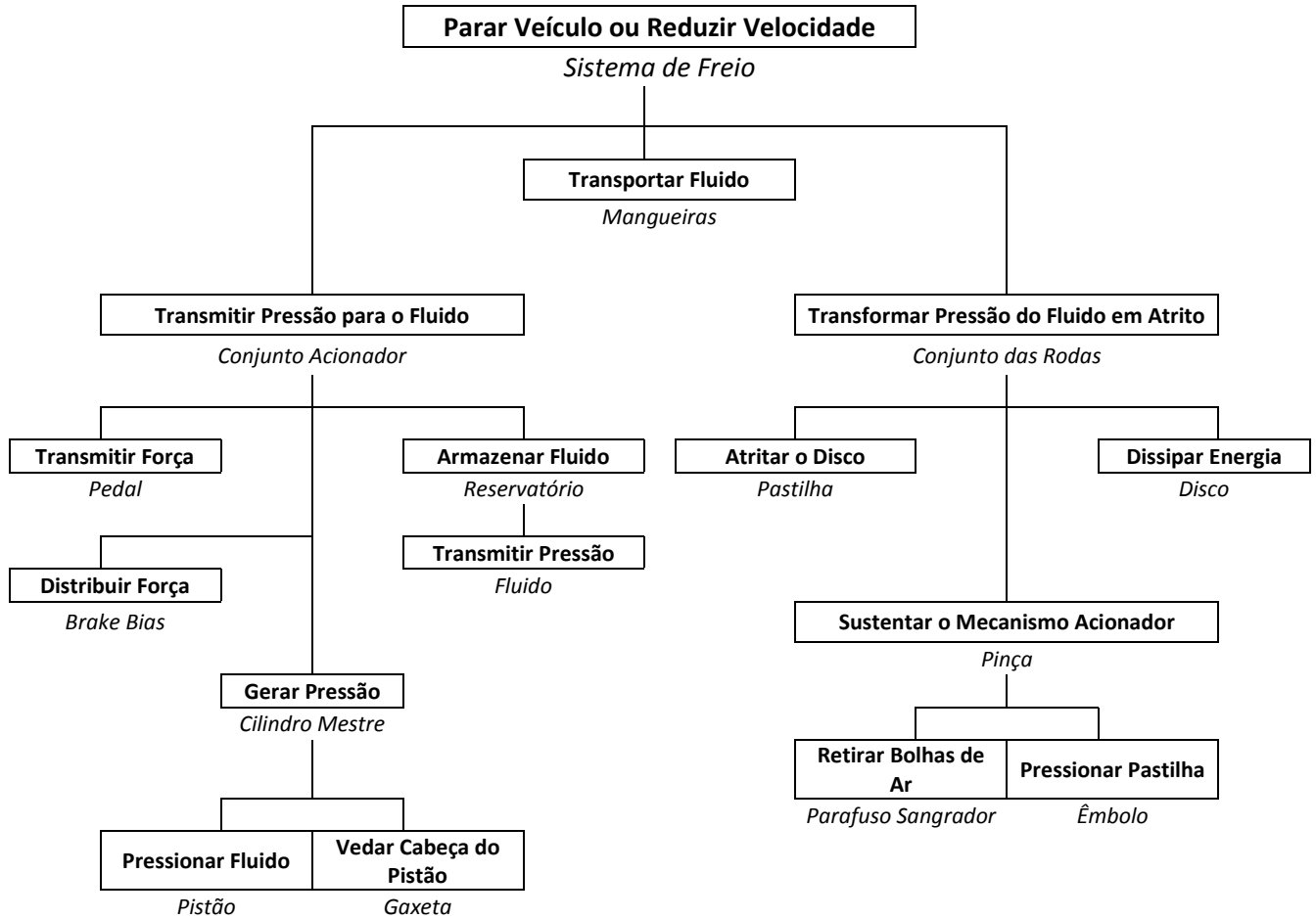


Figura 43 – Árvore de funções para os elementos básicos.

4.2. Modos de falha dos componentes do sistema de freios

Da observação da Figura 43 e do estudo das teorias de frenagem já apresentadas de imediato podemos listar os seguintes modos de falhas, relativos ao projeto:

- Pedal não transmite força suficiente;
- Cilindro mestre gera pressão inadequada;

- Fluido vaporiza-se nas linhas traseiras;
- Êmbolo aplica força inadequada nas pastilhas;
- Atrito gerado pela pastilha é insuficiente;
- Há sobreaquecimento no disco.

Da mesma forma, é possível citar aqueles referentes à instalação dos elementos:

- Ajuste incorreto do Brake Bias Bar;
- Vazamento nas linhas de fluido (mangueiras).

