



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO PAULO DOS SANTOS LIMA

**PROJETO DE UMA MÁQUINA DE FADIGA PARA AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS
EM COMPONENTES DE SUSPENSÃO DE VEÍCULOS DO TIPO BAJA SAE**

MOSSORÓ-RN

2020

PEDRO PAULO DOS SANTOS LIMA

**PROJETO DE UMA MÁQUINA DE FADIGA PARA AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS
EM COMPONENTES DE SUSPENSÃO DE VEÍCULOS DO TIPO BAJA SAE**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção de título de Bacharel em Engenharia mecânica.

Orientador: Fabrício José Nobrega Cavalcante,
Prof. Dr.

MOSSORÓ-RN

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

LL732 LIMA, Pedro Paulo Dos Santos.
PROJETO DE UMA MÁQUINA DE FADIGA PARA
AVALIAÇÃO DE ESFORÇOS EM COMPONENTES DE SUSPENSÃO
DE VEÍCULOS DO TIPO BAJA SAE / Pedro Paulo Dos
Santos LIMA. - 2020.
58 f. : il.

Orientador: Fabrício José Nobrega Cavalcante.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2020.

1. Gerenciamento de projeto. 2. Fadiga. 3.
Máquina para testes de fadiga. I. Cavalcante,
Fabrício José Nobrega , orient. II. Título.

PEDRO PAULO DOS SANTOS LIMA

**PROJETO DE UMA MÁQUINA DE FADIGA PARA AVALIAÇÃO DE
ESFORÇOS EM COMPONENTES DE SUSPENSÃO DE VEÍCULOS DO TIPO
BAJA SAE**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia mecânica.

Defendida em: 11 / 12 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

FABRICIO JOSE NOBREGA
CAVALCANTE:02355457409

Assinado de forma digital por FABRICIO
JOSE NOBREGA
CAVALCANTE:02355457409
Dados: 2020.12.14 08:46:11 -03'00'

Fabício José Nobrega Cavalcante, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

ROMULO PIERRE BATISTA
DOS REIS:02351281470

Assinado de forma digital por ROMULO
PIERRE BATISTA DOS REIS:02351281470
Dados: 2020.12.14 16:56:06 -03'00'

Rômulo Pierre Batista dos Reis, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

ZOROASTRO TORRES
VILAR:04417246475

Assinado de forma digital por ZOROASTRO TORRES
VILAR:04417246475
Dados: 2020.12.13 00:04:08 -03'00'

Zoroastro Torres Vilar
Zoroastro Torres Vilar, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico esse trabalho aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, a minha avó Vilani que sempre se orgulhou dessa minha busca pelo conhecimento e ao meu falecido avô José Salvador, que certamente estaria muito orgulhoso e feliz nesse momento (In Memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao nosso DEUS, nosso criador que me concedeu não só a aprovação nesta universidade grandiosa que é a UFERSA, mas também suportar os cinco longos anos, que foram de tristeza em alguns momentos, entretando em muitos outros de plena alegria.

Agradeço aos meus pais, Joseneide Dos Santos Lima e Luiz de Paiva Lima, por me concederem a vida, o cuidado, o amor e especialmente a educação necessária pra que eu chegasse ser o que sou hoje.

Agradeço a minha irmã Jéssica Monique Dos Santos Lima por sempre estar ao meu lado quando precisei, sempre ajudando no que fosse necessário.

Agradeço ao meu orientador Fabrício José Nobrega Cavalcante por me auxiliar na realização desse trabalho, orientando sempre da melhor forma possível os rumos da pesquisa.

Agradeço também a participação da banca examinadora presente, que sabidamente é composta de profissionais bastante capacitados que só tem a acrescentar ao trabalho com as devidas correções e dicas.

Por fim gostaria de fazer um agradecimento especial a equipe Cactus Baja SAE, da qual passei grande parte da minha graduação, foi ela que me proporcionou um diferencial que jamais esperava em minha formação, não só pelas várias competições a nível regional, nacional e internacional, os conhecimentos técnicos no ramo da automobilística, ..., mas também o principal que foram as amizades e o convívio com essa segunda “família” que cheguei a fazer parte.

