

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

**FMEA e FTA aplicado a um sistema de
frenagem de um veículo de Competição
Universitária.**

Autor: Daniel Ramos Sampaio
Orientador: Prof. Mário de Oliveira Andrade

Brasília, DF
2017



Daniel Ramos Sampaio

**FMEA e FTA aplicado a um sistema de frenagem de um
veículo de Competição Universitária.**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Mário de Oliveira Andrade

Brasília, DF

2017

Daniel Ramos Sampaio

FMEA e FTA aplicado a um sistema de frenagem de um veículo de Competição
Universitária./ Daniel Ramos Sampaio. – Brasília, DF, 2017-
89 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Mário de Oliveira Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2017.

1. Freios. 2. Fmea. I. Prof. Mário de Oliveira Andrade. II. Universidade de
Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. FMEA e FTA aplicado a um sistema de
frenagem de um veículo de Competição Universitária.

CDU 02:141:005.6

Daniel Ramos Sampaio

FMEA e FTA aplicado a um sistema de frenagem de um veículo de Competição Universitária.

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 01 de julho de 2017:

Prof. Mário de Oliveira Andrade
Orientador

Prof. Evandro Leonardo Silva Teixeira
Convidado 1

Prof. Saleh Barbosa Khalil
Convidado 2

Brasília, DF
2017

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus pais por todo o apoio fornecido durante a jornada de graduação e pelo incentivo contínuo aos meus estudos. Também gostaria de agradecer a Gabriela, minha namorada, pelas revisões textuais, apoio e carinho ao longo desta jornada.

Aos colegas formados durante a graduação, principalmente aqueles da equipe Apuama Racing que me acompanharam em mais da metade da jornada e que dividiram muitas noites em claro e muito entusiasmo para atingir grandes resultados e caminhos distantes.

Resumo

No intuito de oferecer uma complementação aos estudos dos estudantes de engenharia, diversas competições universitárias como a Fórmula SAE e o Baja foram desenvolvidos, tendo como características um trabalho extraclasse, com capacidade de retratar a realidade do setor automotivo. A alta competitividade nos setores automotivos exige, cada vez mais, confiabilidade e qualidade dos produtos, e estes dois requisitos podem ser atingidos reduzindo o número de falhas em projetos e processos. A redução de falhas e otimização de sistemas está presente tanto na indústria automotiva quanto na produção de veículos em menor escala, como veículos de competição ou protótipos. Ferramentas como FMEA (*failure mode effect and analysis* -Análise do Modo de falha e seus efeitos) e FTA (*Fault Tree Analysis* -Análise da árvore de falhas), que auxiliam na análise de falhas, são importantes por aumentarem a confiabilidade do produto e documentarem as falhas, seus efeitos, suas causas e ainda, pelo fato de mostrar suas relações, possibilitando que melhorias sejam realizadas baseadas nesses dados. O objetivo deste trabalho é analisar as falhas do sistema de freios de um veículo de competição universitária a partir das ferramentas FTA e FMEA. Descobertas as falhas que apresentam maior risco serão propostas ações de melhoria.

Palavras-chaves: Freios. Fmea. Fta. Falhas.

Abstract

In order to provide a complement to the study of engineering students, several academic competitions like FSAE and baja were developed, having characteristics like extra class work, with the ability of portray the automotive sector. The high competitiveness in the automotive sector demands, increasingly, reliability and product quality. These two requirements can be achieved by reducing the number of failures in projects and processes. The failure reduction and the system optimization is present in the automotive industry and in the smaller scale production of vehicles, such as racing cars or prototypes. Tools such as FMEA (failure mode effect and analysis) and FTA (Fault Tree Analysis), which support in the failure analysis, are important for increasing the reliability of the product, register failures, their effects, their causes and because it show their relations, enabling improvements to be made based on these data. The objective of this study is to analyze the brake system failure of a FSAE vehicle based on FMEA and FTA. Found failures with higher NPR improvement action will be proposed.

Keywords: Brakes. FMEA. FTA. Failures.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Metodologia	20
Figura 2 – Regra Decimal.	23
Figura 3 – Diagrama de fluxo de tipos de componentes.	31
Figura 4 – Freio a disco.	32
Figura 5 – Razão de pedal.	34
Figura 6 – Cilindro mestre simples.	36
Figura 7 – Cilindro mestre duplo.	36
Figura 8 – Fluido de freio DOT.	38
Figura 9 – Carro Apuama Racing.	41
Figura 10 – Formato circuito hidráulico.	42
Figura 11 – Simulação térmica discos de freio	45
Figura 12 – Pinça dianteira	46
Figura 13 – Pinça traseira	46
Figura 14 – Gráfico pastilhas de freios	47
Figura 15 – Simulação do pedal de freio	48
Figura 16 – Pedal de freio	48
Figura 17 – Conjunto balance bar cilindro mestre	49
Figura 18 – Cilindro mestre wilwood	50
Figura 19 – Pedal box	51
Figura 20 – Conjunto acionador e de frenagem	53
Figura 21 – Falha de ajuste do pedal box	54
Figura 22 – Falha estrutural do pedal box	55
Figura 23 – Quebra ou empenamento do pedal de freio	56
Figura 24 – Falhas da bias bar	57
Figura 25 – Vazamento na linha de freio	58
Figura 26 – Falhas do cilindro mestre	59
Figura 27 – Falha da pinça	60
Figura 28 – Falha da pastilha	60
Figura 29 – Travamento do disco de freio	61
Figura 30 – Falha do disco de freio	62
Figura 31 – Falhas com maior prioridade	77

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela árvore de falhas.	27
Tabela 2 – Etapas da competição	40
Tabela 3 – Componentes do sistema de freio.	42
Tabela 4 – Funções e requisitos.	43
Tabela 5 – Inputs para o dimensionamento do sistema.	44
Tabela 6 – Outputs do sistema.	45
Tabela 7 – Avaliação da severidade	63
Tabela 8 – Severidade dos componentes	64
Tabela 9 – Avaliação da ocorrência	65
Tabela 10 – Avaliação da ocorrência sistema acionador de pedais	66
Tabela 11 – Avaliação da ocorrência sistema acionador hidráulico	67
Tabela 12 – Avaliação da ocorrência Conjunto de frenagem	68
Tabela 13 – Controle de detecção	69
Tabela 14 – Detecção pedal box e pedais	70
Tabela 15 – Detecção sistema acionador hidráulico	71
Tabela 16 – Detecção sistema de frenagem	72
Tabela 17 – FMEA pinça de freio.	73
Tabela 18 – FMEA pastilha de freio.	74
Tabela 19 – FMEA disco de freio.	74
Tabela 20 – FMEA pedal box.	75
Tabela 21 – FMEA pedal de freio.	75
Tabela 22 – FMEA cilindro mestre.	76
Tabela 23 – FMEA linha de freio.	76
Tabela 24 – FMEA Balance bar.	77

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.2	Metodologia	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Qualidade e confiabilidade: Segundo a ótica de falhas	21
2.2	Análise do Modo de Falha e seus Efeitos: FMEA	22
2.2.1	FTA- (Fault Tree Analysis)-Árvore de Análise de Falhas	26
2.2.2	Integração entre FMEA e FTA	28
2.3	Sistema de Frenagem	30
2.3.1	Tipos de sistemas de frenagem	31
2.3.2	Componentes do sistema de frenagem	32
2.3.2.1	Freio a disco	32
2.3.2.2	Pedal de freio	33
2.3.3	Hidro vácuo	35
2.3.3.1	Cilindros mestre	35
2.3.3.2	Linhas de freio e conexões	36
2.3.3.3	Fluidos de freio	37
3	ESTUDO DE CASO	39
3.1	Fórmula SAE	39
3.2	Sistema de Frenagem da Equipe Apuama Racing	41
3.2.1	Disco de freio	44
3.2.2	Pinça e Pastilha	46
3.2.3	Pedal de freio	47
3.2.4	Balance bar	49
3.2.5	Cilindro mestre e linhas de freio	49
3.2.6	Pedal box	50
4	ANÁLISE DAS FALHAS	53
4.1	Análise de árvore de falhas	54
4.2	Análise dos efeitos e da severidade de cada falha	63
4.3	Deteção de falhas e controles preventivos	69
5	RESULTADOS	73
6	CONCLUSÃO	81

REFERÊNCIAS	83
ANEXOS	85
ANEXO A – REGRAS DA FSAE PARA O SISTEMA DE FRENA- GEM	87

1 Introdução

A evolução constante no nível de qualidade e confiabilidade dos produtos, bem como a alta competitividade das indústrias automobilísticas gerou, no mercado, uma necessidade de reduzir as falhas, os custos e o tempo que são demandados em um projeto. De acordo com Masing, “80% de todas as falhas são devidas ao desenvolvimento, projeto e planejamento deficientes. 60% de todas as quebras dentro do período de garantia tem sua origem em desenvolvimentos imaturos e falhos” (MASING, 1994 apud PAHL, 2005),p.355).

A identificação de falhas está presente nos diversos setores desde os artesãos, que visavam entregar produtos que cumprissem os seus requisitos básicos de uso. Porém, o avanço das tecnologias e o aumento da complexidade em projetos e processos, fez com que o uso de ferramentas que oferecem um maior apoio ao estudo e análise de falhas fosse necessário.

Uma dessas ferramentas é o FMEA (*Failure Mode Effect and Analysis*) que consiste em uma metodologia analítica, na qual se avalia as falhas que possam vir a surgir durante o desenvolvimento de um processo ou projeto. Tal ferramenta apresenta vantagens como: diminuição de custo; aumento da confiabilidade de produtos; implementação de melhorias baseadas em dados; catalogação das informações sobre as falhas; documentação das falhas; suas causas e a obtenção de um número de prioridade de risco (NPR) para cada falha (IQA, 2008).

Além dessas, o FMEA é utilizado na indústria automotiva, já que possui um caráter obrigatório regulamentado pela norma QS-9000. Trata-se de uma norma criada para o setor automotivo e seus fornecedores pelas principais montadoras da década de 90 nos Estados Unidos, tais como a Ford, GM e Chrysler. Atualmente esta norma é responsável por definir parâmetros de qualidade dos produtos das diversas montadoras e seus fornecedores (HECKERT; FRANCISCHINI; ROTONDARO, 1998).

Outra ferramenta que pode ser utilizada é a FTA (*Fault Tree Analysis*), que trabalha a partir de uma falha, de maneira a encontrar as possíveis causas do problema. Sendo possível realizar um maior detalhamento de cada falha e suas origens, deixando o número de prioridade de risco obtido no FMEA mais preciso (LIMA; FRANZ; AMARAL, 2006).

Ambas as ferramentas têm o uso tanto na indústria quanto em projetos de menor escala. Alguns desses projetos são as competições universitárias, criadas pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), dentre elas o Baja e a fórmula SAE. Ambas competições foram criadas com o intuito de fornecer aos estudantes de engenharia a oportunidade de aplicar os conhecimentos adquiridos em sala na prática. No caso da fórmula SAE, por exemplo,

se tem o desenvolvimento de um pequeno carro de corrida estilo fórmula, desde o projeto até sua construção (SAE, 2016).

A competição de fórmula SAE é um evento de âmbito internacional, constituída basicamente de três etapas, as provas estáticas, em que se tem a apresentação dos projetos, a inspeção técnica, onde o carro é validado por juízes e as provas dinâmicas, no qual o carro é testado na pista (SAE, 2016).

Um dos sistemas projetados pelos estudantes é o sistema de frenagem que tem um caráter de segurança, sendo assim um dos que mais necessita qualidade e confiabilidade. Sendo este de extrema importância para a integridade dos pilotos e do próprio veículo de tal maneira que, na competição existe uma prova específica que avalia tal sistema. Essa prova tem como objetivo validar o funcionamento do freio, sendo aprovado o carro que travar as quatro rodas simultaneamente. Caso o veículo não passe nessa prova fica impedido de competir nas demais, além disso, fica comprovado que tal sistema apresenta problemas. Dessa forma é necessário encontrar as presentes e as possíveis falhas do sistema e com isso eliminá-las ou, pelo menos, reduzir o seu grau de risco.

O uso de materiais e métodos para a avaliação de falhas dentro de um projeto aumenta a sua qualidade, confiabilidade e oferece melhores recursos para a otimização do projeto. Além disso, com o uso dessas ferramentas há o enriquecimento do aprendizado dos alunos nas áreas de concepção, dimensionamento e otimização do veículo.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar as falhas do sistema de frenagem de um veículo de competição universitária, utilizando FMEA e FTA.

Para isso foram definidos os seguintes objetivos secundários:

- Identificar as principais falhas do sistema e seus efeitos.
- Encontrar as possíveis causas das falhas.
- Encontrar um número de prioridade de risco para cada falha.

A partir dos objetivos definidos, este trabalho tem como intuito responder a tais perguntas:

- Quais são as falhas existentes dentro do projeto de freios da equipe de fórmula SAE a combustão da UnB?
- Quais são as possíveis soluções para as falhas encontradas pelo FMEA e FTA?
- As duas ferramentas escolhidas são ideais para o tipo de análise?

1.2 Metodologia

Baseado no estudo do referencial teórico foram encontradas duas ferramentas utilizadas para o diagnóstico de falhas, que são o FMEA e o FTA. Sendo assim a primeira etapa consistira em descrever as ferramentas e alguns conceitos básicos de qualidade e confiabilidade. Conhecendo as ferramentas e seus principais conceitos, será explicitado um projeto, um sistema que possa ser analisado e que tenha a necessidade de identificação de falhas de maneira a solucionar os principais defeitos.

Neste trabalho será analisado um sistema de frenagem para um veículo de FSAE da equipe a combustão da Universidade de Brasília, que é crítico para o funcionamento do veículo e para a segurança do piloto. Definido o sistema serão estudados seus componentes, de maneira que seja possível entender suas funções, requisitos, como foram projetados e fabricados.

Em seguida, se terá a aplicação do FTA, de maneira a encontrar as principais falhas e como elas se desencadeiam em diversos eventos. Encontrado os eventos base, aqueles que podem vir a originar falhas maiores, se terá a aplicação do FMEA. Ao aplicar o FMEA nos eventos base da FTA serão encontrados dados como índices de severidade, ocorrência e detecção de uma falha.

A partir das tabelas prontas e das árvores realizadas, será calculado um número de prioridade de risco (NPR). Este NPR é calculado pela multiplicação dos índices de severidade, ocorrência e detecção das tabelas do FMEA revisadas, desta forma se terão dados de quais falhas podem ser mais críticas para o sistema e quais devem ser priorizadas com uma solução.

Por fim será feita uma análise, do uso de duas ferramentas de maneira a identificar se o seu uso foi satisfatório e se a partir de ambas foi possível atingir os objetivos inicialmente definidos. Como essa metodologia de aplicação do FMEA e depois do FTA se dá de modo cíclico, podendo ser revisado continuamente em trabalhos futuros. A seguir é apresentando um fluxograma que exemplifica esta utilização e a sequência de trabalho.

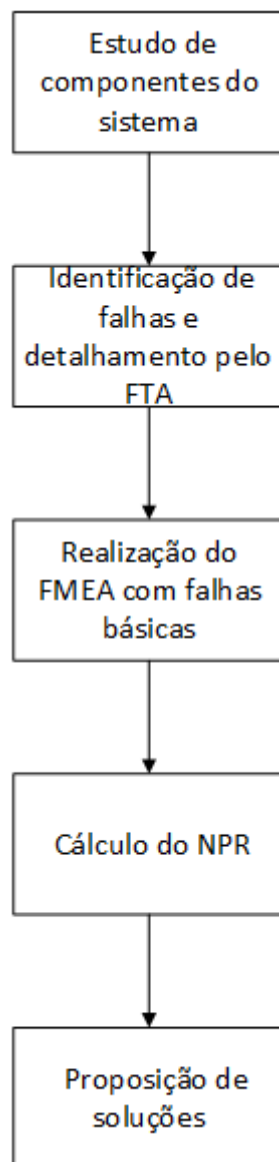


Figura 1 – Metodologia

2 Referencial Teórico

2.1 Qualidade e confiabilidade: Segundo a ótica de falhas

A qualidade é um parâmetro que pode ser medido de diversas formas e pode ter várias definições dependendo do setor ou do que está sendo analisado. Por exemplo, para um cliente, um item de qualidade pode ser um produto que nunca apresente falhas já para outro pode ser um produto com melhor acabamento (JURAN, 1998).

Apesar de ter várias definições Juran cita duas principais, a primeira é que a qualidade é um atributo que relaciona as características de um produto com as necessidades do cliente e a sua satisfação, possibilitando, a companhia se tornar mais competitiva. Sendo a segunda aquela que define qualidade como a ausência de falhas, ou a entrega do produto ao mercado com tempo reduzido (JURAN, 1998).

Segundo Lemes, o conceito de confiabilidade também está associado a falhas, podendo ser definido como uma grandeza mensurável que analisa eventos de falhas e assim, ter o conceito de tempo médio entre falhas ou tempo no qual se espera que um produto venha a falhar. Deste modo, um produto que não apresente falhas ou apresente baixa taxa de falhas, pode ser definido como um produto confiável (LEMES, 2006).

Analisando os dois conceitos é possível notar que a falha é um fator importante a ser estudado quando se deseja qualidade e confiabilidade. Tendo como principais objetivos diminuir a incidência durante o desenvolvimento de produtos, nos processos de fabricação e o de tornar as diversas organizações e empresas competitivas a longo prazo.

Uma maneira de atingir uma maior competitividade é através da melhoria contínua, que consiste no aperfeiçoamento das operações. Estes aperfeiçoamentos podem ser formados basicamente de melhorias em produtos ou mudanças de suas características, gerando assim, um melhor atendimento ao consumidor e conseqüentemente eliminando as falhas (JURAN, 1998).

Essa melhoria pode ser atingida através de ciclos de trabalho como é feito com o PDCA, que é uma ferramenta de gestão utilizada para melhoria contínua. Essa ferramenta é dividida em quatro partes: *plan*, *do*, *check*, *act* (BATALHA, 2008).

Na primeira etapa, que consiste na identificação de problemas, análise de processos e criação do plano de ação. Se tem o uso de algumas ferramentas para coletar dados e realizar análises, tais como: fluxogramas, diagramas de causa e efeito, diagrama de Pareto, FMEA, FTA, *Brainstorm*, análise competitiva, análise de valor (JURAN, 1998).

Entretanto ao se utilizar essas ferramentas no setor automotivo e especificamente

no uso de detecção de falhas as mais utilizadas são o FMEA e o FTA. Isso se dá pelo fato de serem próprias para analisar falhas, por terem regras bem definidas, metodologias de implementação e por serem utilizadas por diversas montadoras e seus fornecedores (LIMA; FRANZ; AMARAL, 2006). Como as duas ferramentas podem ser utilizadas em conjunto ou separadas, serão explicadas a seguir.

2.2 Análise do Modo de Falha e seus Efeitos: FMEA

Segundo o manual de referência do FMEA, este pode ser definido como uma metodologia analítica que visa assegurar que os problemas potenciais ou as falhas tenham sido consideradas e abordadas ao longo do desenvolvimento do produto e dos processos. Tendo como resultado mais explícito a documentação final, que é de conhecimento coletivo das equipes multifuncionais. Sendo considerado como uma ferramenta, um compromisso de longa data, que deve ser otimizado, analisado e se necessário alterado continuamente (IQA, 2008).

De acordo com Carlson o FMEA foi utilizado pela primeira vez nos Estados Unidos em 1949 pelas forças armadas, entretanto se tornou popular em 1960 quando foi utilizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) na missão Apollo. Já em meados de 1970, a Ford começou a usá-la na indústria automobilística. Tendo como objetivo básico o aumento da regulamentação e a segurança dos automóveis. Com o passar do tempo foi se tornando uma ferramenta com utilização mais ampla nas diversas indústrias como no setor de aviação, nuclear e de fornecedores da área automotiva (CARLSON, 2012).

O FMEA na indústria automobilística foi definido como sendo uma ferramenta necessária pela QS-9000, de modo que esta garantiria uma maior qualidade na produção de um novo veículo. A QS-9000 foi desenvolvida pelas três grandes fabricantes de automóveis americanas na década de 90, Chrysler, GM e Ford, seu intuito era o de padronizar os requerimentos de qualidade de seus fornecedores. Essa padronização tinha como vantagem a redução de custos no desenvolvimento de produtos e processos (HECKERT; FRANCISCHINI; ROTONDARO, 1998).

Falando sobre redução de custos, no FMEA se tem uma análise pela regra decimal (1-10-100), que mostra a relação entre o tempo de projeto em suas diversas etapas e os custos referentes a consertar falhas e a aumentar a qualidade. Esta regra mostra que o quanto antes o problema é encontrado menor é o custo para solucioná-lo (CARLSON, 2012).