Contudo, para alguns elementos, não basta apenas ter conhecimento técnico sobre seu projeto e instalação para inferir automaticamente quais serão seus prováveis modos de falha. É o caso, por exemplo, da pinça flutuante que pode não se movimentar durante o acionamento do sistema de freios, sendo que esse modo de falha pode estar relacionado a um erro de paralelismo nos furos do componente da suspensão ao qual ela é fixada. Da mesma forma, as falhas devido a manutenção incorreta dos componentes, à primeira vista, também não são fáceis de serem listadas. Para tal, é necessário reunir o máximo de informações possíveis sobre as dificuldades encontradas durante o projeto, instalação, testes e manutenção dos diferentes sistemas anteriores ao que se está projetando.

A tabela 4 apresenta todos os modos de falhas que, ou foram previstos e evitados, ou que de fato aconteceram, ao longo dos dez projetos da Equipe, bem como a categoria (projeto, manufatura, instalação, manutenção) ao qual pertencem.

Tabela 4 – Modos de falha dos componentes do sistema de freios.

Componente	Função	Modo de Falha	Categoria
Pedal	Transmitir Força	Força Insuficiente	Projeto
Brake Bias	Distribuir Força	Flexão	
		Ajuste Incorreto	Instalação
Cilindro Mestre	Gerar Pressão	Pressão Não Adequada	Projeto
Pistão	Pressionar Fluido	Flambagem	
Gaxeta	Vedar Cabeça do Pistão	Desgaste do Componente	
Reservatório	Armazenar Fluido	Entrada de Bolhas de Ar no Sistema	Manutenção
Fluido	Transmitir Pressão	Vaporização	Projeto
Mangueiras	Transportar Fluido	Vazamento	Instalação
Pinça	Sustentar o Mecanismo Acionador	Não Flutua	Manufatura
Parafuso Sangrador	Retirar Bolhas de Ar do Sistema	Ruptura	Manutenção
		Não Retira Bolhas	Instalação
Êmbolo	Pressionar Pastilha	Travamento	Manutenção
		Força Insuficiente	Projeto
		Força Excessiva	
Pastilha	Atritar Disco	Desgaste Excessivo	Manutenção
		Atrito Insuficiente	Projeto
Disco	Dissipar Energia	Sobreaquecimento	

4.3. Efeitos das falhas e análise de severidade (S)

Supondo a seguinte situação: hoje é o primeiro teste livre do protótipo e será em uma rua larga, com espaço de retorno em ambas as extremidades, onde ele andará em linha reta, ida e volta, várias vezes, freando bruscamente em intervalos regulares. Após alguns minutos de teste, o *feedback* do piloto é: “a resposta do sistema está demorada, é necessário pisar muito para que o carro reduza a velocidade significativamente”. O piloto é o cliente do protótipo de Fórmula® SAE, dessa forma é necessário analisar cuidadosamente as observações relatadas por ele durante o teste.

A análise do piloto nos informa o efeito da falha, ou seja, é a resposta do sistema que pode ser mensurada, quando há mal funcionamento de alguns elementos. Para desenvolvermos a análise de severidade, utilizaremos duas perspectivas (Tabela 5): (a) piloto ou cliente; (b) aderências às regras da competição para as provas *Brake Test* e Enduro. A tabela 6 mostra o efeito de cada modo de falha e os índices de severidade (S) a eles atribuídos de acordo as referências contidas na Tabela 5.

Apesar de não ser uma prova de pontos corridos, o *Brake Test* é um evento de segurança na competição. Dessa forma, não ser aprovado nesta fase impede que a Equipe prossiga para a etapa dos eventos dinâmicos (*Aceleração, Skid Pad, Autocross* e Enduro). Porém, há alguns modos de falha que podem ser corrigidos durante a competição, tornando possível a aprovação no *Brake Test*, ainda que tardia. Já o Enduro é a prova de resistência; nela, espera-se que o circuito seja completado sem que ocorram falhas em quaisquer componentes do protótipo.

Tabela 5 – Critérios de severidade (S) sob perspectivas do piloto e das regras da competição.

SEVERIDADE (S)			
PILOTO	ÍNDICE	SEVERIDADE	CRITÉRIO
	1	Mínima	O piloto mal percebe que a falha ocorre.
	2	Pequena	Ligeira deteriorização do desempenho com leve desconforto.
	3	Moderada	Deteriorização significativa do desempenho com desconforto.
	4	Alta	Componente deixa de funcionar com grande desconforto.
	5	Muito Alta	Afeta a segurança do piloto.
COMPETIÇÃO	ÍNDICE	SEVERIDADE	CRITÉRIO
	1	Mínima	Não afeta o Brake Test ou Enduro.
	2	Pequena	Pode ser corrigida para o Brake Test e não afetará o Enduro.
	3	Moderada	Pode afetar o desempenho no Enduro.
	4	Alta	Desclassificação no Enduro.
	5	Muito Alta	Desclassificação no Brake Test.