RESUMO

Grande parte das falhas apresentadas nos componentes mecânicos são derivadas de tensões alternadas, ou seja, cargas que variam continuamente com o tempo. Apesar de apresentarem níveis de tensões significativamente inferiores quando comparadas as máximas suportadas pelo componente, em grandes ciclos esses esforços podem resultar na falha por fadiga do material. Esse fenômeno é bastante intensificado quando se fala em aplicações dinâmicas, haja vista que os componentes não são submetidos apenas a tensões pontuais ou carregamentos, mas também tensões multiaxiais dependendo da cinética do mesmo (ABRAHÃO *et al*, 2008). Os veículos Baja SAE são direcionados a estudantes de universidades de engenharia do Brasil e do mundo. Estes projetam, modelam, fabricam e posteriormente devem testar e validar os seus projetos das mais diversas formas possíveis. Como esse veículo é destinado ao ramo *off-road*, testes bastante rigorosos são exigidos, principalmente no que se refere ao quesito resistência a transposição de obstáculos (BAJA SAE Brasil, 2019). Observando as problemáticas acima citadas que esse trabalho busca desenvolver métodos de análises de fadiga em componentes de suspensão desses veículos, pois como dito esse subsistema do carro, provavelmente, é o mais submetido nas competições Baja SAE. Por esse motivo visa-se desenvolver toda uma metodologia e gerenciamento de projeto para formulação e obtenção de um protótipo de máquina para testes de fadiga, auxiliado a um sistema de eletrônica embarcada para monitoramento e avaliação dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Gerenciamento de projeto, Fadiga, Máquina para testes de fadiga.

ABSTRACT

Most of the failures in mechanical components are due to alternative efforts, in other words, loads that vary continuously over time. Although presenting significantly lower stress levels when compared to the maximum supported by the component, in large cycles these efforts can result in failure due to fatigue. This phenomenon is greatly intensified in dynamic applications, since the components are not subjected only to point stresses or loads, but to multiaxial stresses depending on their kinetic (ABRAHÃO et al, 2008). Baja SAE vehicles are aimed at students from engineering universities in Brazil and the world. They design, model, manufacture and subsequently test and validate their projects in the most diverse ways possible. As this vehicle is intended for the off-road segment, very rigorous tests are required, especially with regard to the problem of resistance to overcoming obstacles (BAJA SAE Brasil, 2019). Observing as a problem mentioned above that this search work develops methods of fatigue analysis in suspension components of these vehicles, such as the referred car system, probably, or the most submitted in the Baja SAE competitions. For this reason, the aim is to develop a whole methodology and design management for formulating and obtaining a prototype of a fatigue testing machine, aided by an embedded electronics system for monitoring and evaluating the results obtained.