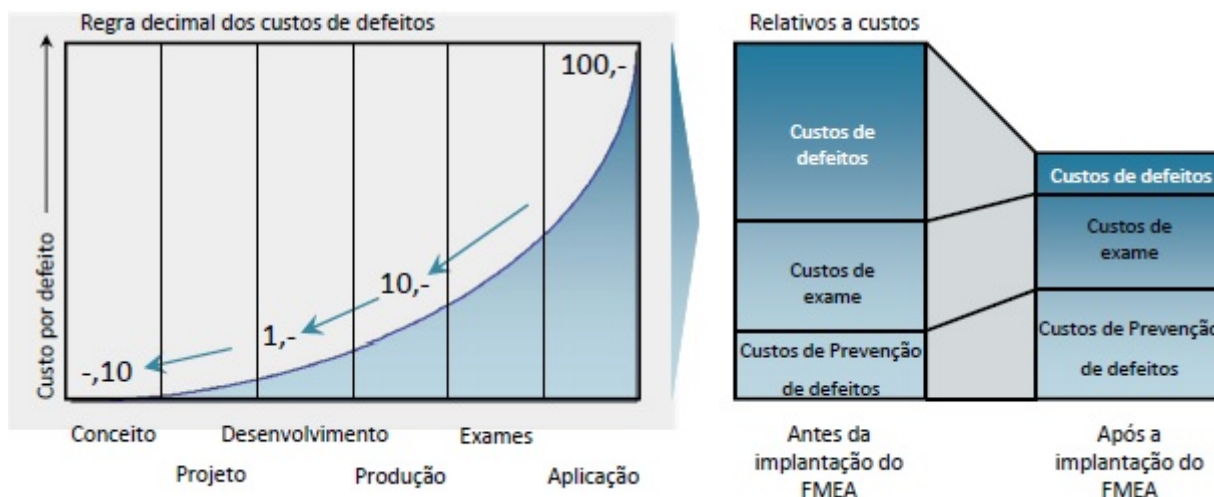


Figura 2 – Regra Decimal.

Fonte: (BACELLAR, 2015)

A figura acima mostra o "custo x tempo" de projeto, criando uma curva de crescimento exponencial, na qual o custo para se solucionar falhas durante a aplicação é muito alta, enquanto resolver o problema ainda na parte de projeto se torna mais barato. Ao lado do gráfico é mostrado a vantagem de aplicação do FMEA, no qual se tem um aumento do custo com a prevenção de defeitos e uma diminuição dos custos totais.

Carlson define alguns aprendizados que podem ser obtidos ao pensar nesta regra decimal na aplicação do FMEA, como (CARLSON, 2012):

- Garantir que os projetos são seguros e robustos.
- Garantir que os processos de manufatura são seguros e controláveis.
- Oferecer suporte aos projetos, descobrindo as falhas antes que elas venham a surgir.

O FMEA pode ter vários tipos de aplicações, mas existem três mais comuns, o de sistema, de processo e o de projeto descritos abaixo (CARLSON, 2012) :

FMEA de sistemas: pode ser definido como o nível mais alto de análise a ser realizada, avaliando vários subsistemas, no qual o foco principal são as falhas relacionadas à segurança, interface e integração entre eles, e aquelas que impossibilitem o sistema de operar corretamente. Este tipo de análise avalia as interfaces e a integração de maneira ampla, ao invés de considerar apenas falhas singulares. Como por exemplo, ao se analisar um automóvel completo ou olhando de maneira mais simplificada um subsistema de frenagem.

FMEA de processo: o foco desta ferramenta se encontra na análise dos processos na cadeia produtiva de um produto, como a fabricação deste ou sua montagem, o escopo

dessa ferramenta frequentemente inclui processos de manutenção, transporte de peças, operações e os processos já citados anteriormente como manufatura e montagem.

FMEA de projeto ou D-FMEA (*Design-FMEA*): é aquele que está focado no estudo do design do produto, fazendo a análise no projeto de componentes dando uma ênfase maior no uso confiável do produto. O objetivo deste FMEA é analisar as falhas em um produto ou as que possam ser originadas durante a etapa de projeto.

Além de ter esses tipos de aplicações, o FMEA pode ser aplicado em outros setores e em variados tipos de empresas, todos com o intuito de se realizar melhorias e identificar falhas. Claro que para se realizar estas aplicações algumas mudanças na metodologia podem ser realizadas de maneira que se obtenha o resultado mais confiável possível.

Ao aplicar o FMEA em empresas de pequeno porte e de variados setores, algumas mudanças para avaliar o impacto ambiental são adotadas. Essas consistiram basicamente em adição de tabelas de avaliação para visualizar a abrangência do impacto e o risco dele, identificação de entradas, saídas dos processos (ZAMBRANO; MARTINS, 2007).

Apesar de se aplicar o FMEA em diferentes empresas, o resultado obtido foi semelhante, dentre eles: a identificação de falhas que causam um maior impacto ambiental e o que pode ser realizado para consertar as falhas. Nestes casos foram relatadas vantagens como: facilidade de aplicação, padronização para encontrar as falhas e melhorias contínuas.(ZAMBRANO; MARTINS, 2007)

Ao se falar em padronização alguns artigos falam do desenvolvimento de softwares que compilem as informações das avaliações e que criem uma base de dados completa do que foi realizado (LIU; HWANG; LIN, 2013), (GRANTE; PAPADOPOULOS, 2004).

Essa padronização é interessante pois ajuda a melhorar a eficiência da análise. Por exemplo, ao se analisar um carro de competição, se realiza um FMEA de como as falhas afetam o piloto, realizado isso, se utiliza esse padrão para todos os carros daquele tipo de competição, de maneira que, a avaliação em diferentes equipes ou em diferentes áreas da equipe seja a mesma, obtendo resultados que podem ser comparados e validados.

E a padronização se encontra principalmente na metodologia de aplicação, na qual o manual de referência do FMEA cita alguns elementos comuns as aplicações, tais como: a identificação do time de trabalho; definição do escopo de análise; definição do consumidor do produto; identificação de funções, requerimentos e especificações; identificação de possíveis causas, possíveis efeitos e possíveis causas; identificação dos controles e dos riscos(IQA, 2008).

Se definido como um passo a passo, pode ser estruturado em 7 etapas como mostrado a seguir:

1. Preparação e planejamento

- 1.1. Definir o tipo de FMEA entre os três já citados
- 1.2. Definir o grupo de trabalho, que deve preferencialmente ser multidisciplinar (pessoas da área de projeto, área da qualidade, um moderador do FMEA) e não deve ser muito grande, tendo em média de 3 a 6 integrantes.
- 1.3. Planejar cronograma.
- 1.4. Preparar documentos a serem utilizados, como a tabela para preenchimento do FMEA, que contém os itens a serem avaliados, dentre eles: as falhas, seus efeitos, suas causas, ações preventivas, ações realizadas para detecção. Além disso, a tabela contém colunas específicas para se realizar a definição dos valores do NPR.

2. Estruturação

- 2.1. Numeração dos componentes que irão ser analisados e organização deles em diversas tabelas.

3. Análise das funções

- 3.1. Identificar e entender funções e requerimentos dos itens. De forma que, podem ser utilizadas outras ferramentas para oferecer auxílio, como por exemplo, um diagrama de blocos que no caso de um sistema possibilita a visualização de todos os componentes envolvidos e a função de cada um deles.

4. Análise de falhas

- 4.1. Identificar os tipos de falhas potenciais
- 4.2. Apontar falhas que já ocorreram assim como seus efeitos e causas
- 4.3. Verificar controles já implementados que ajudem a prevenir e/ou detectar as falhas.

5. Avaliação dos riscos

- 5.1. Definir (S) que é a severidade da falha ou seu impacto ao consumidor.
- 5.2. Definir (O) que é a probabilidade de ocorrência.
- 5.3. Definir (D) que é a chance de detecção.
- 5.4. Calcular o número de prioridade de risco $NPR=S \times O \times D$.

- 5.5. Os números de severidade, ocorrência e detecção são encontrados pelo grupo de trabalho a partir das tabelas fornecidas pelo manual do FMEA ou por tabelas confeccionadas pelo próprio grupo de acordo com a sua demanda. As tabelas a serem utilizadas serão apresentadas no capítulo 4 antes de sua aplicação de maneira a facilitar o entendimento.
6. Otimização
 - 6.1. Criar hierarquia de prioridade de acordo com o valor do NPR, visualizando quais itens tem uma maior criticidade.
 - 6.2. Definir ações de melhoria, como a otimização de processos para detecção, ou a inclusão de um processo, caso não exista nenhum ou por exemplo, a mudança de um item eliminando o modo de falha.
 7. Melhoria contínua
 - 7.1. Realizar revisões contínuas das tabelas adquiridas, sempre que se tem alguma mudança realizada. Mesmo que não haja mudanças, a revisão deve ser realizada, de forma a comparar as falhas que foram previstas no FMEA com as que ocorrem de fato (CARLSON, 2012).

O fato de a ferramenta ter uma metodologia bem definida facilita a sua aplicação e ajuda a obter uma maior confiabilidade dos dados. Além dessas vantagens, o FMEA fornece de maneira clara falhas que aconteceram, que podem ocorrer e além disso, fornecer informações do que era feito para se prevenir e detectar os problemas e como foram solucionados (GRANTE; PAPADOPOULOS, 2004).

Por si só o FMEA já fornece uma boa análise e bons dados em diversas situações, entretanto como o intuito é o de solucionar problemas e tentar sempre ter resultados mais precisos, outra ferramenta pode ser usada de maneira complementar. Essa ferramenta é o FTA, que tem o papel de auxiliar o FMEA, fornecendo uma visualização gráfica e mostrando a origem das falhas.

2.2.1 FTA- (Fault Tree Analysis)-Árvore de Análise de Falhas

A ferramenta FTA foi inicialmente desenvolvida em 1961 pela aeronáutica americana, sendo aplicada posteriormente pela Boeing Company. Sua apresentação formal foi em 1965, durante uma conferência sobre segurança de sistemas, assim como o FMEA seu uso se deu em outras indústrias dentre elas a aeroespacial e a nuclear. Hoje seu uso se dá nas mais diversas indústrias, incluindo a automotiva (CARLSON, 2012).

Segundo o manual regulatório da comissão de energia nuclear americana, a árvore de análise de falhas FTA, também pode ser vista como uma técnica analítica, no qual





uma falha do sistema pode ser analisada. A análise é feita de forma gráfica, obtendo uma sequência lógica conectada, que poderá mostrar a origem da causa para uma falha. As falhas encontradas podem ser associadas a falhas de componentes, erros de projeto ou até mesmo erros humanos. Alguns fatores são importantes para se entender a árvore de falhas, dentre eles está o fato de que a ferramenta não mostra todas as falhas do sistema (COMMISSION, 1981).

Sua forma de trabalho gráfico é definida como um sistema em blocos ou em árvores. Este sistema mostra a relação entre os eventos, no qual os eventos mais altos da árvore são os *outputs* ou falhas principais e os eventos mais baixos são os *inputs*. A simbologia definida para cada bloco mostra o tipo de relação entre os eventos superiores e inferiores (COMMISSION, 1981).

A árvore de falhas usa diversas simbologias, muitas delas são para casos específicos. Para se realizar a árvore alguns autores citam apenas a simbologia básica, que são a dos eventos básicos e intermediários e as conexões E e OU. Como mostrado na tabela 1.

Tabela 1 – Tabela árvore de falhas.

Fonte: adaptado de (CARLSON, 2012)

Simbologia Árvore de Falhas		
Evento primário	Símbolo	Descrição
Evento básico		Evento básico que inicia a falha
Evento intermediário		Falha que ocorre devido a um ou mais antecedentes
E		A falha a cima ocorre caso todos os eventos aqui ocorram
OU		A falha ocorre se um ou outro acontece

Assim como o FMEA, o FTA tem um passo a passo bem definido para a sua execução, passos que são apresentados tanto no manual quanto em livros, como é mostrado a seguir:

1. Definir a falha a ser estudada

- O FTA começa com uma falha ou algum evento já identificado, por exemplo uma falha encontrada pelo FMEA. A falha a ser estudada aqui deve ser bem definida e escolhida cuidadosamente, devido a duas problemáticas, uma delas

é de a análise ficar muito geral e os eventos são desdobrados continuamente sem se chegar a uma conclusão ou a de ficar muito específica e não mostrar as causas necessárias (COMISSION, 1981).

2. Obter conhecimento sobre o sistema

- Este passo serve para descobrir as principais causas das falhas e os fatores que podem contribuir para que o evento ocorra (CARLSON, 2012).

3. Construir a árvore de falha

- A árvore é construída a partir do conhecimento do funcionamento do sistema e da falha principal que será estudada. Todos os eventos estarão conectados em uma ordem lógica. O processo de construção pode ir interligando vários subeventos até a origem do problema ser encontrada (CARLSON, 2012).

4. Validar a árvore

- Após a construção da árvore para cada falha em específico, se faz uma análise para descobrir a probabilidade daquela falha inicial acontecer (CARLSON, 2012).

5. Controlar os riscos encontrados

- A partir dos problemas encontrados e da causa origem, uma melhoria de sistema pode ser realizada (CARLSON, 2012).

Alguns benefícios são encontrados ao se aplicar esta ferramenta, como a identificação da origem de problemas maiores, fornecimento de inputs para diversas atividades como procedimentos de teste e procedimentos de manutenção. Ainda oferece uma maneira gráfica de se visualizar os riscos de uma falha e como se da sua relação com outros eventos. Porém algumas desvantagens também são listadas, dentre elas a necessidade de uma equipe com boa experiência, o tempo necessário para sua realização e o cuidado para interpretar os resultados (CARLSON, 2012).

O maior problema que poderá ser encontrado na utilização da ferramenta será na interpretação dos dados, problema que poderá ser sanado ao realizar revisões periódicas da análise e fazer uma comparação com outras pesquisas, de maneira a conferir a confiabilidade daquilo que é apresentado.

2.2.2 Integração entre FMEA e FTA

Ao se comparar as duas ferramentas, é possível notar que a principal diferença entre as duas é que o FMEA é uma ferramenta indutiva, no qual se tenta descobrir os

efeitos da falha ou a condição de operação do componente. Enquanto o FTA é um método dedutivo, no qual se define como o sistema falha e tenta encontrar o que ocasiona a falha ou contribui para que ela ocorra (BERTSCHE, 2008).

Apesar de, serem diferentes o uso das duas ferramentas de modo integrado já é estudado, entretanto alguns aspectos importantes não são detalhados ou analisados durante está união, como o seu uso nas fases iniciais de projetos ou quando se tem a utilização do FTA como melhoria do FMEA (LIMA; FRANZ; AMARAL, 2006).

O uso adicional do FTA ao FMEA ou vice-versa pode ser utilizado quando se deseja conhecer as diversas relações entre as falhas, causas e seus efeitos. Tendo seu uso beneficiado em situações como a análise de falhas complexas que tem diversas causas, ou quando o grupo de trabalho quer entender a probabilidade de um evento ocorrer e também quando duas ou mais causas de um modo de falha ocorrem em conjunto (CARLSON, 2012).

Para Scapin a relação entre elas se dá de forma bilateral e complementar, no qual uma fornece informação para a outra. A FTA tem como resultado as causas fundamentais da falha e o FMEA as análises nas falhas primárias e de comando, obtendo uma relação de melhoria entre as duas (SCAPIN, 2013).

O uso conjunto das duas tem o benefício da FTA otimizar o FMEA ao atribuir resultados mais precisos ao NPR e ainda dá mais embasamento na análise de falhas, mostrando de forma mais clara como deve ser feita a priorização das ações de melhoria (LIMA; FRANZ; AMARAL, 2006).

Ao se aplicar as ferramentas de maneira conjunta, são descritas duas metodologias: primeiramente se utilizando uma FTA e posteriormente um FMEA, ou realizando a ordem contrária. Apesar de terem dois jeitos de se iniciar uma avaliação de falhas, os dois estão corretos e se dão de maneira cíclica, de modo que uma ferramenta alimenta a outra constantemente (CARLSON, 2012),(GRANTE; PAPADOPOULOS, 2004).

A primeira metodologia consiste em analisar as falhas mostrando suas combinações lógicas, e como cada componente pode interferir em uma falha de sistema, de modo que as causas intermediárias e primárias sejam explicitadas dentro de um evento superior. Posteriormente o FMEA é realizado para que sejam identificados os efeitos das falhas, causas, ocorrência e maneira de detecção (GRANTE; PAPADOPOULOS, 2004).

O FTA tem como resultado principal, as conexões entre as falhas de componentes, os futuros efeitos de uma falha de componente no sistema como um todo e como ele mostra as relações entre os componentes. Além disso, pode se identificar a criticidade de um sistema, baseado nas severidades das encontradas no FMEA de forma conjunta (GRANTE; PAPADOPOULOS, 2004).

Para Helman o FTA identifica um ponto de partida, cujo é possível identificar as

falhas iniciais que se deseja dar uma solução e o FMEA identifica as possíveis causas, efeitos e modos de falha fornecendo um maior nível de detalhamento (HELMAN H.; ANDERY, 1995). De modo complementar Grante cita que o resultado obtido pelo FMEA, são pontos específicos das falhas, mostrando possíveis falhas no projeto e ainda mostra quais são os efeitos para cada modo de falha (GRANTE; PAPADOPOULOS, 2004).

A segunda metodologia consiste em realizar um FMEA para identificar as falhas, suas causas e efeitos, posteriormente podendo se realizar uma árvore de falhas para encontrar relações lógicas entre as mais complexas, de maneira que se tenha mais causas raízes e problemas associados (LIU; HWANG; LIN, 2013).

Apesar de terem metodologias inversas é interessante analisar que as ambas são realizadas de maneira cíclica, no qual as tabelas e as árvores são sempre otimizadas e revisadas, por fim podendo obter uma análise mais consistente e confiável. Um dos aspectos importantes a serem analisados na adoção de uma metodologia ou outra é o intuito da análise, o tempo disponível e a equipe que irá realizar.

A primeira forma de aplicação é ideal quando se quer analisar todas as falhas a partir das duas ferramentas. Além disso, como cita Helman o FMEA constitui um maior nível de detalhamento, já que possui os efeitos, modos de falhas, ações de mitigação e correção já adotadas (HELMAN H.; ANDERY, 1995). Assim, o presente trabalho propõe a utilização da primeira lógica de trabalho, visando um sequenciamento que sai do mais simplificado para o mais detalhado, fornecendo uma melhor análise para as falhas.

Frequentemente a análise de falhas é desencadeada quando uma empresa, equipe ou organização desejam mitigar problemas que vem ocorrendo. Ou quando esses têm por objetivo atingir um novo patamar em um mercado ou competição por exemplo. Uma das maneiras de chegar nesses objetivos é pela mitigação de falhas e aquelas que fazem maior diferença estão comumente associadas a sistemas que tem uma maior criticidade ou valor.

Para que se tenha um maior entendimento do objeto da aplicação do FMEA e do FTA o capítulo a seguir irá fornecer explicações sobre um sistema de frenagem, que é um sistema crítico de veículos, sejam eles de passeio ou competição, detalhando seus principais componentes, assim como seu funcionamento.

2.3 Sistema de Frenagem

O sistema de frenagem, que é um sistema de risco como citado anteriormente tem o intuito de oferecer segurança para aos ocupantes. Tendo por função básica a de parar o automóvel nas diversas condições de direção. Para o cumprimento dessa função é necessário então que o sistema possua confiabilidade e qualidade, que estão associadas a ausência de falhas ou sua baixa ocorrência.

Segundo Limpert, a operação segura de um veículo se dá pela manutenção da velocidade do veículo a todo momento de acordo com as condições impostas e seu uso básico pode ser formulado em basicamente três funções, que são desacelerar um veículo, podendo ser até a parada total ou não, manter a velocidade do veículo quando em uma descida e manter o veículo parado após estar estacionado (LIMPERT, 1999).

A desaceleração de um veículo envolve a transformação de energia cinética e potencial em energia térmica ou a transformação de movimento em calor. Essa transformação se dá devido ao atrito resultante de algum elemento rotativo a um elemento fixo, como por exemplo o disco de freio em contato com as pastilhas de freio (LIMPERT, 1999).

2.3.1 Tipos de sistemas de frenagem

Freios e embreagens podem ter diversas classificações, por exemplo, pela forma de atuação, pelo modo de transferência de energia entre elementos e pelo tipo de acoplamento. O principal tipo de freio utilizado na indústria automotiva é o por atrito, que como mostrado na figura abaixo pode ser classificado em radial, axial ou cônico, sendo que o radial são os tambores e o axial é representado pelo sistema de disco de freio. Como será explicado adiante o sistema utilizado para veículos de competição é o de atrito axial (NORTON, 2004).