Tabela 6 – Efeitos das falhas e seus índices de severidade (S)

Componente	Modo de Falha	Efeito	Severidade	
			Piloto	Competição
Pedal	Força Insuficiente	Cansaço do Piloto	3	3
Brake Bias	Flexão*	Torção do Pedal	1	4
	Ajuste Incorreto	Pressão Descompensada nas Rodas	3	2
Cilindro Mestre	Pressão Não Adequada	Frenagem Descompensada	4	5
Pistão	Flambagem*	Travamento do Pistão	5	4
Gaxeta	Desgaste do Componente	Vazamento de Fluido pela Tampa do Cilindro	1	4
Reservatório	Entrada de Bolhas de Ar no Sistema	Pressão Insuficiente nas Rodas	4	2
Fluido	Vaporização		4	5
Mangueiras	Vazamento		4	2
Pinça	Não Flutua**	Força exercida pelo Êmbolo não atinge o Disco	2	3
Parafuso Sangrador	Ruptura	Perda da Pinça	1	1
	Não Retira Bolhas	Pressão Insuficiente nas Rodas	4	2
Êmbolo	Travamento**	Força Exercida não Atinge o Disco	2	3
	Força Insuficiente	Cansaço do Piloto	3	3
	Força Excessiva	Desgaste Prematuro de Pastilhas e Discos	1	3
Pastilha	Desgaste Excessivo	Queda no Nível de Fluido	1	3
	Atrito Insuficiente	Roda não Desacelera	4	5
Disco	Sobreaquecimento	Perda das Propriedades do Material	1	3
		Virtrificação da Pastilha	4	3

* caso ocorra durante o *Brake Test*, a Equipe pode substituir os componentes e retornar à prova. Logo, seria uma falha índice 2.

** considerando que a falha ocorre em um único componente.

4.4. Causa da falha e análise de ocorrência (O)

Uma vez relatado os efeitos de cada falha, torna-se necessário investigar quais poderão ser as causas de cada um deles. É esta identificação que permitirá que o time proponha soluções adequadas, a fim de eliminar ou minimizar o desconforto relatado no *feedback* e evitar potenciais falhas catastróficas.

Na tabela 7 está descrito os critérios de probabilidade de ocorrer a causa da falha do componente. Tais critérios foram atribuídos de maneira subjetiva, tendo como base o histórico de falhas nos componentes do sistema de freios da Equipe durante os testes e competições. A tabela 8 nos mostra as principais causas dos modos de falha citados anteriormente e os índices de ocorrência (O) a eles atribuídos.

Tabela 7 – Critérios de ocorrência (O)

OCORRÊNCIA (O)		
ÍNDICE	OCORRÊNCIA	CRITÉRIO
1	Remota	Difícilmente acontecerá.
3	Moderada	Pode acontecer.
5	Muito Alta	É provável que aconteça.

Tabela 8 – Causas de falha e seus índices de ocorrência (O)

Componente	Modo de Falha	Causa	Ocorrência
Pedal	Força Insuficiente	Baixo fator Multiplicativo	1
Brake Bias	Flexão	Ausência de Rótula	3
	Ajuste Incorreto	Erro na Distribuição das Forças	3
Cilindro Mestre	Pressão Não Adequada	Erro de Projeto	1
Pistão	Flambagem	Erro na Escolha do Ponto de Pivotamento	3
Gaxeta	Desgaste do Componente	Acabamento Superficial Inadequado na Superfície Interna do Cilindro	5
Reservatório	Entrada de Bolhas de Ar no Sistema	Diminuição do nível de Fluido	5
Fluido	Vaporização	Escolha Inadequada	1
Mangueiras	Vazamento	Má instalação dos Conectores	5
Pinça	Não Flutua	Desalinhamento nos Furos da Manga	1
Parafuso Sangrador	Ruptura	Aperto Excessivo	3
	Não Retira Bolhas	Montagem da Pinça ao Contrário	3
Êmbolo	Travamento	Sujeira	3
	Força Insuficiente	Erro de Projeto	1
	Força Excessiva		
Pastilha	Desgaste Excessivo	Manutenção Tardia	3
		Força Excessiva	1
	Atrito Insuficiente	Material Inadequado	1
Disco	Sobreaquecimento	Erro no Dimensionamento, escolha do Material ou Tratamento Térmico	3

É importante ressaltar que, por ser um sistema de segurança, não é recomendado executar as etapas dinâmicas da competição com os mesmos componentes que já foram utilizados nos testes do protótipo, ou seja, itens como pastilhas, discos, gaxetas e fluido devem ser substituídos por elementos novos. Também é indicado que cilindros mestres, pistões e pinças sejam substituídos ou, ao menos, limpos. Caso essa troca não ocorra, os índices listados acima assumirão valores substancialmente mais elevados, podendo prejudicar o bom desempenho da Equipe no evento.