Keywords: Design management. Fatigue. Fatigue testing machine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Efeitos das diferentes fases do ciclo de vida sobre o custo do produto.....	17
Figura 2	Etapas do projeto segundo Coryell	19
Figura 3	Comparação das mudanças de projeto entre uma empresa norte americana (sem QFD) e uma empresa japonesa (com QFD).....	21
Figura 4	Carregamento cíclico.....	22
Figura 5	Diagrama S-N ou curva de Wöhler (AISI 4130).....	22
Figura 6	Estágios de propagação da trinca no material.....	25
Figura 7	Vista lateral regras chassi Baja SAE.....	26
Figura 8	Modelo de motor especificado nas competições (<i>Briggs & Stratton</i> , série 19 [10 HP]).....	26
Figura 9	Veículo Baja sendo submetido a obstáculo de rampa.....	27
Figura 10	Extensômetros em configuração de roseta de deformação.....	31
Figura 11	Diagrama S-N obtido por meio de extensômetro.....	31
Figura 12	Sensores piezoelétricos.....	32
Figura 13	Sensores variados.....	33
Figura 14	DAQ <i>Keysight</i> 34972A.....	34
Figura 15	Fluxograma simplificado do DAQ.....	35
Figura 16	Fluxograma geral do projeto segundo Coryell.....	36
Figura 17	Matriz QFD (Bancada de fadiga).....	39
Figura 18	Montagem do sistema completo.....	42
Figura 19	Esquema do sistema pneumático para o acionamento da máquina de fadiga.	62
Figura 20	Estrutura da bancada de fadiga.....	49
Figura 21	Particularidades na estrutura, a) geometria da traseira e b) Aparato de fixação.....	50
Figura 22	2D finalizado da estrutura da bancada de fadiga.....	63
Figura 23	Resultado da simulação de esforço estático (Gradiente de tensões de Von Mises).....	51
Figura 24	Resultado da simulação de esforço estático (Gradiente de deslocamentos)....	52
Figura 25	Resultado da simulação de esforço estático (Fator de Segurança de Fadiga).	52
Figura 26	Planos de fabricação da estrutura para a bancada de fadiga.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela de pontuações da competição.....	28
Tabela 2	Condições de contorno simulação estática da bancada de fadiga.....	51
Tabela 3	Ilustrações dos dispositivos de controle e automação.....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Diagrama trajeto-passo para o atuador da dianteira.....	47
Gráfico 2	Diagrama trajeto-passo para o atuador da traseira.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Procedimentos para aquisição de dados (experimentos reais).....	38
Quadro 2	Matriz de escolha para o material da bancada.....	40
Quadro 3	Matriz de escolha para as formas de atuação.....	41
Quadro 4	Matriz de escolha para o sensor.....	41
Quadro 5	Matriz de decisão para escolha do aquisitor de dados.....	42
Quadro 6	Parâmetros de pressão para as linhas pneumáticas (Poliamida).....	54
Quadro 7	Parâmetros para atuadores em relação a pressão de trabalho.....	55
Quadro 8	Relatório de custos do projeto.....	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Gerenciamento e metodologia de projeto.....	17
2.1.1	Projeto de produtos segundo Coryell.....	17
2.1.2	Matriz de escolha ou decisão.....	19
2.1.3	Matriz QFD.....	20
2.2	Fadiga.....	21
2.2.1	Histórico da fadiga em materias.....	21
2.2.2	Conceito de Fadiga.....	23
2.2.3	Os 3 estágios da falha por fadiga.....	23
2.2.3.1	Estágio 1 – Início da trinca.....	23
2.2.3.2	Estágio 2 – Propagação da trinca.....	24
2.2.3.3	Estágio 3 – Fratura.....	24
2.3	Baja SAE.....	25
2.3.1	Perfil dos estudantes “Bajeiros”.....	25
2.3.2	Veículos Baja SAE.....	25
2.3.3	Competições Baja SAE.....	27
2.4	Métodos de Aquisição de dados para testes de fadiga.....	28
2.4.1	Extensômetros (<i>Strain Gauges</i>).....	29
2.4.2	Sensores Piezoelétricos.....	31
2.4.3	Aquisitores de dados.....	32
2.4.3.1	Sensores.....	33
2.4.3.2	Placas e dispositivos DAQ.....	33
2.4.3.3	Computadores e <i>softwares</i>	34
3	PASSO A PASSO PARA REALIZAÇÃO DO PROJETO.....	36
3.1	Revisão dos requisitos.....	37
3.2	Criatividade.....	37

3.3	Avaliação e efetuação da análise preliminar e análise das soluções.....	38
3.4	Refinamento de projeto.....	39
3.4.1	Material da bancada.....	40
3.4.2	Formas de atuação.....	40
3.4.3	Sensores utilizados.....	41
3.4.4	Seleção de aquisitores de dados (<i>Data logger</i>).....	42
3.5	Leiaute do projeto.....	42
3.6	Revisão do projeto.....	43
3.7	Projeto detalhado.....	43
3.7.1	Dimensionamento das linhas pneumáticas de trabalho.....	44
3.7.2	Modelagem e projeto da estrutura da bancada de fadiga.....	48
3.7.2.1	Particularidades e dispositivos extras da bancada.....	49
3.7.3	Elaboração dos 2D's da estrutura da bancada.....	50
3.8	Análise detalhada.....	50
3.8.1	Análise de tensão estática.....	50
3.9	Prototipagem e revisão do protótipo.....	53
3.10	Plano de Fabricação.....	53
3.10.1	Dispositivos de automação.....	54
3.11	Custo do projeto.....	56
4	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
	REFERÊNCIAS.....	59
	ANEXO A.....	62

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da globalização da economia, a consciência da importância da atividade de projeto de produto e da busca por conhecimentos e métodos, para melhorar a qualidade e reduzir o ciclo de desenvolvimento, tem evoluído muito nos anos recentes (BACK, FORCELLINI, 2007).