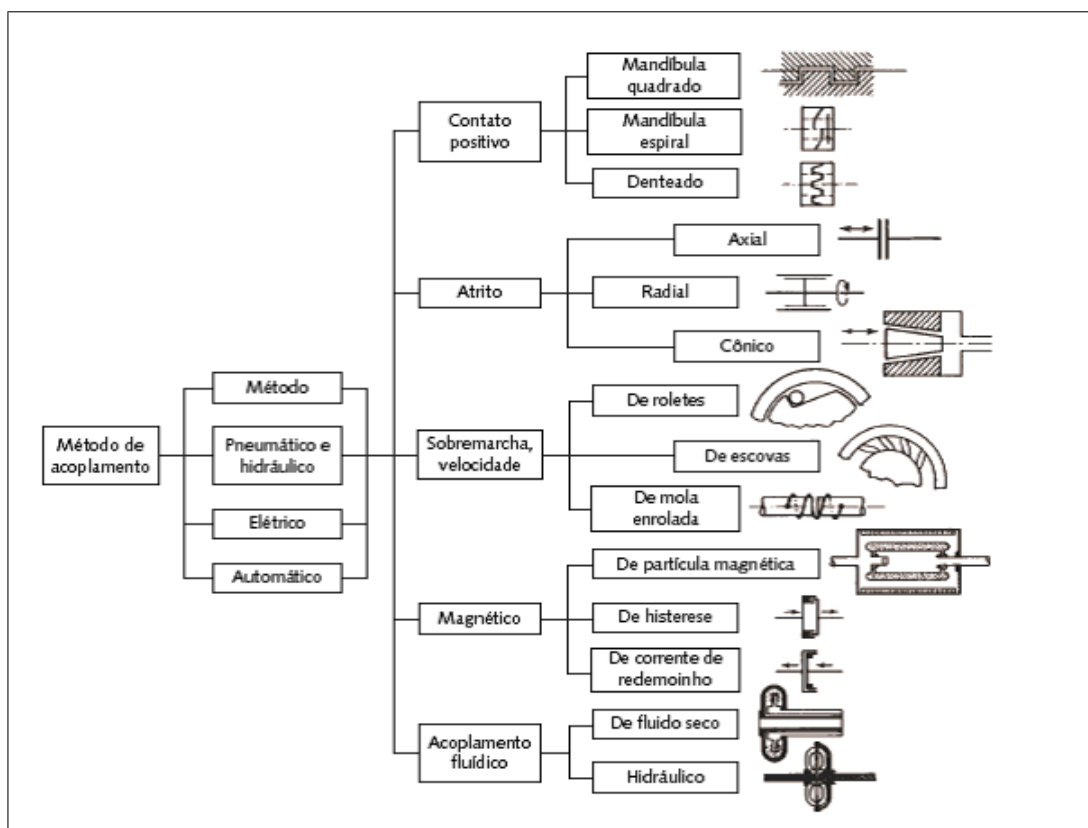


Figura 3 – Diagrama de fluxo de tipos de componentes.

Fonte:(NORTON, 2004)

Os principais sistemas utilizados por veículos, tanto de médio porte quanto de grande porte, é o tambor de freio e o disco de freio, sendo que para veículos com maior performance se utilizam os discos de freio. Como este trabalho está baseado em um veículo de competição, a seguir serão apresentados os principais componentes utilizados em um sistema que utiliza disco de freio.

2.3.2 Componentes do sistema de frenagem

Os principais componentes no sistema hidráulico do freio são: o disco de freio, pinça e pastilha, o pedal de freio, o cilindro mestre, a linha de freio e as conexões, o fluido de freio e o hidrovácuo. Para entender como um sistema vem a falhar é importante entender seu funcionamento e algumas de suas características básicas. Dessa maneira serão explicados a seguir os principais componentes deste sistema.

2.3.2.1 Freio a disco

O freio a disco é constituído por três componentes principais, o disco, pinça e a pastilha. Quando o sistema é acionado, o fluido é pressurizado acionando os pistões da pinça, que pressionam as pastilhas no disco (COSTA, 2002). Algumas das vantagens deste sistema são a facilidade de manutenção, alta taxa de resfriamento e maior resistência a impurezas (PUHN, 1987).

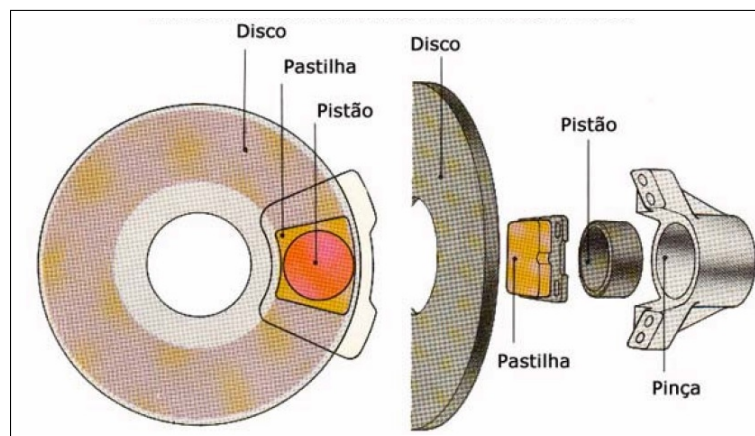


Figura 4 – Freio a disco.

Fonte:(COSTA, 2002)

Disco de freio é o componente que irá gerar a frenagem pelo atrito com a pastilha, podendo ser sólido ou ventilado. A diferença básica entre o ventilado e o sólido é quanto a transfêrencia de calor na superfície, sendo que em carros de competição ou de alta performance são utilizados os ventilados, que dificilmente apresentam sobreaquecimento em diversas condições de uso (PUHN, 1987).

Como a função básica de um disco de freio é a de transformar energia cinética em térmica o uso de discos ventilados, que tem uma melhor dissipação de calor, são melhores, entretanto apresentam custos mais elevados. Esse componente pode apresentar falhas ao não dissipar calor de maneira adequada, apresentando sobreaquecimento, de maneira que a capacidade de frenagem diminui. Outro modo de falha por exemplo, pode ser o empenamento do disco que gera vibração e ruído.

As pinças são compostas pelas pastilhas, o material de atrito e pelos pistões hidráulicos que movimentam a pastilha, podendo ser diferenciadas de acordo com seu design estrutural, material utilizado e posição dos pistões. Sua fabricação normalmente é feita em ferro fundido, entretanto para carros de corrida ou de alta performance, estas podem ser feitas de alumínio, diminuindo o peso do sistema e melhorando a dissipação de calor (PUHN, 1987).

Além de baixo peso e boa dissipação de calor, Limpert cita que um dos requerimentos importantes para a pinça é o de se ter uma boa distribuição da pressão na pastilha (LIMPERT, 1999).

As pinças podem ser classificadas como flutuantes ou fixas. De maneira simplificada a pinça fixa é aquela que possui pistões de ambos os lados de sua estrutura e a flutuante apresenta pistões em apenas um lado (BRAESS, 2005).

A fixa em geral é maior e mais pesada que a flutuante. Para Puhn este tipo de pinça é mais utilizado em carros de competição. Isso se dá pela sua melhor dissipação de calor, sua aplicação de força ser mais uniforme e por poder utilizar um número maior de pistões (PUHN, 1987).

Já a flutuante é menor e mais leve. Este tipo de pinça tem dois desenhos básicos, a flutuante e a deslizante. Ambas com o mesmo tipo de funcionamento, no qual as pastilhas internas são empurradas contra o cilindro e a externas puxadas, gerando a pressão necessária (BRAESS, 2005). Algumas das vantagens da pinça fixa são seu baixo peso, seu tamanho compacto e como tem menos partes móveis apresenta uma menor chance de vazamentos (PUHN, 1987).

Dentro de um projeto a escolha do tipo da pinça pode variar de acordo com as necessidades do projeto, custo e tipo de aplicação, para veículos de competição apesar de ser recomendado o uso de pinças fixas, pode ser realizado o uso do tipo flutuante, por ser mais leve e compacta.

2.3.2.2 Pedal de freio

O pedal de freio é a primeira parte do sistema hidráulico, sendo acionado pelo motorista. Primeiramente, sua função é a de transmitir a força que o motorista aplica

para o cilindro mestre. Mais do que isso, o pedal tem a função de ampliar a força que o motorista realiza pelo braço de alavanca (COSTA, 2002).

E o braço de alavanca, pode ser definido também como razão de pedal como mostrado na figura abaixo. Esta relação pode ser definida em 5 para 1 quando o acionamento é mecânico e 3 para 1 quando se tem algum componente para ampliar a força (PUHN, 1987).

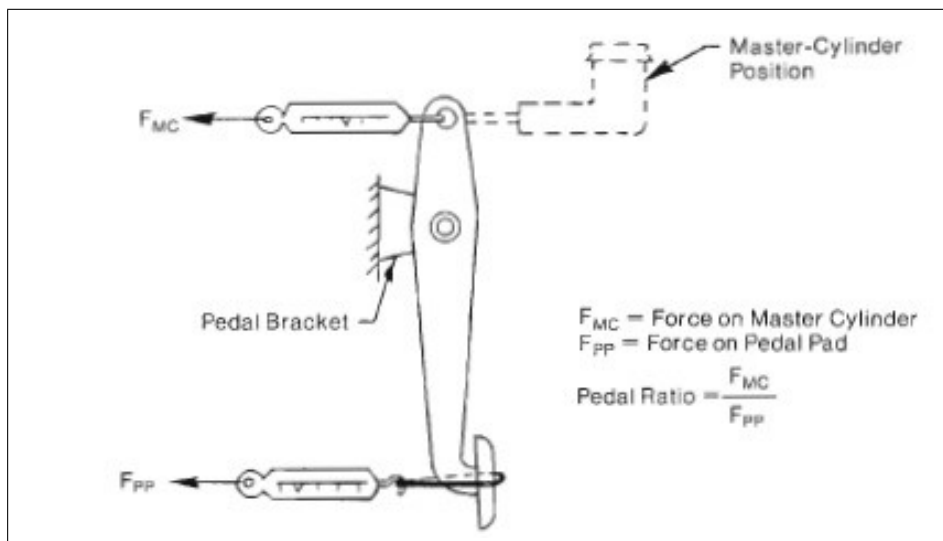


Figura 5 – Razão de pedal.

Fonte: (PUHN, 1987)

Um dos fatores para a ampliação da força no pedal pelo braço de alavanca é por questões ergonômicas, no qual se tem normas que definem a máxima força que deve ser aplicada por mulheres e homens (LIMPERT, 1999).

Como o pedal é o componente que inicia a frenagem alguns requisitos de projeto devem ser analisados, como: não quebrar ou entortar quando o piloto aplicar a força máxima, não deve ter muito atrito, tem que atender a requisitos das conexões com o cilindro mestre, deve ser rígido (PUHN, 1987).

Em uma definição básica o pedal pode ser visto como um corpo rígido e sólido, mas se dividido pode ser representado pelo corpo do pedal, o pivô, a balance bar e o apoio para o pé, “pad”. O corpo do pedal como citado anteriormente é a parte rígida, que tem função de alavanca para o pedal. O pivô é a parte que possibilita o movimento, o eixo no qual o pedal se move. A balance bar é aquela que tem como função distribuir a pressão aplicada no pedal para os dois cilindros mestre, seu uso é mais frequente em carros de corrida, no qual se tem o uso de dois cilindros mestre, possibilitando a distribuição correta de pressão entre a dianteira e a traseira (PUHN, 1987).

Para cumprir suas funções básicas de transmitir força e ampliar a força que o piloto aplica é importante realizar estudos ergonômicos, de maneira que o piloto não tenha necessidade de aplicar forças muito elevadas para realizar a frenagem. Sendo que um modo de falha potencial para o pedal de freio é o de não transmitir a força, não realizando a frenagem, ou também a não ampliação da força gerando cansaço no piloto.

2.3.3 Hidro vácuo

Como a força aplicada pelo piloto pode ser muito alta para se realizar a frenagem, foi desenvolvido o hidro vácuo ou servo de freio que tem o objetivo de ampliar a força aplicada.

Esse sistema consiste num servo cilindro, que se tem um diafragma ou pistão, no qual o ar é extraído de uma das extremidades do cilindro e a pressão atmosférica atua na outra extremidade, essa diferença de pressão diminui a força necessária a ser aplicada (COSTA, 2002).

Os sistemas conhecidos são acionados pelo motor, no qual o vácuo parcial é criado pelo coletor de admissão ou por bomba de vácuo independente. Em sistemas simples o motor aspira ar dos dois lados do servo, sendo mantido até a frenagem, de maneira que a pressão atmosférica atua em um dos lados, gerando a diferença de pressão (COSTA, 2002).

2.3.3.1 Cilindros mestre

O cilindro mestre é parte que está conectada ao pedal com uma simples ligação, sua função básica é de gerar movimento e pressão no fluido de freio. Seu funcionamento se dá pela conversão da força exercida pelo piloto no pedal em pressão hidráulica. Tal conversão da força aplicada pelo piloto em pressão hidráulica é importante, de forma que se o sistema fosse puramente mecânico a força necessária seria muito elevada (PUHN, 1987).

Existem basicamente dois tipos de cilindro mestre, o simples e o duplo. O simples é constituído pelo pistão que exerce a pressão no fluido, o reservatório do fluido de freio, o cilindro e a mola de retorno. Este sistema já foi utilizado em carros de passeio, pressurizando as 4 rodas, mas foi proibido, pois caso apresentasse alguma falha o carro perderia a capacidade de frenagem. No momento este cilindro é utilizado apenas em carros de corrida no qual se usa dois cilindros mestres, tendo por intuito garantir uma maior segurança (PUHN, 1987). A figura a seguir mostra o cilindro mestre simples e seus componentes internos.

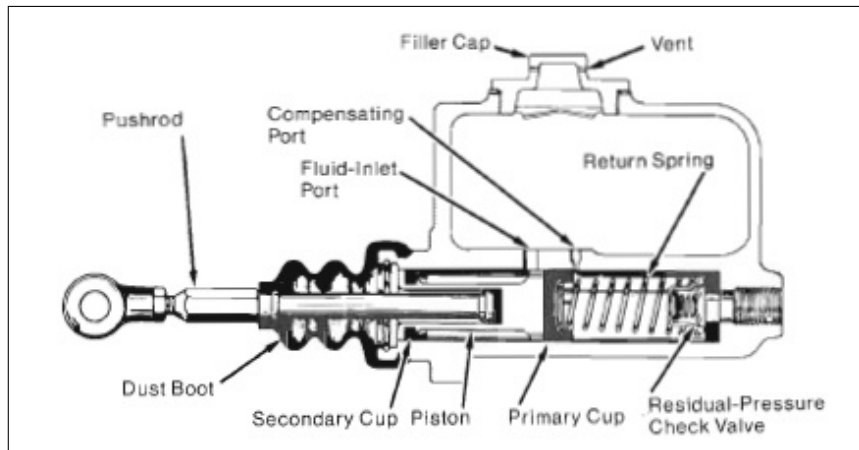


Figura 6 – Cilindro mestre simples.

Fonte:([PUHN, 1987](#))

Com o intuito de sanar as possíveis falhas, os carros de passeio utilizam o cilindro duplo, que é composto por dois pistões em linha dentro do cilindro, mas que trabalham de forma independente, como mostrado na figura abaixo:

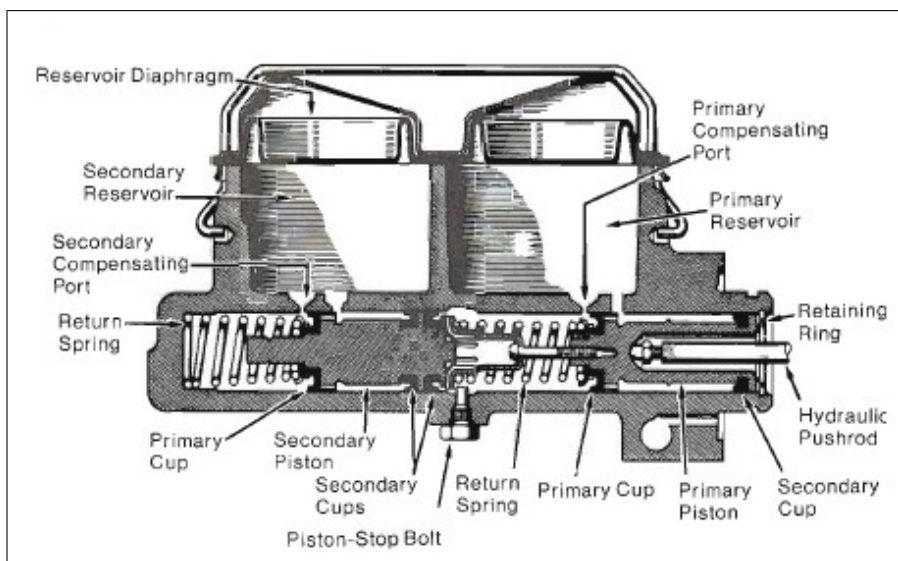


Figura 7 – Cilindro mestre duplo.

Fonte:([PUHN, 1987](#))

As falhas que podem acontecer no sistema podem ser basicamente a não transmissão da força do pedal para o fluido ou não haver fluido no sistema e podem vir de causas como vazamento ou vedação incorreta do sistema.

2.3.3.2 Linhas de freio e conexões

Linhas de freio têm a função básica de conectar os sistemas hidráulicos, transmitindo o fluido do cilindro mestre para as pinças. As linhas podem ser divididas em dois tipos, as linhas rígidas e as flexíveis ([PUHN, 1987](#)).

Tais linhas rígidas, são utilizadas onde não se tem movimentação, frequentemente são fabricados de aço e de cobre. Apesar de se ter sua fabricação comum em aço e cobre, Puhn cita que o cobre não é um material adequado para a utilização em linhas de freio. As linhas rígidas são utilizadas na maior parte do carro devido ao seu menor custo e pelo fato de terem uma menor expansão dos tubos com relação aos flexíveis, que gera uma melhor distribuição da carga (PUHN, 1987).

Já as linhas flexíveis, são mais utilizadas na conexão com a pinça de freio, já que necessitam uma maior movimentação e flexibilidade, devido ao movimento da roda e da suspensão. Os dutos flexíveis podem ser fabricados a partir de camadas de nylon com borracha sintética no exterior. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, começaram a se usar linhas mais resistentes, chamadas de aeroquip, que consiste no uso de uma armadura de aço envolta do tubo de borracha. Este sistema ainda é otimizado com o uso de aço inox e o tubo de borracha é substituído por teflon, tendo uma menor dilatação, quando sobre pressão (PUHN, 1987).

As conexões são as responsáveis por realizar as trocas entre linha flexível e rígida no carro. O requerimento básico dessas conexões é não apresentar vazamento onde houver troca de linha e manter a pressão constante ao longo desta (PUHN, 1987).

A principal falha desse sistema pode vir de vazamentos na linha ou nas conexões, sendo os originados nas conexões mais comuns. Esses vazamentos nas conexões podem ser originados por uma montagem inadequada do sistema, dessa forma a montagem das conexões deve ser realizada de forma cautelosa.

2.3.3.3 Fluidos de freio

O fluido de freio pode não ser um componente do carro, mas como é ele que realiza a frenagem efetivamente no sistema hidráulico, é importante conhecer algumas de suas características. Alguns dos requisitos básicos do fluido de freio são: o fluido não deve ser comprimido, o fluido não pode ferver em altas temperaturas, não pode congelar em baixas temperaturas, deve fluir com baixa fricção pelas linhas de freio (PUHN, 1987).

Esses requisitos são impostos de maneira que se possa ter a utilização do mesmo em diversas condições de operações, por exemplo, a relação de não poder ferver e não poder congelar.

Fluidos de freio são divididos em quatro tipos, DOT 3, DOT 4, DOT 5.1, que são feitos à base de glicol e o DOT 5 a base de silicone. Os fluidos a base de glicol absorvem a umidade do ar com mais facilidade, conseqüentemente tem uma queda do ponto de ebulição, mais rapidamente. Já os fluidos a base de silicone absorvem menos umidade do ar, tendo sua vida prolongada (BRAESS, 2005).

	Ponto de ebulição seco	Ponto de ebulição úmido
DOT 3	205 °C (401 °F)	140 °C (284 °F)
DOT 4	230 °C (446 °F)	155 °C (311 °F)
DOT 5	260 °C (500 °F)	180 °C (356 °F)
DOT 5.1	270 °C (518 °F)	190 °C (374 °F)

Figura 8 – Fluido de freio DOT.

Fonte:([PORFIRIO, 2016](#))

Apesar de ter o ponto de ebulição mais alto o DOT 5.1 aumenta sua compressibilidade quando em altas temperaturas, tornando o pedal mole, o que piora a dirigibilidade em carros de alta performance ([PUHN, 1987](#)).