4.5. Controle dos modos de falha e detecção (D)

Controlar um modo de falha significa utilizar técnicas que permitam prevenir a ocorrência deste, seja por meio da detecção antecipada da provável causa ou pela modificação do mecanismo que poderia resultar na falha do componente. Esse controle pode ser efetuado, por exemplo, através de inspeções regulares dos elementos que compõem o sistema de freios.

Os critérios de detecção estão descritos na tabela 9. Já a tabela 10, descreve métodos de controle que podem ser utilizados para prevenir o modo de falha e os índices de detecção (D) atribuídos a ele. Tais índices descrevem a habilidade do time em, ocorrendo a falha, esta ser identificada fisicamente no sistema, bem como a capacidade de interpretar os efeitos relatados pelo piloto durante os testes e provas dinâmicas da competição.

Tabela 9 – Critérios de detecção (D)

DETECÇÃO (D)		
ÍNDICE	DETECÇÃO	CRITÉRIO
1	Muito Alta	Será detectada prontamente.
3	Moderada	Será detectada, porém após algum estudo.
5	Mínima	Difícilmente será detectada.

Tabela 10 – Controle das falhas e seus índices de detecção (D)

Componente	Modo de Falha	Controle	Deteção
Pedal	Força Insuficiente	Análise de Feedback	3
Brake Bias	Flexão	Visual	1
	Ajuste Incorreto	Medição com Paquímetro	1
Cilindro Mestre	Pressão Não Adequada	Análise de Feedback	3
Pistão	Flambagem	Visual	1
Gaxeta	Desgaste do Componente	Troca periódica	5
Reservatório	Entrada de Bolhas de Ar no Sistema	Visual – durante a Sangria	1
Fluido	Vaporização	Excesso de Bolhas de Ar na Sangria	5
Mangueiras	Vazamento	Inspeções periódicas nos conectores	1
Pinça	Não Flutua	Visual - durante a Sangria	1
Parafuso Sangrador	Ruptura	Sensibilidade - durante a Sangria	1
	Não Retira Bolhas	Visual - durante a Sangria	3
Êmbolo	Travamento		1
	Força Insuficiente	Análise de Feedback	3
	Força Excessiva	Medir Espessura das Pastilhas	
Pastilha	Desgaste Excessivo		1
	Atrito Insuficiente	Análise de Feedback	3
Disco	Sobreaquecimento	Visual	5*

* será detectado prontamente caso o sobreaquecimento seja tão elevado a ponto de deixar o material do disco com outra coloração, que não a de aço. Neste caso, o índice será 1.

4.6. Índice de prioridade de risco (R)

Por fim, a tabela 11 mostra os índices de prioridade de risco (R) para os modos de falha do sistema de freios, encontrados através da multiplicação de todos

os índices mencionados anteriormente. A partir da análise desse critério, é possível identificar os modos de falha dos componentes que necessitam atenção especial no projeto de freios da Equipe EESC USP. Estes terão maior índice.

Dessa forma, teremos:

$$R_P = S_P \times O \times D \quad (4.1)$$

$$R_C = S_C \times O \times D \quad (4.2)$$

Na qual, o sub-índice P refere-se aos dados para piloto e o sub-índice C, aos dados para competição.

Tabela 11 – Índice de prioridade de risco (R) para os modos de falha do sistema de freios.

Componente	Modo de Falha	Categoria	Risco	
			Piloto	Competição
Pedal	Força Insuficiente	Projeto	9	9
Brake Bias	Flexão		3	12
	Ajuste Incorreto	Instalação	9	6
Cilindro Mestre	Pressão Não Adequada	Projeto	12	15
Pistão	Flambagem		15	12
Gaxeta	Desgaste do Componente		25	100
Reservatório	Entrada de Bolhas de Ar no Sistema	Manutenção	20	10
Fluido	Vaporização	Projeto	20	25
Mangueiras	Vazamento	Instalação	20	10
Pinça	Não Flutua	Manufatura	2	3
Parafuso Sangrador	Ruptura	Manutenção	3	3
	Não Retira Bolhas	Instalação	36	18
Êmbolo	Travamento	Manutenção	6	9
	Força Insuficiente	Projeto	9	9
	Força Excessiva		3	9
Pastilha*	Desgaste Excessivo	Manutenção	3	9
	Atrito Insuficiente	Projeto	12	15
Disco*	Sobreaquecimento		60	45

* maiores valores de índice de risco obtidos para os casos, em ordem: desgaste excessivo devido à manutenção tardia das pastilhas e vitrificação de pastilha devido a sobreaquecimento do disco.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Resultados

A Figura 44 apresenta o FMEA completo do sistema de freios da Equipe EESC USP de Formula SAE, caracterizando-se como síntese do que foi discutido nesse capítulo.