Todo esse desenvolvimento no setor de metodologia e gestão na fase de projeto de produtos proporcionou as empresas aumentarem muito a sua competitividade, gerando assim maiores lucros com gastos desnecessários. A metodologia de projeto baseia nos princípios de organização e estruturação do problema/projeto, sendo assim a solução ou as soluções para este podem ser encontradas de modo mais facilmente.

Em se tratando de componentes mecânicos a fadiga é um fenômeno bastante ocorrente, podendo até ser imperceptível no início, entretanto pode causar prejuízos consideráveis considerando um longo espaço de tempo. Ela é definida como a progressiva, localizada e permanente mudança estrutural que ocorre em materiais sujeitos a tensões e deformações alternadas que resultam em trincas ou fratura após um certo número de ciclos de tensão. Fraturas de fadiga são causadas pela ação simultânea de ciclos de tensão, esforços trativos e deformação plástica. Se nenhuma dessas três ações está presente no material, a trinca não consegue se propagar ao longo dele. O ciclo de tensão inicia a trinca e a tensão trativa proporciona o crescimento da trinca (propagação). Vale ressaltar que embora tensões compressivas não causem fadigas, carregamentos compressivos podem ocasioná-la. Segundo Boyer (1986), o processo de fadiga consiste de 3 estágios:

- Dano de fadiga inicial causando a nucleação da trinca e sua inicialização;
- Ciclo progressivo de crescimento da trinca (propagação da trinca) até que a seção transversal de locais sem trincas comece a perder sua resistência devido aos carregamentos impostos;
- Final, fratura repentina da seção transversal restante.

O ciclo de vida em fadiga de uma amostra ou estrutura é o número de ciclos de tensão (deformação) requeridos para que se cause a falha. Esse número toma como função muitas variáveis, incluindo níveis de tensão, estado de tensão, forma do ciclo de onda, local da fadiga, e condições metalúrgicas referentes ao material.

As competições Baja SAE são diferenciais no ramo das engenharias, principalmente na área da automobilística. Elas permitem a retirada dos estudantes do simples ambiente monótono da sala de aula para poderem enfrentar desafios de engenharia. Através dessas competições eles podem projetar, construir e testar seus protótipos *off-road*, para que ao final

possam competir com outras universidades do Brasil e do mundo. Todas as competições Baja preparam os estudantes de diversas formas, visando um melhor desenvolvimento deste no competitivo e constantemente atualizado mercado de trabalho. Eles são incentivados a obterem diversos conhecimentos específicos como orçamento, comunicação, gerenciamento de projeto e marketing interpessoal. O comitê organizador dessas competições é formado por profissionais da área, que também de certa forma servem como porta de entrada desses estudantes para o setor automobilístico (SAE Internacional).

Devido ao nível intenso exigido nessas competições, aliado ao fato do estilo *off-road*, os protótipos são submetidos a situações críticas-reais que veículos desse ramo enfrentam. A pista é formada de diversos obstáculos como manilhas, valas, rampas e pneus, que em muitos casos são tão complicados que chegam a danificar os veículos e/ou quebrar seus componentes. Sendo assim o carro que proporcionar um melhor índice de transposição de obstáculos, certamente será o mais bem sucedido nessas competições. Pensando acerca disso que o presente estudo focou em um desenvolvimento de uma máquina de testes de fadiga para componentes de suspensão dos bajas. Assim o projetista pode conhecer o provável momento de falha e com isso gerenciar o projeto de forma que estas não ocorram. Visando alcançar um projeto bem elaborado e adequado, utilizou-se algumas técnicas de metodologia de projeto e gerenciamento de produtos contidas em Back e Forcellini (2007).