O líquido que se encontra no estado com ponto de ebulição seco é aquele que, foi trocado recentemente, este ponto de ebulição é considerado em carros de competição, onde se tem uma troca maior do fluido e conseqüentemente uma melhor performance. Já o ponto de ebulição úmido é considerado para os carros de passeio, no qual o fluido é trocado com baixa frequência ([PUHN, 1987](#)).

A escolha de qual fluido de freio se utilizar se dá principalmente pelo ponto de ebulição do líquido e pelo custo do produto. Um possível modo de falha para fluidos está relacionado ao não cumprimento de seu requisito básico de não ser comprimido, pois caso ele seja comprimido ele não gera a frenagem adequada. Outro problema pode ser encontrado na manutenção, caso o fluido nunca seja trocado ou seja trocado de forma inadequada.

3 Estudo de caso

Para se analisar as falhas de um sistema de frenagem faz-se necessário conhecer o veículo estudado e os componentes específicos de seu sistema. Além disso, faz-se necessária uma contextualização do veículo e da competição que ele participa, a Fórmula SAE. Dessa forma este capítulo tem o intuito de introduzir o leitor a competição e apresentar o veículo da equipe da Unb, por fim realizando um detalhamento do sistema de frenagem.

3.1 Fórmula SAE

A fórmula SAE é uma competição de âmbito internacional, voltada para estudantes das diversas áreas de engenharia, no qual é focada em preparar os estudantes para o mercado de trabalho. Seu início foi em 1981 nos Estados Unidos e atualmente acontece em diversos países, tais como Brasil, Alemanha, Itália e outros. No Brasil a competição começou em 2004, sendo formada unicamente pela etapa nacional. Nas competições de 2015 e 2016 houve a participação de mais de 30 equipes de todo o Brasil (SAE, 2016).

Seu crescimento se deu pela necessidade de se ter engenheiros especialistas em veículos de competição. Inicialmente foi incentivada pelas três montadoras americanas, Ford, General Motors e Chrysler, que tinham por intuito conseguir engenheiros para suas equipes. Atualmente o número de investidores aumentou, tendo patrocinadores tanto para competição, quanto para as equipes. Tais investidores buscam auxiliar a categoria para desenvolver futuros engenheiros, importante notar que a categoria tem a modalidade que conta com veículos a combustão e aquela com veículos elétricos (SAE, 2016).

A competição é dividida em quatro dias e frequentemente ocorre nos meses de novembro ou outubro. Sendo dividida em três etapas: a inspeção técnica, as provas estáticas e as provas dinâmicas. A inspeção técnica consiste na validação do carro por juízes de acordo com as normas fornecidas pela SAE. Já as provas estáticas são formadas pela apresentação de projeto, prova de custos e apresentação de marketing. As dinâmicas pelas provas de: aceleração, skidpad, autocross, enduro e economia de combustível. Assim como em outras competições as equipes são validadas de acordo com o seu desempenho, dessa forma a tabela a seguir representa as diversas etapas da competição e como elas são pontuadas.

Tabela 2 – Etapas da competição

Fonte: adaptado de (SAE, 2016)

Etapas da competição	Provas realizadas	Pontuação
Inspeção técnica	<i>Checklist</i>	Validação do carro
	<i>Tilt table</i>	
	<i>Noise</i>	
	<i>Frenagem</i>	
Provas estáticas	<i>Prova de projeto</i>	150
	<i>Prova de custos</i>	100
	<i>Prova de marketing</i>	100
Provas dinâmicas	<i>Aceleração</i>	75
	<i>Skidpad</i>	75
	<i>Autocross</i>	150
	<i>Enduro</i>	300
	<i>Economia de combustível</i>	50
Total de pontos	Total de provas	1000

Inspeção técnica é o momento, no qual se tem a validação dos carros de acordo com parâmetros e regras definidas pela associação SAE, em uma primeira etapa se tem a avaliação por meio de *checklist* dos diversos componentes do carro por juízes, passada esta etapa, são realizadas mais três testes: a *Tilt Table*, que avalia se o carro não tem vazamento de nenhum fluido a uma inclinação de 60°, avaliação de ruído do carro que averigua se o ruído não passa de 110 dB, e a prova de frenagem.

Provas estáticas consistem basicamente em apresentações feitas pelos estudantes aos juízes. A apresentação de projeto consiste em explicar como foi realizado o projeto, quais decisões foram tomadas e por quê. Na apresentação de marketing é o momento no qual os estudantes vendem o seu produto para os juízes. E por fim a prova de custos, que mostra o custo necessário para se fabricar o carro.

Provas dinâmicas são aquelas para testar o carro na pista, verificando o desempenho e funcionalidade do sistema. Sendo a prova mais complexa a do enduro, no qual o carro é testado em diversas voltas na pista, não podendo apresentar falhas ou problemas.

A competição oferece a diversos estudantes a possibilidade de vivenciar o desenvolvimento de um projeto real, consistindo no desenvolvimento completo de um produto, trabalho em equipe, trabalho com prazos e desenvolvimento com baixos orçamentos.

Como descrito no início do capítulo este trabalho será realizado com o veículo da Apuama Racing, a equipe a combustão da Universidade de Brasília. A seguir, é mostrado

o carro Com alguns dados técnicos básicos assim como sua classificação nas diversas provas da competição de 2015.



Figura 9 – Carro Apuama Racing.

Além de conhecer a equipe e a competição faz-se importante conhecer o sistema a ser analisado, começando com alguns itens básicos como o regulamento, componentes utilizados e seus funcionamentos e requisitos definidos pela equipe.

3.2 Sistema de Frenagem da Equipe Apuama Racing

O primeiro ponto a ser conhecido do sistema é a norma fornecida pela SAE, citada no anexo “A”, que é aquilo que dá início ao projeto do sistema. Os principais pontos dessa norma são listados abaixo:

1. De acordo com o item T7.1.1 o sistema de freio deve ter dois sistemas hidráulicos independentes, aqueles que possuem duas linhas separadas com dois cilindros mestre, de modo que se um falhar a frenagem continuara a ser realizada, entretanto com capacidade reduzida. (SAE, 2016).

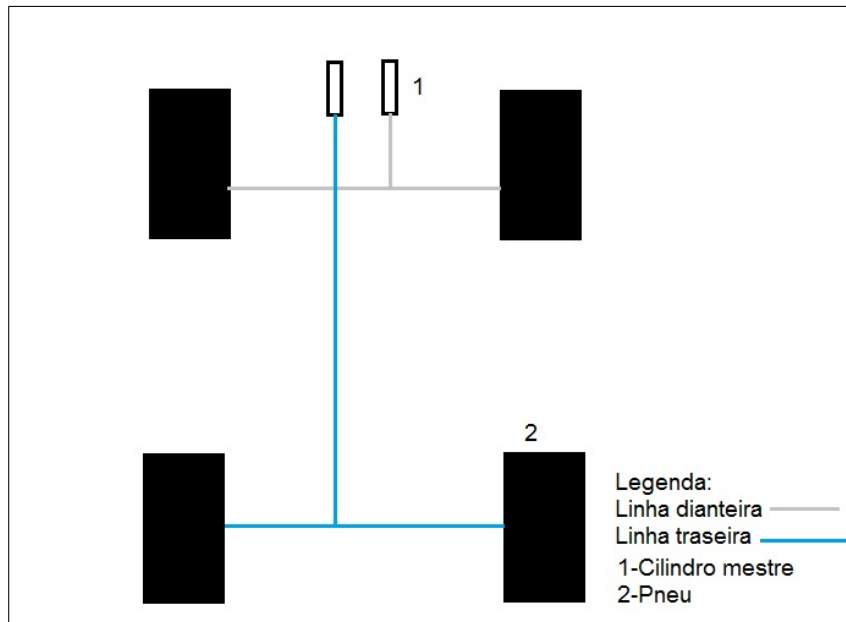


Figura 10 – Formato circuito hidráulico.

2. Em conformidade com o regulamento, item T7.1.8 o pedal deve suportar esforços de até 2000N, não podendo quebrar ou entortar, sendo que este poderá ser testado por algum juiz quando sentado normalmente no carro e pressionando com a máxima força o pedal (SAE, 2016).
3. O Sistema de freio deve travar as quatro rodas simultaneamente atendendo ao item T7.2.1, sendo testado em uma prova de frenagem. Tal condição é dimensionada durante a fase de projeto, no qual a frenagem máxima deve travar as rodas (SAE, 2016).

Os componentes do sistema podem ser divididos em dois tipos: os que são projetados e fabricados (disco de freio, pedais, pedal box, bias bar) e os que são dimensionados e comprados em modelo comercial (pinça, pastilha, cilindro mestre, linhas de freio). Como mostra a tabela abaixo:

Tabela 3 – Componentes do sistema de freio.

Componentes	Fabricados	Comprados
Disco de freio	X	
Pinça		X
Pastilha		X
Cilindro mestre		X
Linha de freio		X
Balance bar	X	
Pedal box	X	
Pedal	X	

Conhecido o regulamento e os componentes do sistema, o projeto pode ser iniciado. O primeiro passo no projeto foi definido como análise de funções e requisitos do sistema. As funções são o que o componente deve fazer, tanto de acordo com o regulamento quanto com a sua funcionalidade e os requisitos são os parâmetros básicos definidos pela equipe. A tabela a seguir mostra todos os componentes com suas devidas funções e requisitos.

Tabela 4 – Funções e requisitos.

Componentes	Funções	Requisitos
Disco de freio	Travar a roda realizando a frenagem.	O disco deve ser resistente a corrosão, a altas temperaturas e aos esforços sofridos. Além disso deve possuir boa dissipação de calor.
	Transformar energia cinética em calor.	
Cilindro mestre	Transmitir a força aplicada no pedal para a pinça.	O cilindro mestre deve ser de baixo custo e de fácil montagem e desmontagem no <i>pedal box</i> .
	Atuar como reservatório de fluido.	
Pinça	Realizar pressão sobre as pastilhas de freio, que executam a frenagem.	A pinça deve realizar a força de frenagem necessária e possuir baixo custo.
Pastilha	Gerar atrito com o disco	A pastilha deve ter uma um coeficiente de atrito médio e possuir baixo custo.
Linha de freio	Transmitir o fluido do cilindro mestre para a pinça	A linha deve ter uma manutenção simples e não deve apresentar irregularidades.
Balance bar	Distribuir a força aplicada pelo piloto entre a roda dianteira e traseira.	A balance bar deve ser leve, simples e projetada para fácil manutenção.
Pedal box	Acoplar os pedais e o cilindro mestre.	O pedal box deve possibilitar a rápida montagem e desmontagem. Além disso é necessário que seja móvel.
Pedal	Transferir a força que o piloto aplica para a balance bar.	O pedal deve Amplificar a força do piloto em no mínimo 5 vezes e manter o baixo peso. Além disso ele deve suportar 2000N de acordo com o regulamento.

Conhecidas as funções e os principais requisitos do projeto, se pode iniciar os cálculos de dimensionamentos, desenhos CAD e simulações virtuais. De forma a dar um melhor entendimento, os próximos tópicos mostram os componentes de uma maneira mais detalhada. Sendo iniciado pelo disco de freio, que é o primeiro componente a ser dimensionado.

3.2.1 Disco de freio

Este componente é projetado com base na necessidade de frenagem do veículo, no qual são determinados alguns fatores tais como dissipação de calor, material para fabricação, geometria, espessura, diâmetro. Estes parâmetros são definidos da seguinte maneira.

O diâmetro externo do disco é baseado na necessidade da força de frenagem, sendo dimensionado a partir de dados básicos do carro como peso, distância entre eixos, coeficiente de frenagem e outros. Enquanto o interno é definido a partir do raio efetivo que é o local onde ocorre de fato a frenagem e pelas posições de fixação da pinça. A espessura é definida tanto por limitações da pinça de freio, quanto por simulações térmicas no disco de freio, no qual se verifica a dissipação de calor. Essas simulações térmicas também são importantes para definição de uma melhor geometria e para a escolha do material correto.

Alguns parâmetros importantes para início dos cálculos, como massa do veículo, distância entre eixos, raio de rolamento do pneu, momento de inércia e aceleração angular são mostrados na tabela de *inputs* fornecida abaixo:

Tabela 5 – Inputs para o dimensionamento do sistema.

Inputs	Valor	Unidade
Massa do veículo	330	Kg
Distância entre eixos	1620	mm
Distância da roda dianteira ao cg	891	mm
Distância da roda traseira ao cg	729	mm
Altura do centro de massa	300	mm
Raio de rolamento do pneu	0,25	mm
Raio efetivo do disco	90	mm
Espessura do disco	4,7	mm
Coeficiente de atrito pneu/pista	1,2	μ
Coeficiente das pastilhas/discos	0,43	μ
Razão do braço do pedal	5	
Desaceleração do carro (G)	1,7	m/s^2
Momento de inércia	0,29	kgm^2
Aceleração angular	66,7	rad/s^2

Esses dados iniciais fornecidos geram os *outputs*, que são a força de frenagem, o torque gerado, a força normal e a razão entre as cargas. Sendo todos medidos nos dois eixos como é apresentado na tabela a seguir:

Tabela 6 – Outputs do sistema.

outputs	Valor	Unidade
Força de frenagem na traseira	874,1	N
Força de frenagem na dianteira	1068,3	N.m
Torque na traseira	237,9	N.m
Torque na dianteira	286,4	N
Força normal no eixo dianteiro	148,5	N
Força normal no eixo traseiro	181,5	N
Razao entre carga no eixo frontal e carga total	0,55	
Razao entre carga no eixo traseiro e carga total	0,45	

Definidos esses dados base pode-se achar o diâmetro que foi de 220mm, a partir dai se defini a geometria e o material com base em simulações térmicas, no qual se tenta atingir a melhor combinação de baixo peso e boa dissipação de calor. O material utilizado foi o aço SAE 1045, que apresentava um melhor "custo x benefício".

Como a necessidade de frenagem entre a dianteira e traseira são diferentes devido a transferência de carga, a geometria dos discos é modificada para cada um deles como mostra a figura 11. Além disso, sua simulação térmica também tem um perfil diferente devido ao contato da pastilha com o disco.

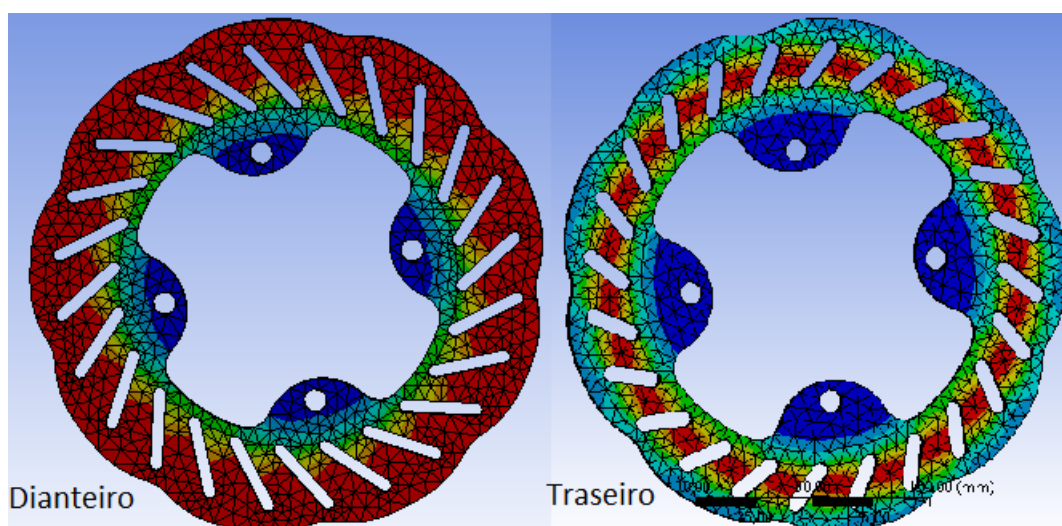


Figura 11 – Simulação térmica discos de freio

Como a frenagem é realizada pela aplicação de força da pinça sobre a pastilha, que por sua vez gera atrito com o disco, esses dois componentes serão explicados no próximo tópico.

3.2.2 Pinça e Pastilha

As pinças têm seu projeto iniciado com a escolha entre flutuante ou fixa de acordo com a necessidade, e suas dimensões são escolhidas de acordo com a capacidade de frenagem, como foi mostrado na tabela de *outputs*. Como mostrado na tabela de funções e requisitos a pinça e as pastilhas devem ser comerciais, ter baixo custo e deve principalmente atender aos requisitos de frenagem.

As pinças escolhidas foram baseadas no torque de frenagem que elas podem realizar, outros parâmetros de escolha da pinça é o preço e a facilidade de compra do componente. Como o torque de frenagem na dianteira e na traseira é diferente foram escolhidos dois modelos que atendessem aos requisitos básicos.

As duas pinças selecionadas foram a *dynalite single floater* usada na dianteira e a *wilwood SC1* para a traseira. O motivo dessa escolha se deu pelas duas atenderem a demanda de frenagem e pelo fato de terem um baixo custo quando comparadas a outras pinças.



Figura 12 – Pinça dianteira

Fonte:([WILWOOD, 2016](#))



Figura 13 – Pinça traseira

Fonte:([WILWOOD, 2016](#))

As pastilhas são escolhidas com base na força de atrito, que elas podem fornecer. A partir de tabelas fornecidas pela *wilwood*, que contém a relação entre a força de atrito e a temperatura de trabalho a equipe seleciona aquela que melhor adequa a sua realidade.

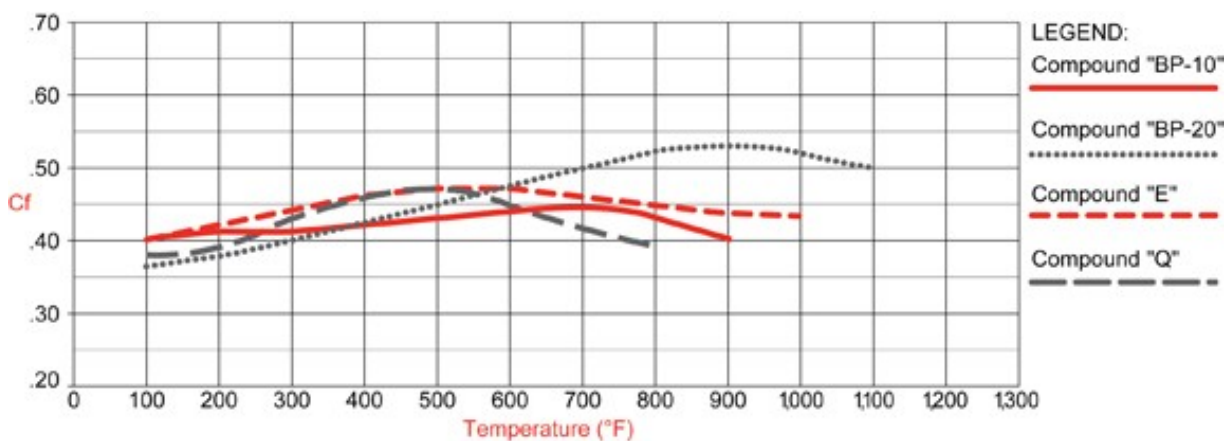


Figura 14 – Gráfico pastilhas de freios

Fonte: adaptado de (WILWOOD, 2016)

Durante testes a equipe descobriu que a temperatura de trabalho estava entorno de 170 graus, dessa forma algumas opções eram viáveis para se obter uma melhor frenagem, entretanto devido ao alto custo de alguns compósitos o material escolhido para a pastilha foi o *compound* "BP-10". De maneira que apresenta uma boa força de atrito para as temperaturas de trabalho e um baixo custo.

O processo de frenagem tem seu início quando o piloto aplica uma força no pedal de freio, realizando a pressão necessária no cilindro mestre que por sua vez ativa as pinças e realiza a frenagem. Assim, faz-se necessário explicar este componente a seguir.

3.2.3 Pedal de freio

A partir da função básica e dos requisitos definidos, o projeto do pedal de freio é iniciado. Sendo importante notar dois fatores ao dimensionar o componente, que são o requisito definido na competição de suportar 2000N e a necessidade do fator de alavanca que amplifica a força do piloto de maneira que a direção seja o mais ergonômica possível.