Observando o descrito no capítulo 4, especialmente na tabela 11 da seção 4.6, percebemos que os componentes mais preocupantes para o sistema de freios são por ordem decrescente de índice de prioridade de risco:

- Desgaste da gaxeta durante competição;
- Sobreaquecimento dos discos, levando à vitrificação das pastilhas, tanto em testes quanto na competição;
- Montagem das pinças ao contrário, criando a condição de falsa sangria ao manter as bolhas de ar no sistema;
- Vaporização do fluido de freio;
- Presença de pontos de vazamento nas mangueiras hidráulicas.

Apesar de ser um componente simples, a gaxeta encontra-se totalmente oculta pelo cilindro mestre, dificultando sua inspeção visual cotidiana. O diâmetro interno do cilindro, com suas dimensões reduzidas, é um local onde é praticamente impossível manter a qualidade do processo de retificação por toda sua extensão, considerando somente técnicas de usinagem convencionais; além disso, o acabamento superficial nessa região acaba se degradando com o atrito causado pelo êmbolo do pistão durante os consecutivos movimentos de frenagem. Dessa forma, trocas periódicas da gaxeta se fazem necessárias, principalmente antes da chegada na competição.

A montagem das pinças de freio com o parafuso sangrador na parte mais baixa do componente é um erro decorrente de inexperiência na Equipe, já que as pinças comerciais são, em sua maioria, intercambiáveis entre os lados direito e esquerdo do veículo. Cabe, portanto, aos membros mais antigos orientar sobre qual a posição correta de instalação desse elemento no sistema.

A vaporização do fluido de freio aparece aqui listada devido à severidade da sua condição. Porém, só ocorrerá caso o time decida trocar o fluido DOT 4 (que é utilizado desde o primeiro projeto), indicado para o sistema de freios da Equipe, por outro tipo que não se enquadre nas condições de temperatura que as linhas do circuito traseiro estão expostos.

Os pontos de vazamento se originam da montagem incorreta dos conectores, tanto por problemas de fixação destes quanto por falta ou aplicação incorreta de veda-rosca, antes da montagem. Pode acontecer, eventualmente, a quebra dos filetes de rosca dos conectores, devido às sucessivas montagens decorrentes de manutenções no protótipo. Esta falha é contornável pela análise prévia das condições dos conectores e prudência no momento da instalação.

No caso dos discos de freio utilizados pela Equipe, caso os membros do time optem por continuar utilizando SAE 1045 na sua constituição, necessitam de análise térmica, na forma de simulação computacional e, mais efetivamente, construção de um banco de ensaios. Realizar um estudo de novos materiais, tratamentos térmicos e processos de fabricação também são alternativas válidas.

Por fim, a tabela 12, mostra possíveis soluções para todos os modos de falha apresentados no capítulo 4.