1.1 Justificativa

O estudo e desenvolvimento acerca desse tema pode apresentar dados experimentais muito importantes, que pode gerar um banco de dados para análises de fadiga para componentes de suspensão dos veículos Baja SAE. Por experiência própria de cerca de 3 anos na equipe Cactus Baja SAE da UFERSA percebo a escassez de estudos aprimorados sobre fadiga nos componentes que são projetados, recorrendo apenas a estudos analíticos, que em muitas ocasiões não pode ser utilizado devido a complexidade de análise, e simulações computacionais que também em diversas situações são demasiadamente complicadas, principalmente envolvendo análises por elementos finitos com dinâmica de multicorpos. Essa falta de estudos mais aprimorados acerca de fadiga em componentes estruturais não é uma exclusividade da equipe da UFERSA, muitas outras pelo países também não possuem estudos tão elaborados a respeito desse tema, as poucas que possuem, rotineiramente, são as mais bem colocadas nas provas de apresentação e relatório de projeto nas competição Baja SAE.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

- Desenvolver/projetar uma máquina para testes de fadiga para componentes de suspensão de veículos Baja SAE e observar a viabilidade de reprodução em protótipo.

1.2.2 Objetivos específicos

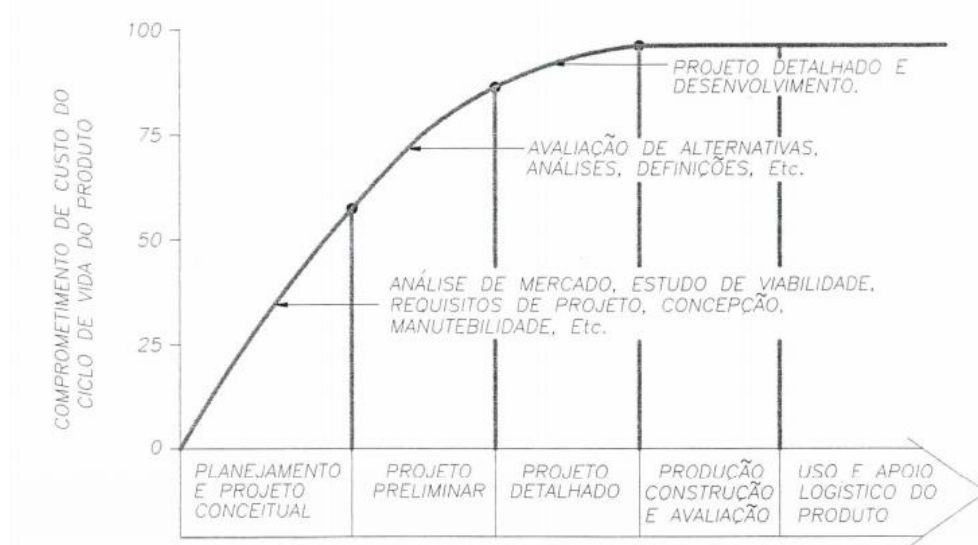
- Buscar referências acerca de estudos semelhantes que possam direcionar os objetivos da pesquisa;
- Realizar a modelagem CAD do projeto da máquina de testes de fadiga;
- Definir os parâmetros de funcionamento da mesma;
- Definir um meio de aquisição dos dados para o ensaio;
- Avaliar os resultados caso seja viável a reprodução do protótipo;
- Comparar os resultados com simulação CAE.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gerenciamento e metodologia de projeto

Um projeto de um determinado produto não é apenas algo que pode ser levado pelo lado singular, pelo contrário, várias etapas são seguidas para que o projeto possa sair da simples ideia/necessidade para a reprodução do primeiro protótipo. Na maioria dos casos o próprio valor atribuído ao protótipo chega a ser 2 ou até 10x mais do que o valor em produção do produto, pois como dito vários estágios devem ser seguidos para que o projeto não venha apresentar falhas na sua conclusão final e, principalmente, atenda a necessidade pelo qual foi fabricado. Entre essas etapas estão: Planejamento e projeto conceitual, projeto preliminar, projeto detalhado, produção, construção e avaliação, uso e apoio logístico do produto. A Figura 1 mostra a relação de cada uma dessas etapas com o custo do ciclo de vida de cada uma.