Sabendo desses requisitos a equipe defini o braço de alavanca necessário para atuar no cilindro e realiza um desenho 3D em *textitsolidworks* com as dimensões necessárias, como o peso fica elevado se for realizado um componente sólido, são realizadas otimizações topológicas na superfície. Como as variadas otimizações realizadas podem fragilizar o pedal, são realizadas simulações estruturais com um coeficiente de segurança de pelo menos 1.5, no qual são definidas condições de contorno e o material do pedal, como mostra a próxima figura:

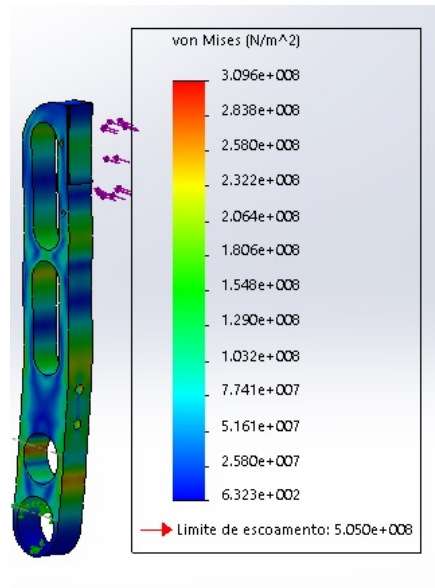


Figura 15 – Simulação do pedal de freio

O material definido para este pedal foi o alumínio 7075-T6, visto que os patrocinadores tinham a disponibilidade deste material e que o mesmo oferece uma ótima combinação de baixo peso e alta resistência. Como o pedal é um corpo sólido foram desenvolvidos apoios superiores e inferiores para o pé, visando uma melhor ergonomia. Como mostra a imagem a seguir:

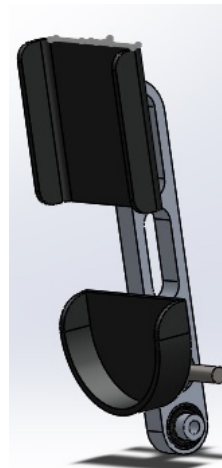


Figura 16 – Pedal de freio

Com o intuito de ganhar um maior *know-how* de fabricação e manipulação de fibra os suportes foram laminados em fibra de carbono e fibra de vidro. Procedimento que assegurou um maior aprendizado, além de complementar o componente com suportes de baixo peso e alta resistência mecânica. O próximo componente que fica montado de maneira integrada ao pedal e tem por função distribuir a força entre os pedais é a *balance bar*, que será explicada a seguir.

3.2.4 Balance bar

A Balance bar é o componente que deve distribuir a força aplicada no pedal entre os cilindros mestres, que por sua vez distribuem a força de frenagem entre os eixos. Assim como os outros componentes seus principais requisitos foram definidos como baixo peso, boa resistência e fácil montagem e desmontagem.

Durante o seu uso o sistema de freios pode ter necessidades diferentes de frenagem na dianteira e na traseira, dessa forma a bias bar é ajustável para manter relações de frenagem de 50-50 ou 60-40, por exemplo. Abaixo é mostrado um desenho 2D do componente acoplado aos cilindros mestres.

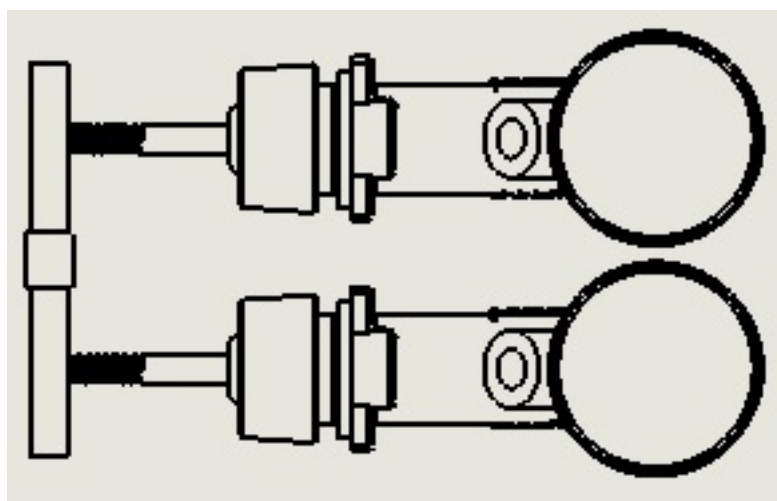


Figura 17 – Conjunto balance bar cilindra mestre

Como o intuito é de se ter frenagem simultânea em todas as rodas o ajuste frequentemente utilizado é de 50 por cento de frenagem na dianteira e 50 na traseira, de modo que o carro seja aprovado na prova de frenagem. Esses dois componentes são responsáveis pelo acionamento do cilindro mestre, que será explicado a seguir.

3.2.5 Cilindra mestre e linhas de freio

Os cilindros mestre assim como as pinças e pastilhas, são escolhidos em modelo comercial, no qual se define a dimensão de saída, que é o principal parâmetro para identificar a força transmitida. Essa força será transferida em seguida pelas linhas de freio. Como o regulamento especifica que devem ser utilizadas duas linhas independentes no sistema de frenagem. Então foram escolhidos dois cilindros mestre de simples ação com saída para a linha de freio de 5/8, também da marca *Wilwood*, como mostra a imagem a seguir:



Figura 18 – Cilindro mestre wilwood

Fonte:([WILWOOD, 2016](#))

Como explicado as linhas de freio que fazem o transporte do fluido do cilindro mestre para as pinças devem ser distribuídas em duas linhas independentes. Além disso o regulamento define no item T 7.1.5 que as mangueiras devem ter armadura metálica. Dessa forma podem ser escolhidas duas opções as linhas rígidas ou as flexíveis, que foram explicadas no segundo capítulo. Com o intuito de garantir uma fácil montagem e boa confiabilidade em questão de vazamentos, a equipe optou por adotar linhas flexíveis no carro todo, o Aeroquip.

Os últimos componentes explicados,(Pedal de freio, cilindro mestre e balance bar) são montados no pedal box, uma estrutura que acopla os componentes e suporta os diversos esforços. Sendo assim, este componente será explicado a seguir.

3.2.6 Pedal box

O *pedal box* é projetado para acoplar os pedais de freio, acelerador e os componentes do cilindro mestre, com o intuito de se ter um sistema mais leve e mais eficiente, foram utilizados diferentes materiais nos pedais e no acoplamento deles. Sua fabricação é feita com uma chapa de aço 1020 com rasgos nas laterais, garantindo o movimento dos pedais e seu ajuste para pilotos de diversas estaturas, outro fator interessante é que ele acopla o cilindro mestre diretamente ao pedal de freio, facilitando a montagem e o funcionamento.

Assim como os outros componentes fabricados é necessária a realização de um desenho 3D e mais que isso, é necessário fazer o *assembly* dos componentes. Este *assembly* deve ser sempre realizado da maneira mais precisa possível e com todos os componentes, pois qualquer erro nessa etapa, podera gerar falhas na montagem, em seu funcionamento ou gerar problemas de manutenção. A seguir é apresentada uma imagem do pedal box com os seus componentes montados.

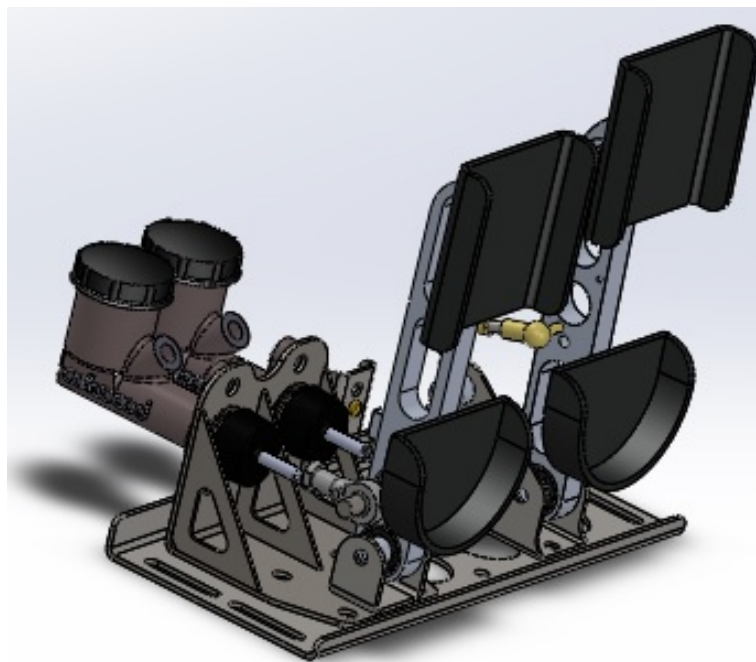


Figura 19 – Pedal box

Conhecidos os diversos componentes do sistema, suas funções e requisitos, se pode iniciar a análise de falhas, que será apresentada no capítulo seguinte. De maneira que siga a ordem de análise indicada no capítulo 2, primeiro aplicando a árvore de falhas e depois o FMEA.

4 Análise das falhas

A partir da análise dos componentes em um sistema de frenagem e dos componentes desenvolvidos pela a equipe é possível identificar que cada item tem uma função específica, seja ela primária ou secundária e o seu não cumprimento gera uma falha para o sistema. Desta maneira, após a apresentação do sistema de frenagem do capítulo anterior, pode-se dividir o sistema em dois conjuntos básicos, o acionador e o de frenagem como mostrado na imagem abaixo:

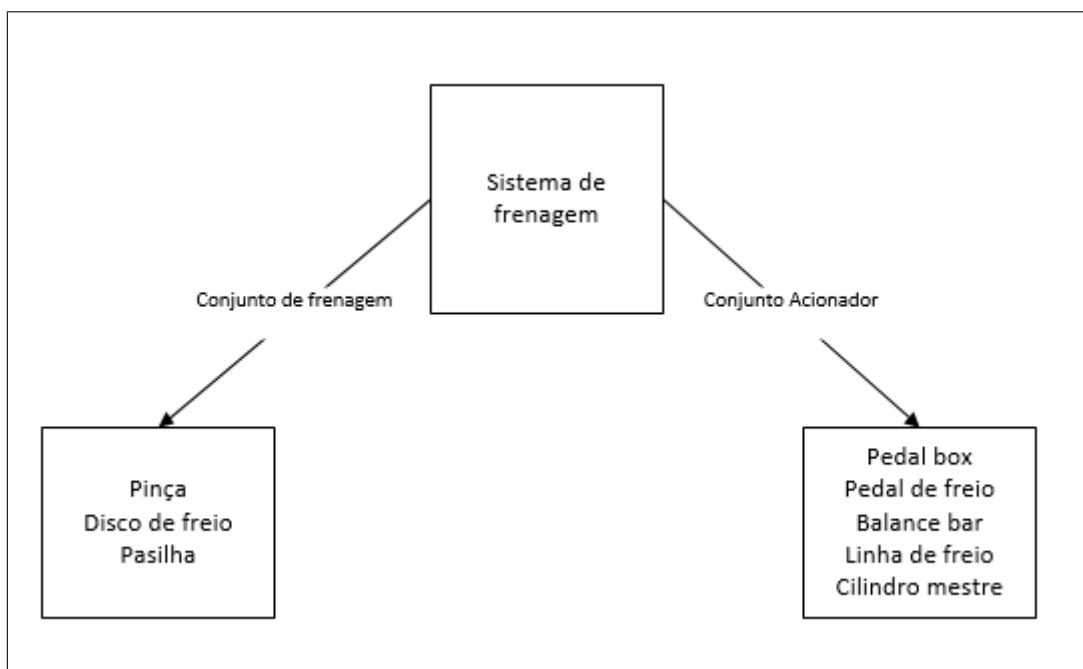


Figura 20 – Conjunto acionador e de frenagem

Conhecidos os componentes e quais são suas funções, pode se iniciar a análise das falhas, que foi realizada pelas duas ferramentas apresentadas no referencial teórico o FMEA e o FTA.

A utilização de ambas pode ser aplicada de várias maneiras. Neste trabalho a lógica empregada foi a de primeiro realizar um FTA identificando como as falhas principais se desdobram em causas menores e em outras falhas. Em seguida, com a visualização de um maior número de falhas primárias e intermediárias se realizou o FMEA com essas falhas. Para otimizar a execução da análise o FMEA foi utilizado mesclando conceitos de projeto e processo, analisando falhas relacionadas a montagem, fabricação e projeto do componente. Além disso, é importante notar que este procedimento foi realizado de maneira cíclica, retornando para o início, verificando possíveis otimizações tanto na árvore, quanto nas tabelas do FMEA.

Essa lógica foi adotada pois a Árvore de falhas encadeia as falhas de uma maneira visual, gerando eventos básicos que não podem ser mais expandidos em outras falhas, facilitando assim a análise do FMEA, que visa trazer um maior detalhamento para essas falhas, as complementando com causas, efeitos, e parâmetros de avaliação (HELMAN H.; ANDERY, 1995)

4.1 Análise de árvore de falhas

Como descrito anteriormente, a partir das funções é possível descobrir quais são as principais falhas geradas nos diversos componentes, por isso é importante analisar como elas se desdobram e o que pode ocasionar essas falhas maiores. Elencando assim os principais eventos básicos e intermediários. Eventos os quais que darão origem para a análise do FMEA.

Com o intuito de se ter um maior entendimento de cada árvore de falha é importante notar que elas foram realizadas com componentes separados e surgem de suas principais falhas, ou aquelas relacionadas ao não cumprimento de seus requisitos e funções básicas. Além disso, elas estão orientadas de cima para baixo, causando o efeito chamado de *Top-Down*, que parte do evento mais geral para eventos mais precisos (KHAIYUM; KUMARASWAMY, 2014). A seguir serão apresentadas as diversas falhas realizadas com os componentes do sistema, iniciando pelo conjunto acionador.

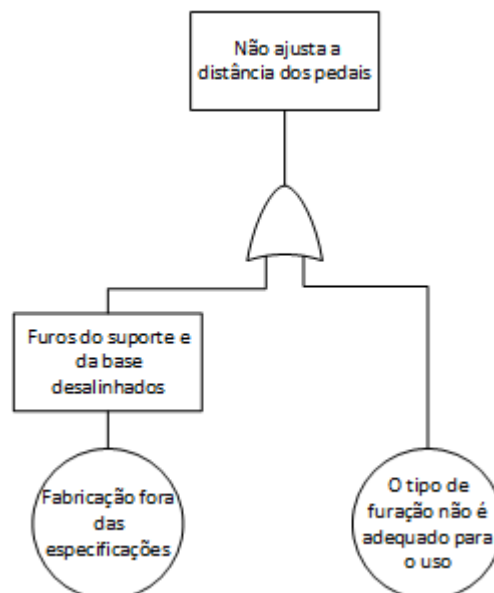


Figura 21 – Falha de ajuste do pedal box

A quebra ou empenamento dos componentes tem pouca chance de acontecer, já que são realizadas simulações estruturais, entretanto é importante considerar todas as possíveis falhas no componente. que pode ser originados de baixa resitência aos esforços,

que se desencadeia tanto em erros nas simulações quanto na fabricação e outra falha pode ser por erro de montagem.

Outra falha principal que pode ser desencadeada é o de não mover o *pedal box*, sendo caracterizada pelo não cumprimento de um requisito, gerando problemas no ajuste de distância das pedaleiras, de maneira a impossibilitar a pilotagem adequada. Sendo originado por dois outros eventos, que podem ser uma fabricação incorreta, de modo que os furos não podem ser mudados da posição inicial ou a segunda seria que o uso de furos tanto no suporte quanto na base não são adequados.

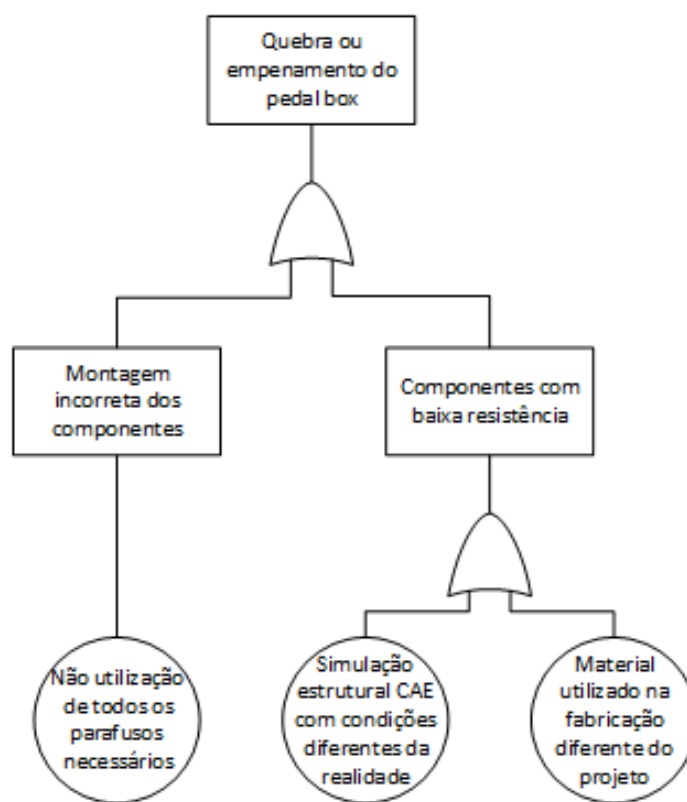


Figura 22 – Falha estrutural do pedal box

Um dos componentes diretamente associado é o pedal de freio, que quando não cumpre sua função básica de transferir a força para a *balance bar* ele impossibilita a frenagem. Essa falha pode vir da falha de um rolamento, ou por não cumprir seu requisito de ampliar a força ou por falha estrutural, sendo esta tanto do corpo do pedal, que pode vir dos mesmos erros do *pedal box* ou por falha nas pedaleiras, que são itens laminados em fibra de carbono.

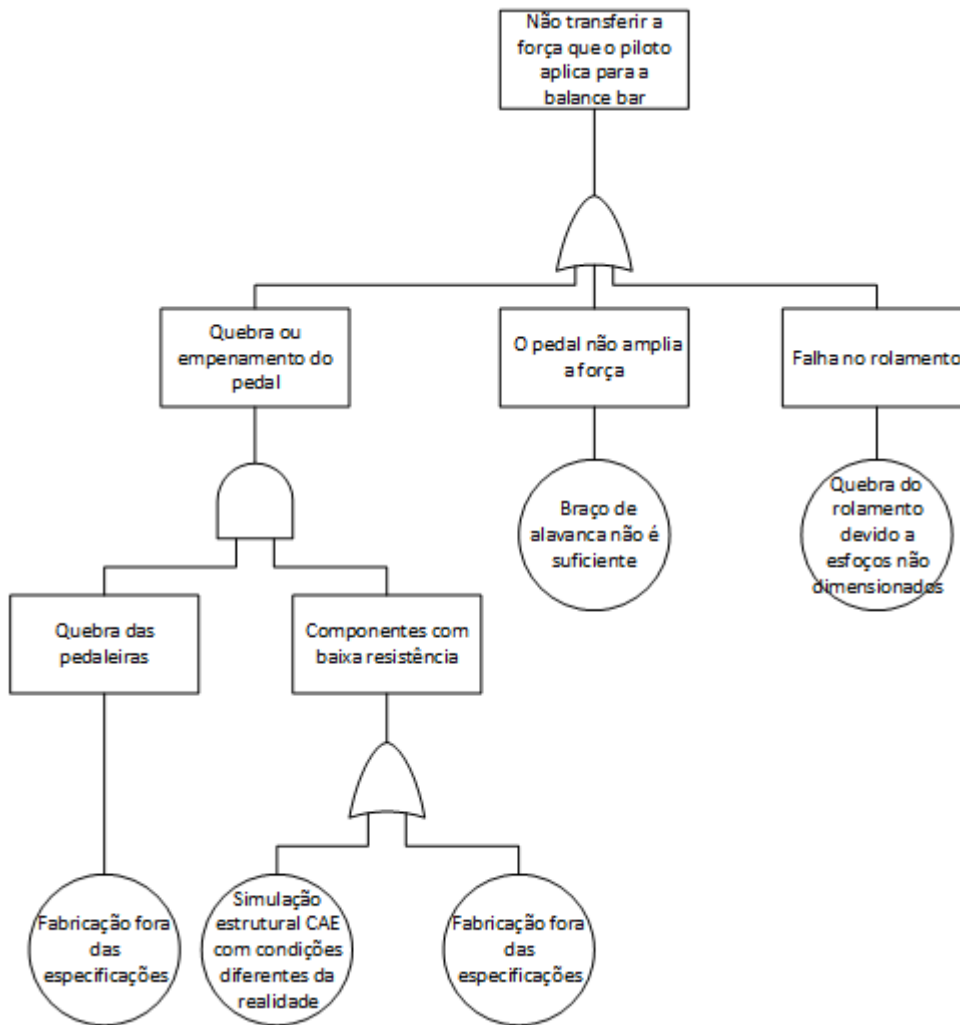


Figura 23 – Quebra ou empenamento do pedal de freio

Assim como na árvore do *pedal box* é possível perceber que a quebra ou empenamento do componente também está na árvore demonstrada acima. Além disso, ambas podem ser originadas por erros de simulação ou fabricação fora das especificações. O mesmo vale para as outras falhas estruturais, como exemplo a falha estrutural da *balance bar*, como é mostrado a seguir.