Componente	Função	Modo de Falha	Categoria	Efeito	Severidade		Causa	Ocorrência	Controle	Detecção	Risco	
					Piloto	Competição					Piloto	Competição
Pedal	Transmitir Força	Força Insuficiente Flexão	Projeto	Cansaço do Piloto	3	3	Baixo fator Multiplicativo Ausência de Rótula	1	Análise de Feedback Visual	3	9	9
				Torção do Pedal	1	4						
Brake Bias	Distribuir Força	Ajuste incorreto	Instalação	Pressão Descompensada nas Rodas	3	2	Erro na Distribuição das Forças	3	Medição com Paquímetro	1	9	6
Cilindro Mestre	Gerar Pressão	Pressão Não Adequada		Frenagem Descompensada	4	5	Erro de Projeto	1	Análise de Feedback	3	12	15
Pistão	Pressionar Fluido	Flambagem	Projeto	Travamento do Pistão	5	4	Erro na Escolha do Ponto de Pivotamento	3	Visual	1	15	12
Gaxeta	Vedar Cabeça do Pistão	Desgaste do Componente		Vazamento de Fluido pela Tampa do Cilindro	1	4	Acabamento Superficial Inadequado na Superfície Interna do Cilindro	5	Troca periódica	5	25	100
Reservatório	Armazenar Fluido	Entrada de Bolhas de Ar no Sistema	Manutenção		4	2	Diminuição do nível de Fluido	5	Visual - durante a Sangria	1	20	10
Fluido	Transmitir Pressão	Vaporização	Projeto	Pressão Insuficiente nas Rodas	4	5	Escolha Inadequada	1	Excesso de Bolhas de Ar na Sangria	5	20	25
Manguerias	Transportar Fluido	Vazamento	Instalação		4	2	Má insulação dos Conectores	5	Inspeções periódicas nos conectores	1	20	10
Pinça	Sustentar o Mecanismo Acionador	Não Flutua	Manufatura	Força exercida pelo Fmhoic não atinge o Disco	2	3	Desalinhamento nos Furos da Manga	1	Visual - durante a Sangria	1	2	3
Parafuso Sangrador	Retirar Bolhas de Ar do Sistema	Ruptura	Manutenção		1	1	Aparto Excessivo	3	Sensibilidade - durante a Sangria	1	3	3
		Não Retira Bolhas	Instalação	Pressão Insuficiente nas Rodas	4	2	Montagem da Pinça ao Contrário	3	Visual - durante a Sangria	3	36	18
Fmhoic	Pressionar Pastilha	Travamento	Manutenção	Força Exercida não Atinge o Disco	2	3	Sujeira	3		1	6	9
		Força Insuficiente	Projeto	Cansaço do Piloto	3	3		1	Análise de Feedback	3	9	9
Pastilha	Atritar Disco	Força Excessiva	Projeto	Desgaste Prematuro de Pastilhas e Discos	1	3	Erro de Projeto	3	Medir Espessura das Pastilhas	1	3	9
		Desgaste Excessivo	Manutenção	Queda no Nível de Fluido	1	3	Manutenção Tardia	3		1	3	9
Disco	Dissipar Energia	Atrito Insuficiente		Roda não Desacelera	4	5	Força Excessiva Material Inadequado	1	Análise de Feedback	3	12	15
		Sobreaquecimento	Projeto	Perda das Propriedades do Material Vitrificação da Pastilha	1	3	Erro no Dimensionamento, escolha do Material ou Tratamento Térmico	3	Visual	5	15	45
					4	3					60	45

Figura 44 – Análise FMEA completa do sistema de freios da Equipe EESC USP.

Tabela 12 – Propostas de soluções para prevenir os modos de falha.

Componente	Função	Modo de Falha	Soluções
Pedal	Transmitir Força	Força Insuficiente	Redefinir fator multiplicativo, na etapa de projeto.
Brake Bias	Distribuir Força	Flexão	Instalar um terminal rotular no ponto de acoplamento deste elemento com o pedal
		Ajuste Incorreto	Conferir cálculos
Cilindro Mestre	Gerar Pressão	Pressão Não Adequada	Conferir cálculos
Pistão	Pressionar Fluido	Flambagem	Garantir ponto de pivotamento coincidindo com a linha de acionamento
Gaxeta	Vedar Cabeça do Pistão	Desgaste do Componente	Trocas periódicas
Reservatório	Armazenar Fluido	Entrada de Bolhas de Ar no Sistema	Manter nível de fluido
Fluido	Transmitir Pressão	Vaporização	Trocar tipo de fluido
Mangueiras	Transportar Fluido	Vazamento	Inspeção dos elementos durante a instalação
Pinça	Sustentar o Mecanismo Acionador	Não Flutua	Utilização de gabarito para medir paralelismo entre furos da manga
Parafuso Sangrador	Retirar Bolhas de Ar do Sistema	Ruptura	Utilização de torquímetro
		Não Retira Bolhas	Inspeção dos elementos antes de começar a sangria
Êmbolo	Pressionar Pastilha	Travamento	Limpezas periódicas
		Força Insuficiente	Conferir cálculos
		Força Excessiva	Conferir cálculos
Pastilha	Atritar Disco	Desgaste Excessivo	Trocas periódicas
		Atrito Insuficiente	Trocar tipo de material de atrito
Disco	Dissipar Energia	Sobreaquecimento	Realizar análise térmica do componente

5.2. Conclusões

Foi mostrado nesse trabalho que é possível determinar quais os pontos críticos que devem ser tratados com maior cautela durante o projeto do sistema de freios, sua implementação, manutenção e testes. Porém, a utilização da ferramenta FMEA é apenas possível se o projetista tiver acesso aos dados de todas as fases do projeto, sendo imprescindível o conhecimento do histórico dos projetos anteriores e os porquês de suas soluções.

Dessa forma, espera-se que o presente trabalho tenha se constituído como arquivo de projeto de sistema de freios da Equipe de Formula SAE da EESC USP bem como uma introdução ao desenvolvimento de sistemas de frenagem e aplicação da metodologia FMEA.