Figura 1 – Efeitos das diferentes fases do ciclo de vida sobre o custo do produto.



Fonte: Blanchard e Fabrycky, apud Back e Forcellini (2002).

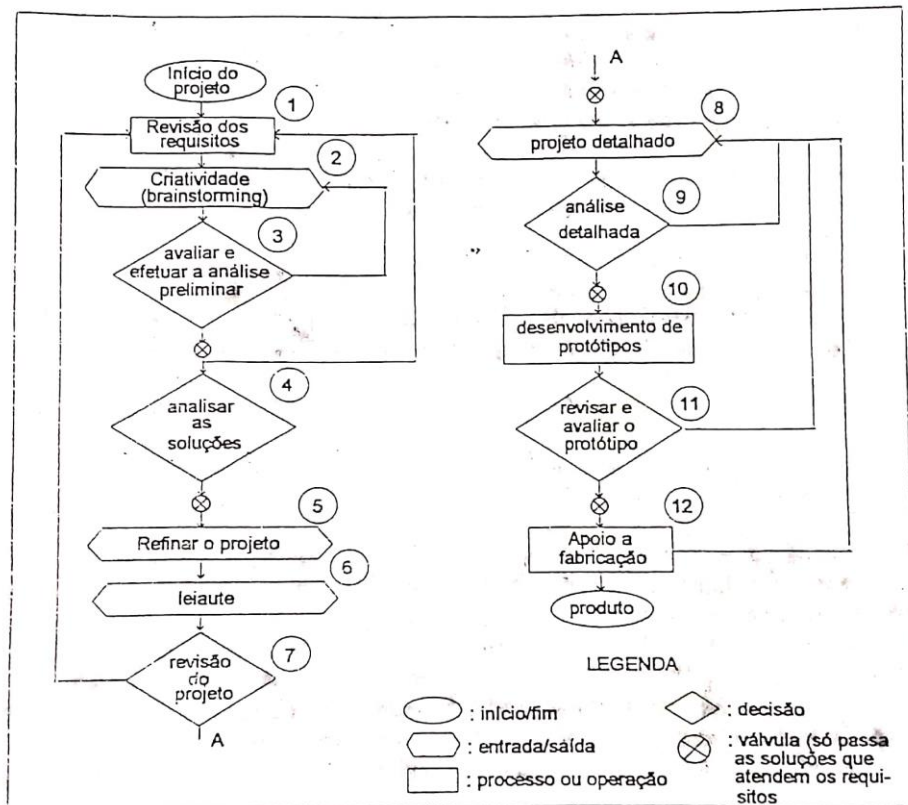
2.1.1 Projeto de produtos segundo Coryell

De acordo com Coryell (1967), apud Back e Forcellini (2002), a sistemática de um projeto é composta de doze etapas. O ponto de partida é a **revisão** completa de todos os **requisitos** – etapa 1, com essa fase o problema pode ser adequadamente definido, e assim mais facilmente resolvido. A segunda etapa remete a **criatividade** do projetista, ou seja, a busca de soluções capazes de solucionar o problema pelo projetista, como exemplo temos o *brainstorming* ou tempestade de ideias no português. Esse método se refere a reunião em que os projetistas

apresentam várias soluções possíveis para o problema proposto, e assim toma-se algo de cada coisa para que se chegue a um resultado final satisfatório. O próximo passo refere-se a **avaliações das análises preliminares**. Nessa dois critérios são considerados importantes: o custo em relação aos concorrentes e o avanço tecnológico, com esse processo de revisão é possível a eliminação de funções desnecessárias e o refinamento de aspectos de cada abordagem. A quarta etapa, **análise das soluções**, se configura basicamente como um apanhado das etapas anteriores. Encarregando-se de uma avaliação das funções escolhidas em função do custo requerido dos processos. A quinta etapa, **refinamento do projeto**, visa realizar atividades de caráter mais específico, sendo assim pode reduzir o número das partes, padronizar outras, estabelecer fixações e efetuar esquemas para registros temporários das soluções. A seguir realiza-se o **leiaute do projeto**, onde se configura como um primeiro resultado da fase de concepção de projeto. Nele estão contidas a ordenação e escolha das ideias, análises preliminares, investigações e refinamentos utilizados.