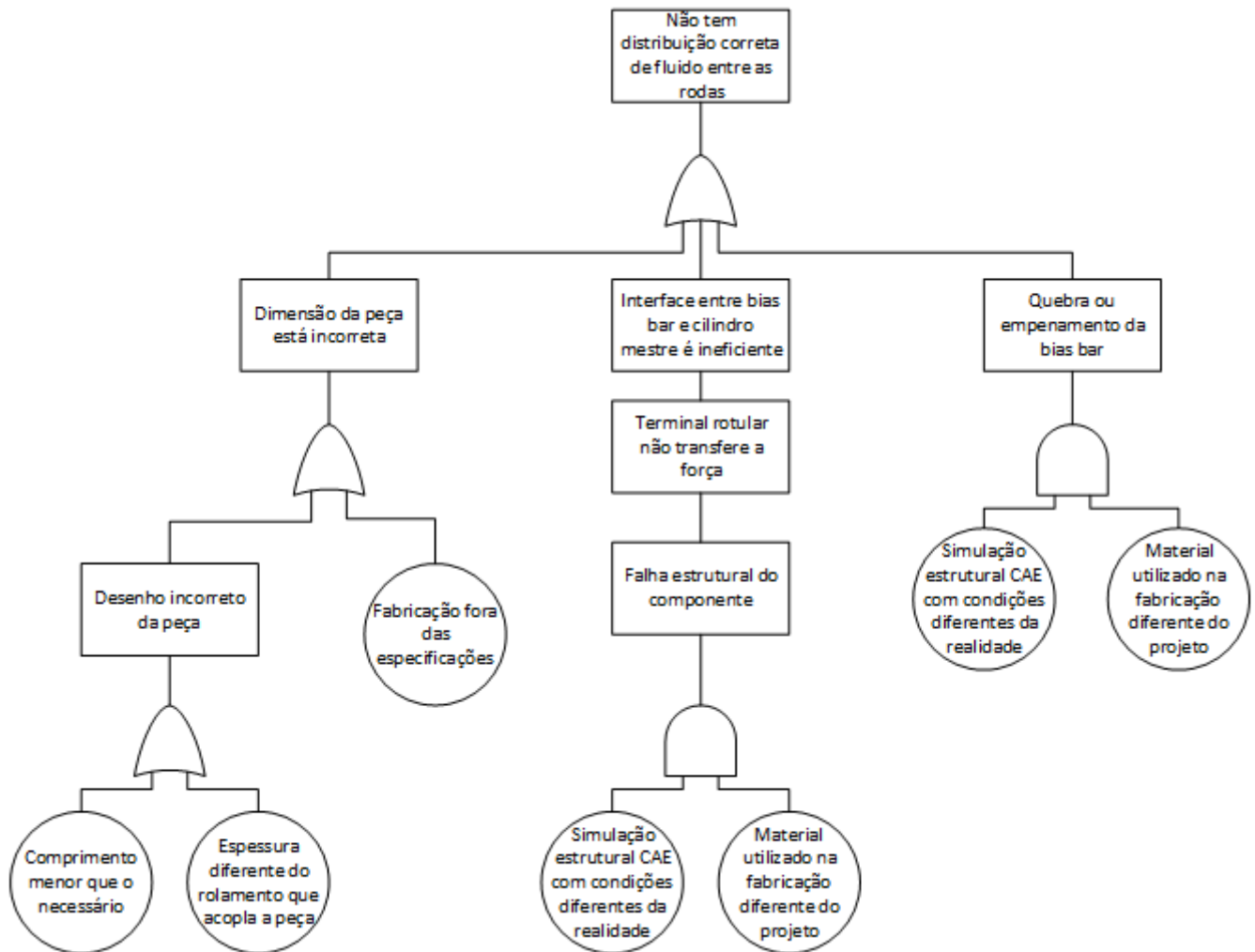


Figura 24 – Falhas da bias bar

Apesar de ser um componente pequeno e simples a falha principal na *balance bar* está associada a sua função básica, a de distribuir corretamente o fluido entre os dois eixos. Como pode ser observado na figura esta falha pode ser encadeada em três eventos intermediários, que vão se multiplicando, tanto diretamente ou com causas E e OU.

O primeiro evento intermediário, o de quebra ou empenamento, está logicamente sequenciado como os anteriores, e além disso outro evento se desencadeia da mesma maneira, que é o de falha no terminal rotular. E por fim uma falha por dimensões incorretas pode se originar de erros de desenho ou fabricação.

A seguir são apresentados os dois componentes do conjunto acionador que estão em contato direto com o fluido, o cilindro mestre e a linha de freio.

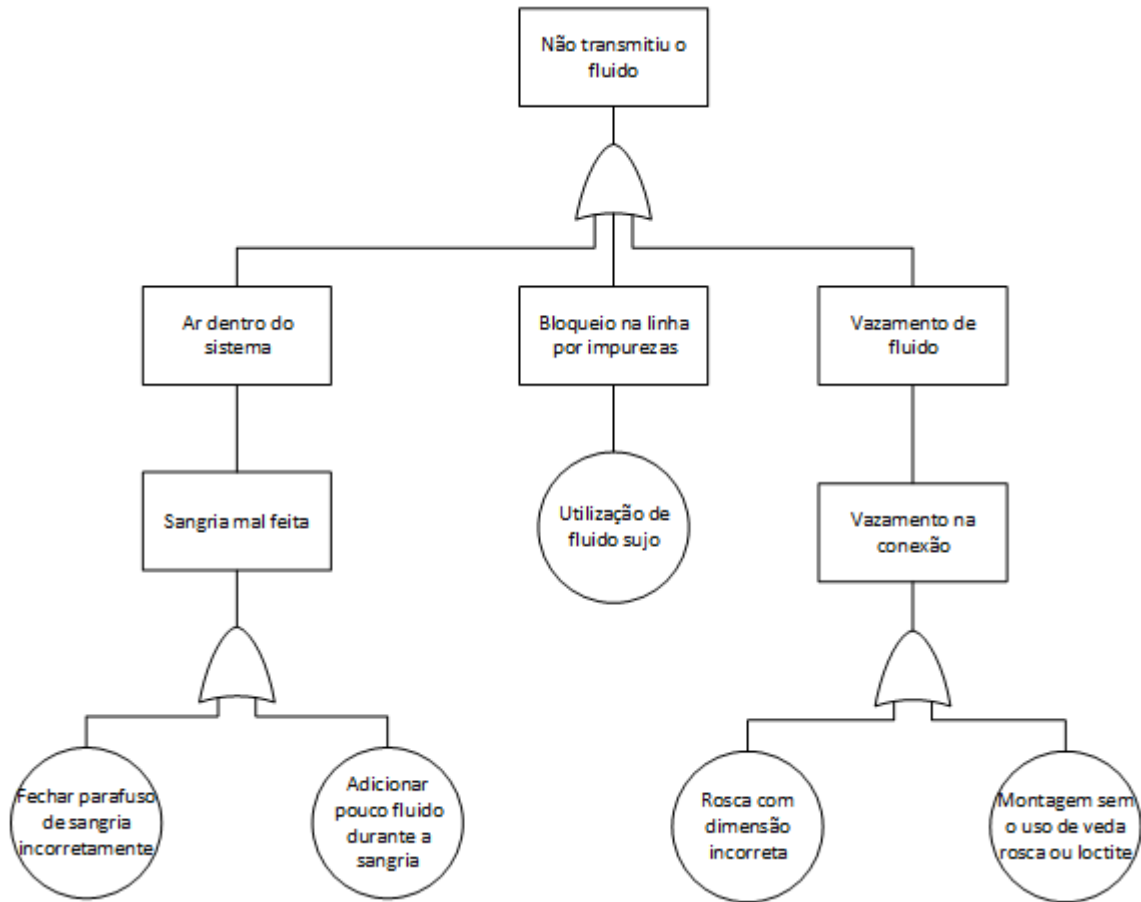


Figura 25 – Vazamento na linha de freio

A não transmissão de um fluido afeta completamente a frenagem, já que este é o que realiza a frenagem. Sendo um fator crítico, caso ocorra, apesar de ser originado de três eventos intermediários, a equipe identificou que o erro mais comum é devido a vazamentos no sistema, que são tanto originados por montagem incorreta, como não usar loctite, como por roscas incompatíveis.

Como o cilindro mestre é um componente que também está em contato direto com o fluido, ele também é sequenciado em três eventos intermediários, sendo alterada apenas a ramificação central, se comparado com a árvore anterior. E assim como a linha de freio, foi constatado que a principal falha estava associada a vazamentos.

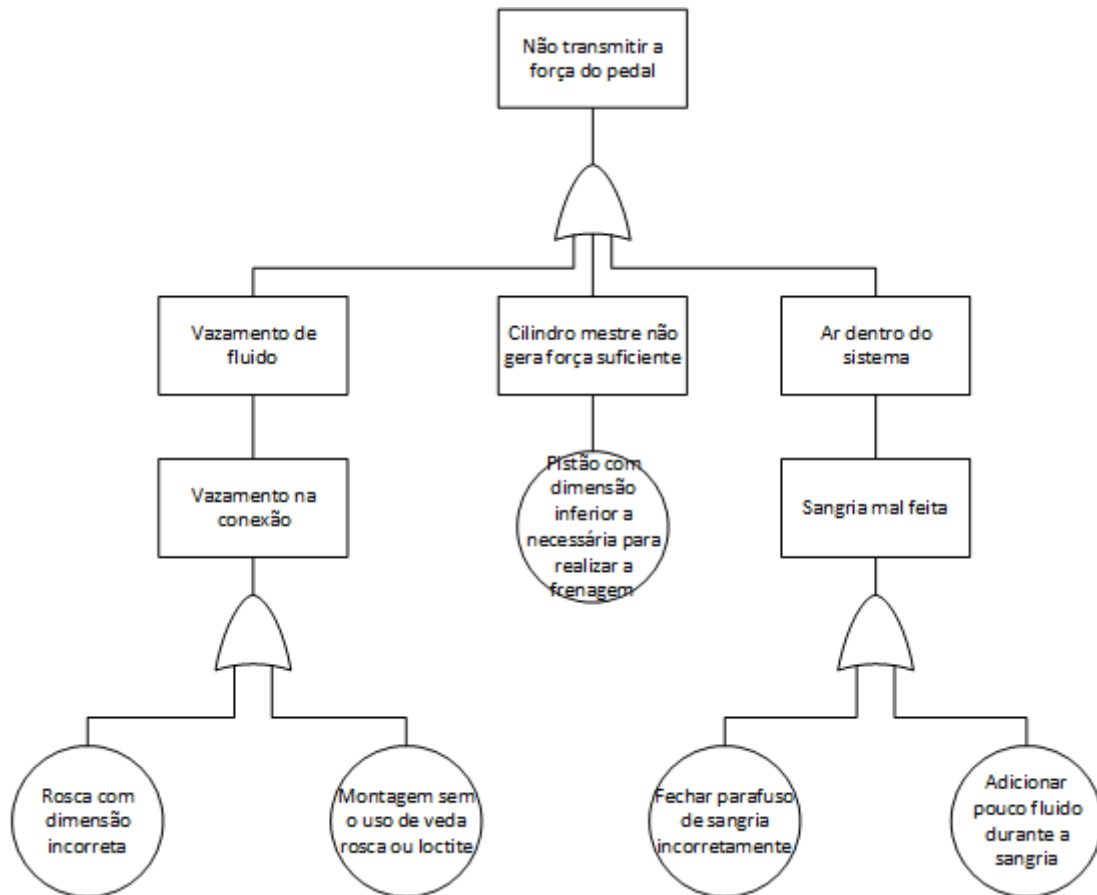


Figura 26 – Falhas do cilindro mestre

Saindo do cilindro mestre e passando pelas linhas de freio o fluido alcança o sistema de frenagem, iniciado pelas pinças, que geram força na pastilha, que por sua vez geram a frenagem quando em contato com o disco. E assim como os sistemas do conjunto acionador sua principal falha é encontrada facilmente pela tabela de funções e requisitos. Sendo assim a sua árvore de falhas está associada ao não cumprimento de sua função primária, assim como para o caso da pastilha de freio. Como os dois componentes são interdependentes, ambas as árvores são mostradas em seguida.

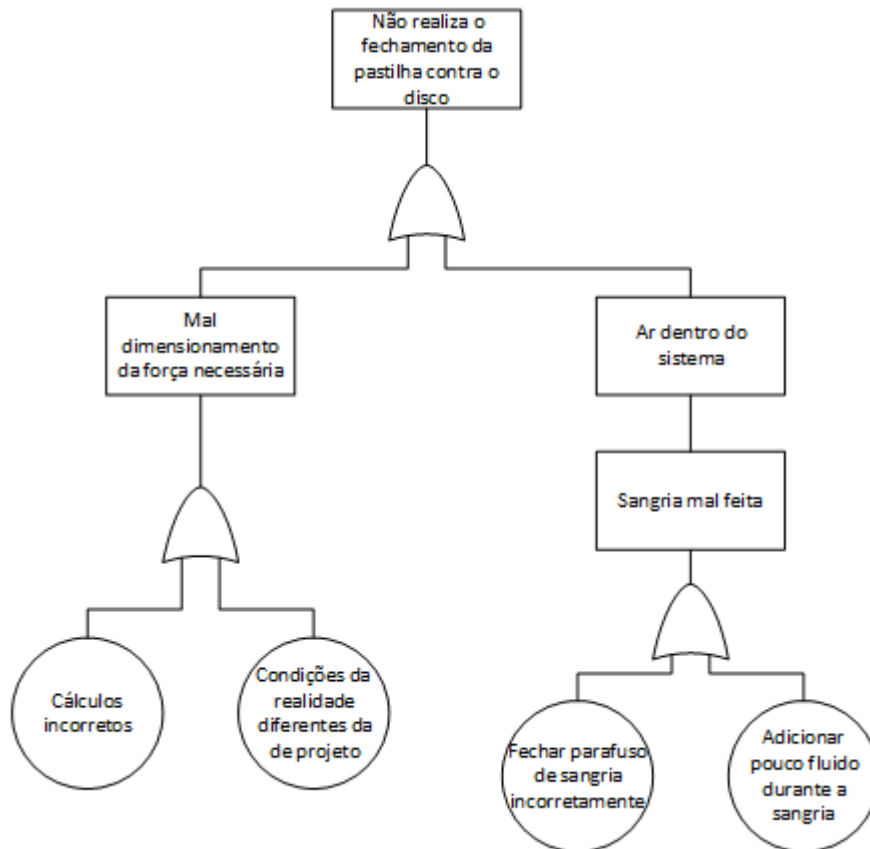


Figura 27 – Falha da pinça

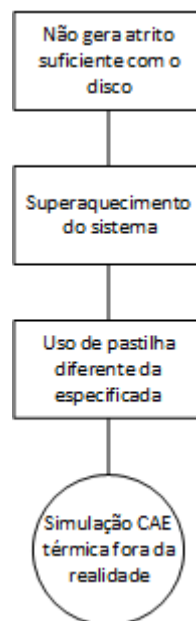


Figura 28 – Falha da pastilha

As pinças e as pastilhas são ambos componentes comprados, dessa forma erros de manufatura não foram considerados na árvore. As duas principais causas para sua falha

são um dimensionamento mal feito ou por ar dentro do sistema, sendo que o primeiro é mais grave, pois o erro só é identificado ao comprar e testar a pinça. Igualmente a pastilha, irá apresentar sua falha principal se a escolha do material da pastilha for incorreta e isso é originado de simulações mal feitas e pela não análise da pastilha a ser comprada.

A seguir são apresentadas duas árvores de falha para o disco de freio, para este componente o uso de duas árvores foi mais proveitoso, isto que foram identificadas duas falhas globais, que não estavam diretamente associadas.

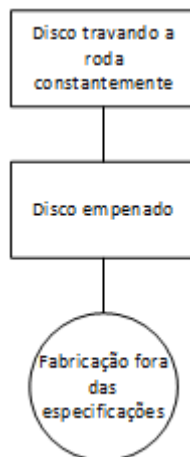


Figura 29 – Travamento do disco de freio

Esta árvore é curta pois o tipo de falha, não está encadeada em muitas causas, sendo assim, é mostrado de maneira linear e com apenas três elementos. A seguir é apresentada a segunda árvore, que é um tanto quanto mais extensa, podendo se dizer que o disco é um sistema mais sujeito a falhas e que assim como a pastilha pode apresentar problemas de superaquecimento, entretanto a diferença é que neste componente a falha pode ser originada por diversas falhas.

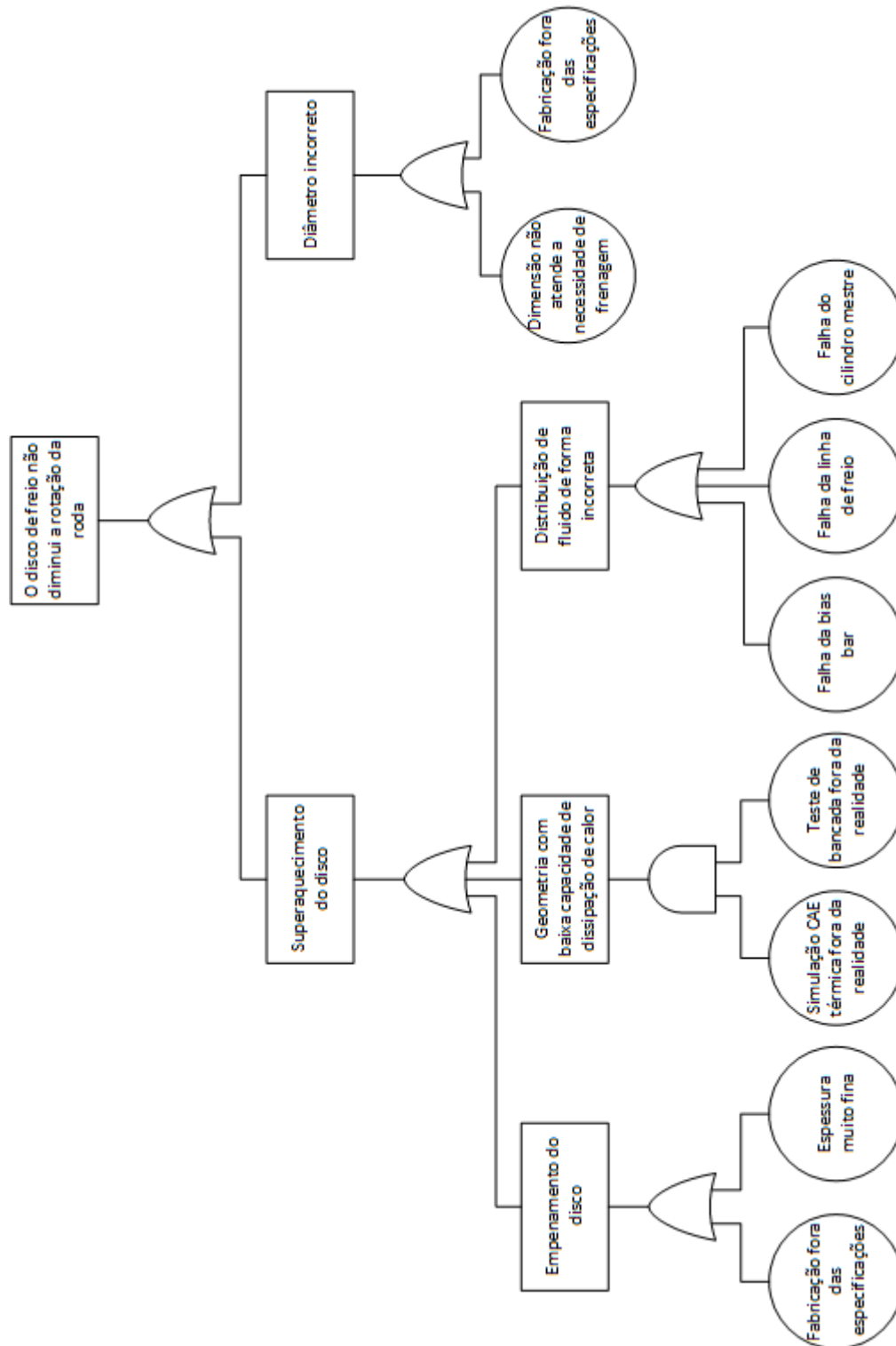


Figura 30 – Falha do disco de freio

Realizadas todas as árvores, de modo a chegar na origem das falhas maiores, sem ter como crescer mais as mesmas, se pode iniciar o FMEA, que é responsável por realizar um detalhamento maior. A análise pelo FMEA se iniciará encontrando os efeitos para as falhas principais e em seguida serão calculados a sua severidade. Para a realização dessa

estimativa de severidade, foi criada uma tabela que define o critério utilizado, como será mostrada na secção seguinte.