5.3. Recomendações para trabalhos futuros

É fundamental que as próximas gerações de membros da Equipe continuem com as análises FMEA em todos os projetos de sistemas de freio após o E8. Tais análises se constituirão, não somente, em arquivos de projetos, mas principalmente em fundamentos de análise de possíveis modificações.

Seria de grande valia se os demais subsistemas componentes do projeto realizassem análises como esta, documentando concepções de projetos, testes, validações e, principalmente, as falhas que ocorreram durante os anos. Dessa forma, as futuras gerações de alunos do Formula SAE da EESC USP terão acesso a um material de qualidade que possibilitará o desenvolvimento de membros e aprimoramento dos projetos em menor tempo, diminuindo a probabilidade de ocorrer redundâncias no referente a falhas já presenciadas em trabalhos anteriores.

REFERÊNCIAS

Fornari, C. C. M. Jr (2010) **Aplicação da Ferramenta da Qualidade (Diagrama de Ishikawa) e do PDCA no Desenvolvimento de Pesquisa para a reutilização dos Resíduos Sólidos de Coco Verde**. Acesso em 01 de Julho de 2013. Disponível em: http://ingepro.web399.kinghost.net/Publ_2010/Set/307-836-1-PB.pdf.

Juran, J.M; Gryna, F. M. (1993) **Controle de qualidade: Métodos especiais de apoio à qualidade**. vol. VII. São Paulo: McGrawHill.

Juvinall, R. C.; Marshek, K. M. (2006) **Projeto de Componentes de Máquinas**. Editora: LTC. 4ª Edição. p 405 – 419.

Kawaguchi, H. (2005) **Comparação da Análise de Conforto de Frenagem Subjetiva x Objetiva de um Veículo de Passeio**. Dissertação de Mestrado Profissional. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 101p.

Limpert, R. (1999) **Brake Design and Safety**. SAE International, Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, Pa. 2ª edição.

Neves, T. R. (2007) **O Sistema de Freios de um Formula SAE e seu Dimensionamento**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 15p.

Norton, R. L. (2004) **Projeto de Máquinas**. Editora: Bookman. 2ª Edição. p 817 – 834.

Silvestre, P.H. de A. (2012) **Estudo da rigidez dinâmica de um componente estrutural automotivo utilizando otimização topológica**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 70p.

Teixeira, C. A. R. (2004) **A confiabilidade como fator de valor na melhoria de produtos. Estudo de caso: sistema de embreagem automotiva**. Dissertação de mestrado profissional. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. 113 p.

Toyota Motor Corp. (2000) **Manual for the 1997-00 series of Toyota Trucks.** Acesso em 20 de novembro de 2012. Disponível em: http://arcc.epnet.com/autoapp/9316/9316ch09_REMOVAL_INSTALLATIO3.htm.

TRW Automotive Braking System (2011).

Werkema, M. C. C. (1995) **As Ferramentas da Qualidade no Gerenciamento de Processos.** vol I. Editora: Werkema.

<http://www.fras-le.com.br> (Acesso em Junho de 2013).

<http://www.tecnopower-mg.com.br/?products=freio-eletromagnetico-monodisco> (Acesso em Junho de 2013).

<http://www.jalopnik.com.br> (Acesso em Junho de 2013).

<http://f1visaotecnica.files.wordpress.com> (Acesso em Junho de 2013).

<http://image.mustangmonthly.com> (Acesso em Junho de 2013).

<http://cadvital.wordpress.com> (Acesso em Junho de 2013).

<http://www.sobreadministracao.com/wp-content/uploads/2011/06/ciclo-pdca.jpg> (Acesso em Julho de 2013).

http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/FMEAv2.html (Acesso em Julho de 2013).

<http://agente.epse.com.br/banasqualidade/qualidade28281021282828.PDF> (Acesso em Julho de 2013).

<http://www.vedatec.com.br/gaxetas.htm> (Acesso em Junho de 2013).

http://www.wilwood.com/Images/MasterCylinders/Master%20Cylinder_Drawings-Large/260-2636_dwg-lg.jpg (Acesso em Julho de 2013)

<http://www.fmcsa.dot.gov/rules-regulations/administration/fmcsr/fmcsrruletext.aspx?reg=571.116> (Acesso em Junho de 2013).

<http://www.wilwood.com/Calipers/CaliperList.aspx?subname=Dynalite%20Single%20Floater> (Acesso em Junho de 2013).

<http://www.wilwood.com/BrakePads/BrakePadsApp.aspx?compound=PolyMatrix%20A> (Acesso em Junho de 2013).

<http://www.wilwood.com/MasterCylinders/MasterCylinderValves.aspx> (Acesso em Junho de 2013).