A etapa 7 refere-se a **revisão de projeto**, que é um requisito primordial para sua posterior aprovação. Com todas as etapas anteriores já conquistadas pode-se agora elaborar todos os desenhos necessários, com suas respectivas tolerâncias, e a verificação final dos materiais contidos na fábrica, na fase de **projeto detalhado**. A etapa 9 diz respeito a **análise detalhada**, onde três requisitos básicos devem ser considerados: definição e documentação clara das técnicas de análise, profundidade de análise, documentação dos critérios de decisão. Terminada essa etapa segue-se para o **desenvolvimento de modelos e protótipos**, onde, os testes finais serão realizados através de modelos do tipo: modelo piloto, “*mockup*”, protótipo, e item de teste. Com os resultados dessa fase pode-se efetuar a **revisão e avaliação do protótipo**, onde se verifica o produto com relação aos seus requisitos iniciais. Por fim, a última etapa trata do **suporte a fabricação**, configurando-se como o acompanhamento do produto, pelo projetista, durante o processo de fabricação para decidir sobre quaisquer alterações que se façam necessárias.

A Figura 2 mostra um fluxograma-resumo de todas as etapas de projetos de produto segundo Coryell.

Figura 2 – Etapas do projeto segundo Coryell.

Fonte: Coryell, apud Back e Forcellini (2002).

2.1.2 Matriz de escolha ou decisão

Segundo Spada (2016) a matriz de escolha ou decisão é uma ferramenta importante que permite uma análise rápida por meio de critérios que favorecem uma visão ampla e coerente de várias alternativas. Apesar de apresentar caráter subjetivo, ela pode servir como um certo guia para encontrar tendências que possam se enquadrar à realidade desejada no projeto futuro. A matriz também consegue apontar os pontos fortes e fracos de cada ideia, tornando mais simples dessa forma a escolha.

A matriz de escolha possui os seguintes passos para sua correta utilização:

- Na coluna da esquerda descreve-se as ideias propostas em um total de 5;
- Nas colunas subsequentes coloca-se os critérios de avaliação escolhidos, por exemplo impacto, esforço, lucratividade e visão. Os valores tomados como base podem ser em uma escala de 1 a 5, sendo o primeiro o menos relevante e o último o mais relevante para o projeto;

- Em seguida deve-se realizar a soma dos critérios impacto, lucratividade e visão de cada ideia, subtraindo o critério esforço. Após isso deve-se adicionar esse resultado na coluna total;
- Com os resultados para cada ideia podemos adquirir a melhor de acordo com o maior resultado total entre elas.

Para analisar cada um dos critérios temos que sempre considerá-los individualmente como elementos que podem ou não analisar o andamento do projeto, e de que forma. Sendo assim, não é essencial obter nota máxima em todos os critérios para a ideia ser considerada a melhor, mas que possamos analisar adequadamente quais daqueles realmente são relevantes para o projeto, conseguindo assim o melhor equilíbrio possível.