4.2 Análise dos efeitos e da severidade de cada falha

Os efeitos das falhas, vem de análises realizadas pelos integrantes da equipe, quanto as funções de um componente, o que a falha deste pode ocasionar e pelo *feedback* do piloto, que é o cliente final do carro. As análises realizadas pelos integrantes de acordo com suas funções, foram fundamentais em se avaliar o efeito mais crítico para o sistema, isto para o caso daquelas que ainda não ocorreram, sempre visando a segurança do piloto. E a segunda análise que é para as que já ocorreram ou que se tem um maior número de dados foi baseada no *feedback* direto do piloto.

Além dos efeitos que uma falha gera é importante avaliar a sua criticidade ou sua severidade, que relata um impacto em específico. Para realizar a avaliação da severidade deste sistema, foi realizada uma adaptação das tabelas do manual de referência do FMEA, de modo a ter um resultado personalizado. As principais alterações são quanto aos índices que serão de 1 a 5 e quanto ao detalhamento do critério.

Tabela 7 – Avaliação da severidade

Severidade	Critério	Índice
Baixíssima	Nenhum efeito	1
Baixa	Ruído ou vibração	2
Moderada	Perda da função secundária	3
Alta	Perda de performance	4
Muito alta	Oferece risco ao piloto	5

Apesar da tabela ter sido desenvolvida para este caso em específico, ela foi pensada com o intuito de se criar um padrão de análise para os carros de FSAE e para os outros componentes do carro. Dessa forma podendo manter uma análise semelhante ao ser realizada por pessoas diferentes ao longo do tempo.

Os modos de falha e seus efeitos foram analisados por componentes, assim tendo uma visualização inicial de cada falha no FTA, foi possível elencar os seus principais efeitos como é mostrado na tabela a seguir.

Tabela 8 – Severidade dos componentes

Componente	Modo de falha	Efeito	Severidade
Pedal	Não transferir a força que o piloto aplica para a balance bar	O carro não freia	5
Pedal box	Não ajusta a distância dos pedais	Pilotos com diferentes estaturas pilotam com baixo desempenho	4
	Quebra ou empenamento do pedal box	Os pedais se soltam fornecendo risco ao piloto	5
Balance bar	Não distribui o fluido de maneira correta	Não trava as rodas simultaneamente	4
Linha de freio	Não transmitir o fluido	O carro não freia	5
Cilindro mestre	Não transmitir a força do pedal		
Pastilha	Não realiza o fechamento da pastilha contra o disco		
Pinça	Não gera atrito suficiente com o disco		
Disco de freio	Não diminui a rotação da roda		
	Disco travando a roda constantemente	Dificuldade de direção do carro	

Ao analisar a tabela é possível visualizar que as severidades avaliadas se concentraram de duas maneiras específicas, sendo elas: o risco para o piloto, que seria o carro não frear; e casos de perda de performance, isso se dá pelo fato de ao se realizar o FMEA as considerações foram baseadas sempre no pior dos casos, de maneira que o efeito seja o mais crítico possível, aderindo uma maior segurança para as falhas.

Outro aspecto interessante a se analisar é que falhas em diferentes componentes podem gerar um mesmo efeito, que é o caso de não frear por exemplo, que é considerado mais crítico. Encontrados os efeitos e a severidade para cada falha principal no FMEA, que conseqüentemente são os efeitos das falhas básicas, o próximo passo é o de encontrar a ocorrência das falhas. Como o FMEA busca um maior detalhamento das falhas a ocorrência será analisada pelos eventos intermediários e pelos eventos básicos.

Assim como a severidade é necessário se ter um parâmetro de cálculo para essas ocorrências, desse modo foi adaptada uma tabela do manual do FMEA, para o este caso, de forma a avaliar a recorrência das falhas, como é mostrado na tabela a seguir.

Tabela 9 – Avaliação da ocorrência

Probabilidade da Falha	Critérios: Ocorrência da Causa - DFMEA	Classificação
Muito Alta	Novo projeto, sem histórico	10
Alta	A falha é inevitável com nova aplicação	9
	A falha é provável, com nova aplicação, ou alteração no ciclo de trabalho	8
	A falha é incerta, com nova aplicação, ou alteração no ciclo de trabalho	7
Moderada	Falhas frequentes associadas a projetos similares, ou em simulação e testes de projeto	6
	Falhas ocasionais associadas a projetos similares, ou em simulação e testes de projeto	5
	Falhas isoladas associadas a projeto similar, ou em simulação e testes de projeto	4
Baixa	Somente falhas isoladas, associadas a projeto praticamente idêntico, ou em simulação e testes de projeto	3
	Falhas não observadas, associadas a projeto praticamente idêntico, ou em simulação e testes de projeto	2
Muito Baixa	A falha é eliminada por controle preventivo	1

Para avaliar a ocorrência das falhas básicas, foi utilizada a tabela acima, que facilita o diagnóstico ao colocar os critérios para a avaliação de forma textual. Além do detalhamento dos critérios se tem uma escala de probabilidade, variando entre muito baixa e muito alta. E por fim apresenta a classificação, que diferentemente da severidade foi necessário colocar uma escala de 0 a 10, de modo a garantir que a grande variação na escala ofereça uma maior precisão dos resultados.

Como descrito anteriormente, as ocorrências serão avaliadas a partir das causas básicas e intermediárias, gerando um maior detalhamento. Para facilitar a visualização de dados foram criadas três tabelas, como será mostrado a seguir. Sendo duas referentes ao conjunto acionador e uma referente ao conjunto de frenagem.

Tabela 10 – Avaliação da ocorrência sistema acionador de pedais

Items analisados	Efeito (s) Potenciais de Falhas	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	Ocorrência
Pedal de freio	O carro não freia	Pedal empenado ou quebrado	Fabricação fora das especificações	2
			Quebra das pedaleiras por fabricação fora das especificações	7
			Componente com baixa resistência por Simulação CAE incorreta	4
		Falha no rolamento	Quebra do rolamento devido a esforços não dimensionados	2
		O pedal não amplia a força	Braço de alavanca não é suficiente	5
Pedal box	Os pedais e o cilindro mestre se soltam, oferecendo risco ao piloto	Componentes com baixa resistência	Simulação CAE Incorreta	2
			Material utilizado na fabricação diferente do projeto	2
		Montagem incorreta dos componentes	Não utilização de todos os parafusos	2
	Pilotos com diferentes estaturas pilotam com baixo desempenho	Furos do suporte e da base desalinhados	Fabricação incorreta da base	3
		O projeto é inadequado para o tipo de uso, projeto mal elaborado		4

Importante notar que nesta primeira tabela, eventos se encadeiam em mais de uma falha intermediária na árvore de falhas, então como forma de simplificar a visualização essas caixas separadas de falhas foram integradas a apenas uma de maneira textual. Esse fato se repete para as duas tabelas seguintes.

Tabela 11 – Avaliação da ocorrência sistema acionador hidráulico

Items analisados	Efeito (s) Potenciais de Falhas	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	Ocorrência	
Bias bar	Não trava simultaneamente as rodas	Dimensão da peça está incorreta	Fabricação fora das especificações	2	
			Espessura diferente do rolamento que acopla a peça	2	
			Comprimento menor que o necessário	2	
		Quebra ou empenamento da balance bar	Falha estrutural do componente, devido a falha no terminal rotular	Simulação CAE incorreta	2
				Material utilizado na fabricação diferente do projeto	2
				Simulação CAE Incorreta	2
cilindro mestre	Carro não freia pois não tem força aplicada	Vazamento de fluido nas conexões	Montagem sem o uso de veda rosca ou loctite	6	
			Rosca com dimensão incorreta	2	
		Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Cilindro mestre não gera força suficiente	Pistão com a dimensão menor do que a necessária	2
			Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo		6
				Adicionar pouco fluido durante a sangria	6
Linha de freio	O carro não freia	Vazamento de fluido nas conexões	Montagem sem o uso de veda rosca ou loctite	6	
			Rosca com dimensão incorreta	2	
		Bloqueio na linha por impurezas	Utilização de fluido sujo	2	
		Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo	6	
			Adicionar pouco fluido durante a sangria	6	

Tabela 12 – Avaliação da ocorrência Conjunto de frenagem

Itens analisados	Efeito (s) Potenciais de Falhas	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	Ocorrência	
Disco de freio	O carro não freia	Diâmetro incorreto	Dimensão não atende a necessidade de frenagem	2	
			Fabricação diferente do especificado	2	
	Superaquecimento do disco	Geometria com baixo poder de dissipação de calor	Distribuição de fluido de maneira incorreta	Simulação térmica fora da realidade	2
				Testes de bancada inválidos	2
			Empenamento do disco	Falha do cilindro mestre	6
				Falha da bias bar	6
				Falha da linha de freio	6
			Dificuldade na direção do carro	Disco travando a roda constantemente devido ao empenamento do disco	Fabricação com chapa empenada
	Espeçura muito fina	2			
	Pastilha	O carro não freia	Superaquecimento, devido ao uso de pastilha diferente da especificada	Simulação térmica fora da realidade	2
Pinça	O carro não freia	Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo	6	
			Adicionar pouco fluido durante a sangria	6	
		Mal dimensionamento da força de frenagem necessária	Cálculos incorretos	2	
			Condições da realidade diferentes das de projeto	2	

As tabelas realizadas apresentam os efeitos das árvores de falhas, que são os principais efeitos para a falha inicialmente definida. Em seguida são apresentadas as falhas intermediárias que estão diretamente associada, ou aquelas que são subsequentes, sendo apresentadas de maneira mesclada e por fim os eventos básicos, que são representados por círculos na árvore de falhas e são as origens de cada falha. Sendo avaliadas de maneira individual.

A identificação das causas, o quanto elas ocorreram e sua probabilidade de ocorrer é importante para se catalogar os dados e se ter valores definidos. Entretanto não é suficiente para a análise, sendo assim importante descobrir como é feita a detecção desta falha e se ela é efetiva. A seguir serão apresentados os modos de detecção, ou controles utilizados, assim como sua eficácia.

4.3 Detecção de falhas e controles preventivos

A detecção de falhas é um indicativo que mostra a probabilidade de identificação. Uma falha pode ser identificada em várias etapas de um projeto, quanto antes identificada mais fácil é para consertá-la. Dessa maneira a próxima tabela mostra como se detectar, em qual etapa e qual a chance de encontrá-la.

Tabela 13 – Controle de detecção

Probabilidade de Detecção	Crítérios	Classificação
Praticamente Impossível	Não se pode detectar a falha	10
Muito Remota	Fraca capacidade de detecção. Análise virtual com condições diferentes da realidade	9
Remota	Teste passa/falha antes da competição	8
Muito Baixa	Teste até a falha antes da competição	7
Baixa	Ensaio de degradação antes da competição	6
Moderada	Teste passa/falha em modelo protótipo	5
Moderadamente Alta	Teste para falhar em modelo protótipo	4
Alta	Ensaio de degradação em modelo protótipo	3
Muito Alta	Simulação Cae em projeto e detecção visual facilitada durante a montagem	2
Praticamente Certa	A causa da falha ou modo de falha não pode ocorrer porque foi totalmente prevenida através de soluções de projeto	1

Enquanto a tabela 13 mostra os controles possíveis para se detectar uma falha e qual a chance de encontrá-la. As tabelas 14,15 e 16 mostram quais são os controles de prevenção e detecção utilizados no sistema de frenagem para encontrar as falhas pela equipe. Além disso realiza a classificação para os diversos tipos de chances de detectar a falha, sendo avaliado de 1 a 10, assim como ocorrência.

Tabela 14 – Detecção pedal box e pedais

Items analisados	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	Controle de projeto Para detecção de falhas	Detecção
Pedal de freio	Pedal empenado ou quebrado	Fabricação fora das especificações	Comparar corpo do pedal ao desenho CAD	2
		Quebra das pedaleiras por fabricação fora das especificações		9
		Componente com baixa resistência por Simulação CAE incorreta	Simulação CAE com aplicação de força perpendicular	2
	Falha no rolamento	Quebra do rolamento devido a esforços não dimensionados	Utilização de normas com especificação técnica	10
	O pedal não amplia a força	Braço de alavanca não é suficiente	Realização do estudo ergonómico, confere projetos anteriores.	3
Pedal box	Componentes com baixa resistência	Simulação CAE Incorreta	Simulação estrutural com aplicação de força perpendicular	2
		Material utilizado na fabricação diferente do projeto	Teste na metrologia do material utilizado	2
	Montagem incorreta dos componentes	Não utilização de todos os parafusos	Teste passa/falha montando e desmontando o conjunto	7
	Furos do suporte e da base desalinhados	Fabricação incorreta da base	Teste de montagem	5
	O projeto é inadequado para o tipo de uso, projeto mal elaborado			

Tabela 15 – Detecção sistema acionador hidráulico

Items analisados	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	Controle de projeto Para detecção de falhas	Detecção
Bias bar	Dimensão da peça está incorreta	Fabricação fora das especificações		2
		Espessura diferente do rolamento que acopla a peça	Realização de desenho 3D e assembly	3
		Comprimento menor que o necessário	Realização de desenho 3D e assembly	3
	Falha estrutural do componente, devido a falha no terminal rotular	Simulação CAE incorreta	Realizar 3 simulações com condições prováveis de operação	3
		Material utilizado na fabricação diferente do projeto	Teste na metrologia do material	5
	Quebra ou empenamento da balance bar	Simulação CAE Incorreta	Realizar 3 simulações com condições prováveis de operação	2
Material utilizado na fabricação diferente do projeto		Teste na metrologia do material	5	
Cilindro mestre	Vazamento de fluido nas conexões	Montagem sem o uso de veda rosca ou loctite	Teste para verificar vazamento ao realizar sangria do sistema	8
		Rosca com dimensão incorreta	Uso de instrumentos de medição para verificar o passo da rosca	2
	Cilindro mestre não gera força suficiente	Pistão com a dimensão menor do que a necessária	Teste de frenagem ao montar o carro e cálculos previos	2
	Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo	Realização da sangria até parar de sair ar	2
Adicionar pouco fluido durante a sangria		2		
Linha de freio	Vazamento de fluido nas conexões	Montagem sem o uso de veda rosca ou loctite	Teste para verificar vazamento ao realizar sangria do sistema	8
		Rosca com dimensão incorreta	Uso de instrumentos de medição para verificar o passo da rosca	2
	Bloqueio na linha por impurezas	Utilização de fluido sujo	Verificar fluido utilizado	2
	Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo	Realização da sangria até parar de sair ar	2
Adicionar pouco fluido durante a sangria				

Tabela 16 – Detecção sistema de frenagem

Itens analisados	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	Controle de projeto Para detecção de falhas	Detecção
Disco de freio	Diâmetro incorreto	Dimensão não atende a necessidade de frenagem	Teste de frenagem	7
		Fabricação diferente do especificado	Fabricação realizada direta do CAD	2
	Geometria com baixo poder de dissipação de calor	Simulação térmica fora da realidade	Simulação Térmica	2
		Testes de bancada inválidos	Teste verificando comportamento da temperatura	2
	Distribuição de fluido de maneira incorreta	Falha do cilindro mestre	Verificação dos componentes antes da montagem	2
		Falha da bias bar	Verificação dos componentes antes da montagem	2
		Falha da linha de freio	Verificação dos componentes antes da montagem	2
	Empenamento do disco	Fabricação com chapa empenada	Conferir empenamento do disco na metrologia	8
		Espessura muito fina	Teste de bancada verificando o uso	2
	Disco travando a roda constantemente devido ao empenamento do disco	Fabricação com chapa empenada	Conferir empenamento do disco na metrologia	8
Pastilha	Superaquecimento, devido ao uso de pastilha diferente da especificada	Simulação térmica fora da realidade	Teste em bancada	5
Pinça	Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo	Realização da sangria	2
		Adicionar pouco fluido durante a sangria		
	Mal dimensionamento da força de frenagem necessária	Cálculos incorretos	Uso de tabelas dinâmicas para cálculo	2
		Condições da realidade diferentes das de projeto		9

As tabelas a cima apresentam todos os métodos e testes utilizados pela equipe para se detectar essas falhas e ainda mostra o quanto são eficazes a partir da nota atribuída, no qual um 2 significa que dificilmente o problema irá se propagar, pois já foi encontrado e um dez significa que a falha provavelmente passará despercebida, sendo necessária uma intervenção futura.

Encontrados os métodos para detecção a probabilidade de ocorrência, a severidade para cada falha e seus efeitos se pode calcular o NPR, que irá mostrar quais falhas são mais críticas. Esta conclusão do FMEA e do NPR serão apresentados no capítulo seguinte.

5 Resultados

O resultado de uma análise com as duas ferramentas são as árvores de falhas já apresentadas e as tabelas de FMEA, que serão apresentadas a seguir, no qual apresentam o índice de prioridade de risco para cada falha.

O índice de prioridade de risco tem como intuito concluir o FMEA, mostrando qual o risco para cada uma das falhas, de maneira que, quem está realizando faça uma análise e verifique quais falhas devem ser concertadas. Este índice pode ser calculado com a fórmula abaixo apresentada:

$$NPR = S \times O \times D \quad (5.1)$$

Onde:

- S=Severidade
- O=Ocorrência
- D=Detecção

A seguir serão apresentadas as tabelas finais do FMEA para cada componente com seu devido NPR e ainda, será apresentado a categoria de cada falha, seja ela de projeto, fabricação ou montagem.

Tabela 17 – FMEA pinça de freio.

Pinça									
Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potenciais de Falhas	S	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	O	Controles de Projeto Para Detecção de Falhas	D	NPR	Categoria (Projeto, Fabricação, Montagem)
Não realiza o fechamento das pastilhas contra o disco	O carro não freia	5	Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo	6	Realização da sangria	2	60	Erro de montagem
				Adicionar pouco fluido durante a sangria	2		2	20	Erro de montagem
			Mal dimensionamento da força de frenagem necessária	Cálculos incorretos	2	Uso de tabelas dinâmicas para cálculo	2	29	Erro de projeto
				Condições da realidade diferentes das de projeto	6		9	270	Erro de projeto

Tabela 18 – FMEA pastilha de freio.

Pastilha de freio								
Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potenciais de Falhas	S	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	O	Controles de Projeto Para Detecção de Falhas	D NPK	Categoria (Projeto, Fabricação, Montagem)
Não gera atrito suficiente com o disco	O carro não freia	5	Superaquecimento, devido ao uso de pastilha diferente da especificada	Simulação térmica fora da realidade	2	Teste em bancada	5 50	Erro de projeto

Tabela 19 – FMEA disco de freio.

Disco de freio								
Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potenciais de Falhas	S	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	O	Controles de Projeto Para Detecção de Falhas	D NPK	Categoria(Projeto, Fabricação, Montagem)
O disco de freio não diminui a rotação da roda	O carro não freia	5	Diâmetro incorreto	Dimensão não atende a necessidade de frenagem	2	Teste de frenagem	7 70	Erro de projeto
				Fabricação diferente do especificado	2	Fabricação realizada direta do CAD	2 20	Erro de projeto
Superaquecimento do disco	O disco de freio não diminui a rotação da roda	5	Geometria com baixo poder de dissipação de calor	Simulação térmica fora da realidade	2	Simulação Térmica	2 20	Erro de projeto
				Testes de bancada inválidos	2	Teste verificando comportamento da temperatura	2 20	Erro de projeto
			Distribuição de fluido de maneira incorreta	Falha do cilindro mestre	6	Verificação dos componentes antes da montagem	2 60	Erro de projeto
				Falha da bias bar	6	Verificação dos componentes antes da montagem	2 60	Erro de projeto
			Empenamento do disco	Fabricação com chapa empenada	8	Conferir empenamento do disco na metrologia	8 320	Erro de fabricação
				Espessura muito fina	2	Teste de bancada verificando o uso	2 20	Erro de projeto
Travar a roda constantemente	Dificuldade na direção do carro	4	Disco travando a roda constantemente devido ao empenamento do disco	Fabricação com chapa empenada	8	Conferir empenamento do disco na metrologia	8 256	Erro de fabricação

Tabela 20 – FMEA pedal box.

Pedal box									
Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potenciais de Falhas	S	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	O	Controles de Projeto Para Detecção de Falhas	D	NPR	Categoria (Projeto, Fabricação, Montagem)
O pedal box quebrar ou empenar	Os pedais e o cilindro mestre se soltam, oferecendo risco ao piloto	5	Componentes com baixa resistência	Simulação CAE Incorreta	2	Simulação estrutural com aplicação de força perpendicular	2	20	Erro de projeto
				Material utilizado na fabricação diferente do projeto	2	Teste na metrologia do material utilizado	2	20	Erro de projeto
			Montagem incorreta dos componentes	2	Não utilização de todos os parafusos	2	Teste passafalha montando e desmontando o conjunto	7	35
A distância não é ajustada	Pilotos com diferentes estaturas pilotam com baixo desempenho	4	Furos do suporte e da base desalinhados	Fabricação incorreta da base	3		5	60	Erro de fabricação
			O projeto é inadequado para o tipo de uso, projeto mal elaborado		4	Teste de montagem	9	144	Erro de projeto

Tabela 21 – FMEA pedal de freio.