<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/> (Acesso em Junho de 2013).

ANEXOS

ANEXO A – As regras da competição para o sistema de freios

Por ser de uma competição estudantil, a SAE *International* publica, anualmente, um conjunto de regras⁴² a fim de garantir a segurança do evento e de todos que dele participam. Para o sistema de freios dos protótipos participantes, fica estipulado como segue:

PARTE T – REQUISITOS TÉCNICOS GERAIS

ARTIGO 7: SISTEMA DE FREIO

T7.1 Sistema de Freio – Geral

O carro deve ser equipado com um sistema de freio que age nas quatro rodas e é acionado por controle único.

T7.1.1 Deve possuir dois (2) circuitos hidráulicos independentes para que se tenha, caso ocorra falha em qualquer ponto do sistema, uma frenagem efetiva em pelo menos duas (2) das rodas. Cada circuito hidráulico deve possuir sua própria reserva de fluido, seja pelo uso de reservatórios diferentes ou pelo uso de um em conjunto, do tipo OEM.

T7.1.2 Um freio único acoplado no diferencial da transmissão é aceitável.

T7.1.3 O sistema de freio deve ser capaz de travar as quatro (4) rodas durante o teste especificado abaixo.

⁴² Fonte: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/> (Acesso em Junho de 2013).

T7.1.4 Freios do tipo *Brake-by-wire* são proibidos.

T7.1.5 Linhas de freio feitas de plástico e desencapadas são proibidas.

T7.1.6 O sistema de freio deve ser protegido por um escudo de proteção contra falhas do sistema de transmissão ou colisões pequenas.

T7.1.7 Visto lateralmente, nenhum componente do sistema de freio que está montado na parte suspensa do carro pode se projetar abaixo da superfície mais baixa do chassi.

T7.1.8 O pedal de freio deve ser projetado para suportar uma força de 2000N sem que nenhuma falha aconteça ao sistema de freio ou ao pedal. Isso poderá ser testado por um oficial da competição quando sentado normalmente e pressionando o pedal com a maior força que conseguir.

T7.1.9 O pedal de freio deve ser fabricado utilizando-se aço ou alumínio, ou usinado a partir do aço, alumínio ou titânio.

T7.2 Brake Test

T7.2.1 O sistema de freio será testado dinamicamente e deve demonstrar capacidade de travar as quatro (4) rodas e parar completamente o veículo em linha reta ao final de uma corrida especificada pelos inspetores de freio.

T7.3 Brake Over-Travel Switch

T7.3.1 Uma chave elétrica deverá ser instalada no pedal de freio, ligada em série ao comando de desligamento do motor. Esta chave deve ser instalada para que, caso ocorra uma falha catastrófica no sistema de freio, o curso ampliado do pedal seja capaz de acioná-la resultando no desligamento do motor, como definido no artigo 4 da seção IC, para veículos a combustão.

T7.3.2 O simples retorno dessa chave para a posição inicial não deve ser capaz de restaurar o circuito elétrico e ela deve ser posicionada de forma que o piloto não seja capaz de alcançá-la.

T7.3.3 A chave deve ser de controle analógico.

T7.3.4 A chave deve ser mecânica, de contato único e de duas posições, como mostrada abaixo.

T7.4 Luz de Freio

T7.4.1 o carro deve ser equipado com uma luz de freio vermelha. O componente deve possuir fundo preto e ser retangular, triangular ou de formato semi circular, com uma área mínima de 15cm². Cada luz de freio deve ser visível da traseira do veículo sob luz do sol.

T7.4.2 Este componente deve ser fixado, verticalmente, entre o eixo das rodas traseiras e os ombros do piloto e, horizontalmente, na altura da linha de centro do veículo, aproximadamente.

Além das regras específicas citadas acima, os artigos abaixo, referentes à segurança, também são aplicáveis aos elementos do sistema de freios:

PARTE D – REGRAS PARA AS PROVAS DINÂMICAS

ARTIGO 1: PROVAS DINÂMICAS E PONTUAÇÃO MÁXIMA

D1.1 Integridade do Veículo e Desqualificação

D1.1.1 Durante as provas dinâmicas, a integridade mecânica do veículo deverá ser mantida.

D1.1.2 Quaisquer condições do veículo que puderem comprometer sua integridade, condições da pista ou a segurança dos participantes como, por exemplo, quebra nos componentes da suspensão, freios ou direção, vazamento de fluidos, arrasto de carenagens, perda ou afrouxamento de componentes, serão razões válidas para suspensão da equipe por parte dos juízes até que o problema seja resolvido.

Obs: se acontecer durante o Enduro, acarretará em desclassificação da prova.