Pedal de freio										
Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potenciais de Falhas	S	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	O	Controles de Projeto Para Detecção de Falhas	D	NPR	Categoria (Projeto, Fabricação, Montagem)	
Não transferir a força que o piloto exerce para o balance bar	O carro não freia	5	Pedal empenado ou quebrado	Fabricação fora das especificações	2	Comparar corpo do pedal ao desenho CAD	2	20	Erro de fabricação	
				Quebra das pedaleiras por fabricação fora das especificações	7		9	315	Erro de fabricação	
				Componente com baixa resistência por Simulação CAE incorreta	4	Simulação CAE com aplicação de força perpendicular	2	40	Erro de projeto	
			Falha no rolamento	2	Quebra do rolamento devido a esforços não dimensionados	2	Utilização de normas com especificação técnica	10	100	Erro de projeto
			O pedal não amplia a força	5	Braço de alavanca não é suficiente	5	Realização do estudo ergonômico, confere projetos anteriores.	3	75	Erro de projeto

Tabela 22 – FMEA cilindro mestre.

Cilindro mestre										
Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potenciais de Falhas	S	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	O	Controles de Projeto Para Detecção de Falhas	D	N _{gr}	Categoria (Projeto, Fabricação, Montagem)	
Não transmitir força do pedal	Carro não freia pois não tem força aplicada	5	Vazamento de fluido nas conexões	Montagem sem o uso de veda rosca ou loctite	6	Teste para verificar vazamento ao realizar sangria do sistema	8	240	Erro de montagem	
				Rosca com dimensão incorreta	2	Uso de instrumentos de medição para verificar o passo da rosca	2	20	Erro de montagem	
				Cilindro mestre não gera força suficiente	Pistão com a dimensão menor do que a necessária	2	Teste de frenagem ao montar o carro e cálculos prévios	2	20	Erro de projeto
				Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo	6	Realização da sangria até parar de sair ar	2	60	Erro de montagem
					Adicionar pouco fluido durante a sangria	6		2		Erro de montagem

Tabela 23 – FMEA linha de freio.

Linha de freio										
Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potenciais de Falhas	S	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	O	Controles de Projeto Para Detecção de Falhas	D	N _{gr}	Categoria (Projeto, Fabricação, Montagem)	
Não transmitir fluido	Carro não freia	5	Vazamento de fluido nas conexões	Montagem sem o uso de veda rosca ou loctite	6	Teste para verificar vazamento ao realizar sangria do sistema	8	240	Erro de montagem	
					Rosca com dimensão incorreta	2	Uso de instrumentos de medição para verificar o passo da rosca	2	20	Erro de montagem
				Bloqueio na linha por impurezas	Utilização de fluido sujo	2	Verificar fluido utilizado	2	20	Erro de montagem
				Ar dentro do sistema, devido a sangria mal feita	Fechamento do parafuso de sangria fora do tempo	6	Realização da sangria até parar de sair ar	2	60	Erro de montagem
					Adicionar pouco fluido durante a sangria					

Tabela 24 – FMEA Balance bar.

Balance bar									
Modo de Falha Potencial	Efeito (s) Potenciais de Falhas	S	Falhas intermediárias	Falhas Básicas	O	Controles de Projeto Para Detecção de Falhas	D	NPR	Categoria (Projeto, Fabricação, Montagem)
Não tem distribuição correta do fluido entre as rodas	Não trava simultaneamente as rodas	4	Dimensão da peça está incorreta	Fabricação fora das especificações	2		2	16	Erro de fabricação
				Espessura diferente do rolamento que acopla a peça	2	Realização de desenho 3D e assembly	3	24	Erro de projeto
				Comprimento menor que o necessário	2	Realização de desenho 3D e assembly	3	24	Erro de projeto
				Falha estrutural do componente, devido a falha no terminal rotular	2	Simulação CAE incorreta	3	24	Erro de projeto
					2	Material utilizado na fabricação diferente do projeto	5	40	Erro de fabricação
				Quebra ou empenamento da balance bar	2	Simulação CAE Incorreta	2	16	Erro de projeto
					2	Material utilizado na fabricação diferente do projeto	5	40	Erro de fabricação

Ao analisar as tabelas finais do FMEA foi possível listar as falhas que apresentam um maior risco. Abaixo são apresentadas as falhas críticas para o sistema.



Figura 31 – Falhas com maior prioridade

Analisando cada um separadamente é importante entender o porquê dessa prioridade de risco alta. Como todas as falhas analisadas ficaram com uma severidade em torno de 4 e 5, as causas para as notas elevadas foram devido à alta taxa de ocorrência ou devido a uma metodologia ruim de detecção de falhas.

A quebra das pedaleiras foi listada como prioritária devido ao baixo conhecimento da equipe com relação a sua utilização já que, é um item novo ao projeto. Outro item que é relativamente novo são os rolamentos o que acarreta o mesmo tipo de problema. Portanto essa falha será solucionada conforme a utilização e o “*know how*” aumentarem.

O empenamento do disco está incluído devido a sua alta taxa de ocorrência, e por não se ter muitos métodos de controle para um produto que não é fabricado pelos estudantes. Dessa forma o componente se tornar problemático por problemas externos, podendo ser solucionado com trocas de patrocinador ou metodologia de fabricação diferente.

Os erros de projeto que foram críticos são os que contêm uma metodologia de detecção fraca como a escolha incorreta da pastilha que têm potencial de gerar superaquecimento. E o *pedal box* não ajustar a distância devido à falta de “*know how*”. O superaquecimento pode ser solucionado com o uso de telemetria no carro, especificamente um sensor de calor na pinça e o do pedal, pode ser solucionado realizando mais *benchmarking* de projetos similares.

Outro problema que pode ser grave é o vazamento de fluido pela baixa capacidade de detecção desse problema, podendo ser solucionado também com o uso de telemetria para verificar o fluido na linha, podendo ainda ser melhor solucionado com otimizações de montagem do sistema, ao verificar a vedação.

Ao se analisar as oito falhas foi possível identificar que ambas as notas de ocorrência e detecção estavam altas, entretanto sendo a de detecção um pouco mais elevada. Isso se dá principalmente por não se ter metodologias de identificação para todas as falhas.

Apesar do NPR ser um bom indicativo para se encontrar o que é de fato crítico para o sistema, a análise pode ser complementada. Isso foi feito com a árvore de falhas que mostrava as relações, dessa forma alguns resultados foram obtidos:

O vazamento de fluido por erro de montagem pode não ser o item com o maior risco, porém ele é apresentado em dois componentes, no cilindro mestre e na linha de freio, sendo assim faz se importante encontrar uma solução para esta falha, pois apareceu com um índice alto e em dois itens, oferecendo então um maior risco para o sistema.

Outra falha a ser analisada foi o ar dentro do sistema devido a sangria mal feita, que apesar de não apresentar um índice tão alto, pode interferir três componentes diferentes, atingindo completamente o sistema na frenagem.

Além de obter resultados específicos sobre as falhas e relaciona-las com os com-

ponentes, a árvore de falhas ajudou fornecendo um efeito global, que estava associado a praticamente todo o sistema, que era o carro não frear, mostrando a importância de se analisar o sistema de frenagem, que é crítico e pode oferecer risco para o piloto.

Ao se analisar qual categoria poderia inferir mais problemas, foi observado que metade das causas estavam correlacionadas a erro de projeto e a outra metade a erro de montagem e fabricação, apesar de se ter uma maior quantidade, não significa que estes são os mais críticos, mostrando assim que as taxas de ocorrência para este tipo de erro são baixas e que os testes para detecção estão bem consolidados.

A partir dos resultados obtidos pode-se realizar uma comparação com o que era esperado, esta comparação é baseada em outros artigos que utilizam o FMEA e o FTA, tanto separados como de maneira conjunta. Sendo assim, abaixo são listados quais foram os principais retornos das ferramentas:

- Desenvolvimento e padronização de tabelas do FMEA para o caso da Apuama Racing.
- Identificação dos efeitos para cada modo de falha.
- Obtenção de falhas que oferecem um maior risco.
- Possibilidade de continuidade no trabalho, pois as tabelas já estão feitas, podendo assim se ter melhoria contínua.
- Catalogação das categorias de falha, assim como sua quantidade. Iniciando um processo de gerenciamento de falhas.
- Relação entre as falhas e entre os componentes.
- Obtenção de efeitos globais do sistema.

Ao se comparar os dados obtidos neste trabalho com os outros trabalhos, foi possível notar que alguns pontos a mais foram alcançados, como a catalogação das categorias de falha e a sua quantidade, mostrando quais tipos de ações devem ser priorizadas.

Quanto aos outros resultados obtidos, foram similares aos esperados, portanto, ao analisar este parâmetro pode-se dizer que as ferramentas são eficazes para o tipo de problema proposto. Ao se realizar uma análise mais detalhada, não apenas dos resultados como um todo, mas os resultados específicos, nota-se que a aplicação do FMEA, fornecerá para equipe uma base de dados de falhas, metodologias de detecção aplicadas e soluções propostas para os problemas mais críticos. Tendo assim uma boa utilidade, mas não só isso, também fornece tabelas padrões para outras áreas, podendo assim expandir o FMEA, para todas as áreas e obter uma maior identificação de problemas.

Outro fator que foi obtido foi a relação das causas no FTA, que possibilita outros membros identificarem de maneira simples e visual como elas se correlacionam, podendo identificar no futuro o porquê de uma falha e o que deve ser feito para evita-la, tanto na etapa de projeto, quanto na etapa de fabricação e montagem.

6 Conclusão

Neste trabalho foram apresentados conceitos de qualidade e confiabilidade e como estes estão correlacionados a falhas, os quais podem ser falhas em um projeto ou processo por exemplo. Com o estudo bibliográfico foi possível visualizar a importância da análise de falhas, que estão diretamente associadas aos conceitos de qualidade e confiabilidade, que são basicamente uma baixa taxa de falhas. Tendo conhecimento da importância desse tipo de estudo, foram escolhidas duas ferramentas destinadas a análise de falhas.

As ferramentas escolhidas foram o FMEA e o FTA, que são utilizadas no setor automotivo a mais de 15 anos e que permitem em conjunto ou de forma separada encontrar possíveis falhas de um sistema, seus efeitos, suas causas, origens e como estas se relacionam.

Além dessas duas ferramentas, foi explicado o funcionamento de um sistema de frenagem, que é considerado crítico para o funcionamento do veículo, sendo assim, não deve conter muitas falhas. Posteriormente ao referencial teórico foi apresentado um veículo de competição e as características do seu sistema para que se pudesse utilizar as ferramentas de análise.

Com a utilização de ambas as ferramentas, foi possível catalogar diversas falhas e como elas se originaram, que efeitos causam, o quanto ocorrem e como são detectadas. Esses dados colhidos podem e devem ser utilizados de maneira contínua para a melhoria do sistema, o que garantirá uma melhor qualidade e maior performance para a equipe em questão.

Além de obter dados importantes quanto as falhas existentes dentro do projeto do sistema, foram encontradas soluções para os problemas mais críticos, dessa maneira fornecendo um aporte maior para a equipe em uma nova execução de projetos e competições.

Também foi possível validar o uso das ferramentas, no qual se mostraram boas para o tipo de análise, fornecendo tabelas e árvores para catalogar os problemas existentes, além de fornecer um banco de dados dos problemas para as gerações futuras da equipe, foram obtidas soluções para serem aplicadas no carro e também as ferramentas possibilitaram abranger um alto número de falhas, tanto conhecidas como prováveis.

Além de fornecer um grande aporte para a equipe este trabalho mostrou uma boa integração de duas ferramentas para análise de falhas, que se usadas para outros setores ou estudos de caso, poderá fazer a diferença, garantindo maior confiabilidade e qualidade, que são alguns dos focos de sua utilização.

Para complementar este trabalho futuramente, podem ser realizados outros estudos com ferramentas auxiliares para revisão de projetos como *DFMA* (*Design for Manufacturing and Assembly*) ou *DMAIC* (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*). Assim, dando uma continuidade maior a análise de falhas e ainda e existem possibilidades de revisão do trabalho, realizando mais otimizações e mais análises com mais dados de ocorrência, obtendo dados cada vez mais precisos. Sendo necessário para isso mais tempo de dados do veículo da equipe.

Como mencionado anteriormente esse trabalho pode ser expandido para outras áreas de projeto da equipe, como para suspensões, *powertrain* ou até mesmo para outros projetos como o *baja*, fornecendo assim diversas possibilidades de pesquisas e estudos com a metodologia aqui aplicada.

Referências

- BACELLAR, L. Apostila curso d-fmea - análise do modo de falha e seus efeitos para projetos (conforme manual aiag – 4ª edição). São Paulo, Brazil, 2015. Citado na página 23.
- BATALHA, M. O. *Introdução a engenharia de produção*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier Editora Ltda, 2008. Citado na página 21.
- BERTSCHE, B. *Reliability in automotive and mechanical engineering: determination of component and system reliability*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008. Citado na página 29.
- BRAESS, H.-H. *Handbook of Automotive Engineering*. [S.l.]: SAE, Society of Automotive engineers, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 37.
- CARLSON, C. S. *Effective FMEAs: achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis*. Danvers, United States of America: Wiley e Sons, Inc, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 22, 23, 26, 27, 28 e 29.
- COMISSION, U. N. R. *NUREG-0492-Fault Tree Handbook*. Washington, United States of America, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- COSTA, P. G. *A bíblia do carro: versão digital*. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 35.
- GRANTE, C.; PAPADOPOULOS, Y. Evolving car designs using model-based automated safety analysis and optimisation techniques. *the journal of systems and software*, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 24, 26, 29 e 30.
- HECKERT, C. R.; FRANCISCHINI, P. G.; ROTONDARO, R. G. Qs-9000: a iso já não é o bastante. *Production*, SciELO Brasil, v. 8, n. 1, p. 5–16, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 22.
- HELMAN H.; ANDERY, P. R. P. *Análise de Falhas. Aplicação de FMEA e FTA*. [S.l.]: Editora Fundação Cristiano Ottoni, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 54.
- IQA, I. de qualidade automotiva. *Manual de referência-análise do modo de falha e efeitos de falha potencial (FMEA)*. São Paulo, Brasil, 2008. 75 p. Citado 3 vezes nas páginas 17, 22 e 24.
- JURAN, J. M. *Quality handbook*. New York, United States of America: McGraw-hill, 1998. Citado na página 21.
- KHAIYUM, S.; KUMARASWAMY, Y. S. Integration of fmea and fta for effective failure management in real time embedded projects. *ISSN 2349-9419*, 2014. Citado na página 54.
- LEMES, D. V. *Proposta de método de análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos empregando dados de retorno em garantia. 2006. 164f*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado em Engenharia)—Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Citado na página 21.

- LIMA, P.; FRANZ, L.; AMARAL, F. Proposta de utilização do fta como ferramenta de apoio ao fmea em uma empresa do ramo automotivo. *XIII Simpósio de Engenharia de Produção, SIMPEP*, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 17, 22 e 29.
- LIMPERT, R. *Brake design and safety*. [S.l.]: Society of automotive engineers, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 31, 33 e 34.
- LIU, C.-T.; HWANG, S. L.; LIN, I.-K. Safety analysis of combined fmea and fta with computer software assistance - take photovoltaic plant for example. *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 30.
- MASING, W. *Handbuch Qualitätsmanagement*. [S.l.: s.n.], 1994. Citado na página 17.
- NORTON, R. *Projeto de Máquinas*. [S.l.]: Bookman 2 edição, 2004. Citado na página 31.
- PAHL, G. e. a. *Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações*. São Paulo, Brazil: Edgard Blucher, 2005. 407 p. Citado na página 17.
- PORFIRIO, L. *vai um fluido de freio aí?* 2016. Disponível em: <<http://ogearhead.blogspot.com.br/2012/10/vai-um-fluido-de-freio-ai.html>>. Citado na página 38.
- PUHN, f. *Brake Handbook*. New York, United States of America: HPbooks, 1987. Citado 7 vezes nas páginas 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38.
- SAE. 2016. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>>. Citado 7 vezes nas páginas 18, 39, 40, 41, 42, 87 e 88.
- SCAPIN, C. A. *Análise sistêmica de falhas*. Minas gerais, Brazil: Falconi, 2013. Citado na página 29.
- WILWOOD. *wilwood high-performance disc brakes*. 2016. Disponível em: <<http://www.wilwood.com/>>. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 50.
- ZAMBRANO, T. F.; MARTINS, M. F. Utilização do método fmea para avaliação do risco ambiental. *Gest. Prod., São Carlos*, 2007. Citado na página 24.

Anexos

ANEXO A – Regras da Fsaec para o sistema de frenagem

Anualmente a SAE publica um conjunto de regras de maneira a garantir a segurança dos estudantes e das pessoas participantes do evento. Para o sistema de freios algumas regras foram criadas, como mostrado abaixo:([SAE, 2016](#))

PARTE T- REQUISITOS TÉCNICOS GERAIS

ARTIGO 7: SISTEMA DE FREIO

T7.1 Sistem 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 circuitos hidráulicos independentes para que se tenha um frenagem efetiva em pelo menos duas das rodas, caso ocorra falha em qualquer ponto do sistema. Cada circuito hidráulico deve possuir sua própria reserva de fluido, seja pelo uso de reservatórios diferentes ou pelo uso de um 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 rodas durante o teste especificado abaixo. T7.1.4 Freios por cabo 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 por 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 de aço ou alumínio, ou usinado a partir do aço, alumínio ou titânio.

7.2 Teste de frenagem

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

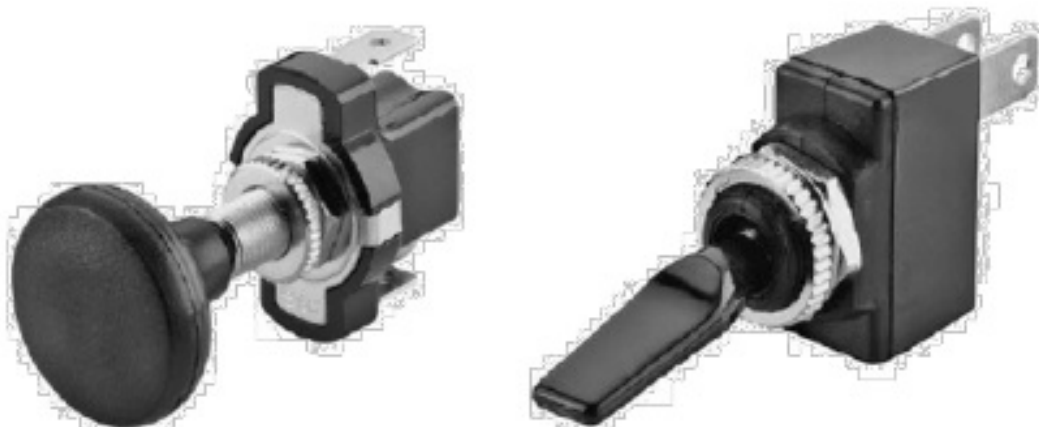
T7.3 Desligamento a partir de botão fim de curso.

T7.3.1 Uma chave elétrica acionada por fim de curso deve ser instalada no pedal de freio e deve estar ligada em série com os botões de desligamento do carro. Essa chave deve ser instalada para que, caso ocorra uma falha no sistema de freio, o curso final do pedal será capaz de aciona-la desligando o motor, como definido no artigo 4, seção IC, para veículos a combustão.

T7.3.2 O retorno da chave para a posição inicial não deve religar o sistema e ela deve ser posicionada, de forma que o piloto não seja capaz de alcançá-la.

T7.3.3 A chave deve ter controle analógico, e não por recursos programáveis, unidades controladoras ou sistemas digitais similares.

T7.3.4 A chave deve ser mecânica, de contato único e de duas posições, como mostra a figura abaixo:



Fonte:(SAE, 2016)

T7.4 Luz de freio

T7.4.1 O carro deve ser equipado com uma luz de freio vermelha. A luz em si deve possuir um fundo preto e retangular, triangular ou de formato singular com uma área mínima de 15cm^2 . Cada luz de freio deve ser visível da traseira do veículo sob luz do sol. Quando as luzes de LED forem utilizadas sem um difusor, elas não podem estar a mais de 20mm de distância. Se for uma linha única de LEDs, a distância mínima será de 150mm.

T7.4.2 Essa luz deve ser montada entre o eixo das rodas e o os ombros do piloto no sentido vertical e aproximadamente na linha central.