2.1.3 Matriz QFD

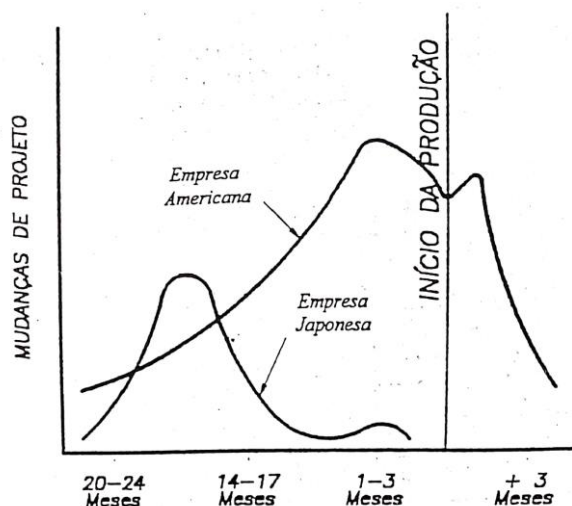
Segundo Hauser e Claunsig, apud apud Back e Forcellini (2002), a matriz QFD (*Quality Function Deployment*), ou casa da qualidade se refere a um mapa conceitual que permite um planejamento interfuncional e comunicativo entre os setores responsáveis pelo desenvolvimento do produto em todas as suas etapas. Essa é uma ferramenta bastante importante, pois já nas fases de projeto assegura uma determinada qualidade ao produto final por meio da consideração dos desejos dos clientes dentro das metas do projeto. Isso proporciona redução no número das mudanças de projeto, e ao mesmo tempo reduz os custos decorrentes das mudanças de projeto para estágios mais avançados.

Dentre os principais benefícios do QFD estão:

- Redução do número de mudanças de projeto de 30% a 50%;
- Ciclo de projeto encurtado de 30% a 50%;
- Custos de início de operação (*start-up*) reduzidos de 20% a 60%;
- Redução de reclamações de garantia (mais de 50%);
- Planejamento da garantia de qualidade mais estável;
- Favorece a comunicação entre os diferentes agentes que atuam no desenvolvimento do produto, principalmente marketing e engenharia (projeto e manufatura);
- Traduz as vontades dos clientes que são vagas e não mensuráveis em características mensuráveis;
- Identifica as características que mais contribuem para os atributos de qualidade;
- Possibilita a percepção de quais características deverão receber maior atenção.

A Figura 3 mostra claramente a relação comparativa entre empresas que utilizam ou não o advento dessa ferramenta.

Figura 3 – Comparação das mudanças de projeto entre uma empresa norte americana (sem QFD) e uma empresa japonesa (com QFD).



Fonte: Hauser e Claunsig, apud Back e Forcellini (2002).

Analisando o gráfico exposto acima podemos notar que a empresa japonesa possui um grande gasto inicial de projeto, pois justamente nessa fase que as metas são consideradas em cima das necessidades dos clientes, porém percebe-se com o tempo que os gastos a médio e longo prazo, com o projeto já finalizado, são muito maiores para a empresa americana que não utiliza o QFD, haja vista que a mesma deve apresentar muitas dificuldades, e consequentemente, muitos custos relacionados com adequação e atualização de projeto quando comparado a empresa japonesa que utiliza a ferramenta.

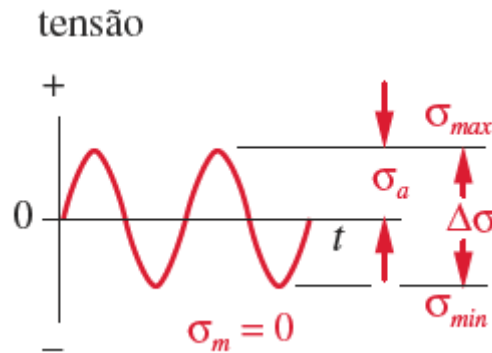
2.2 Fadiga

2.2.1 Histórico da fadiga em materiais

Segundo Abrahão (2008), a fadiga foi observada pela primeira vez no ano de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a falhar após um pequeno período em serviço. Mesmo apresentando materiais como o aço dúctil, exibiam características de fraturas frágeis e repentinas. Rankine publicou um artigo em 1843, “*As Causas da Ruptura Inesperada de Munhões de Eixos Ferroviários*”, no qual dizia que o material havia cristalizado e se tornado frágil devido às tensões flutuantes. Os eixos haviam sido projetados com considerações de carregamento estático, porém percebeu-se na época que esse método de cálculo era vago, pois no material também agiam cargas dinâmicas. Esse fato foi observado

principalmente nas máquinas movidas a vapor. Seus eixos estavam fixos às rodas e giravam em conjunto as mesmas, variando assim a tensão de flexão no componente entre valores positivos e negativos, a Figura 4 ilustra melhor essa problemática. Esse carregamento foi denominado de alternado.

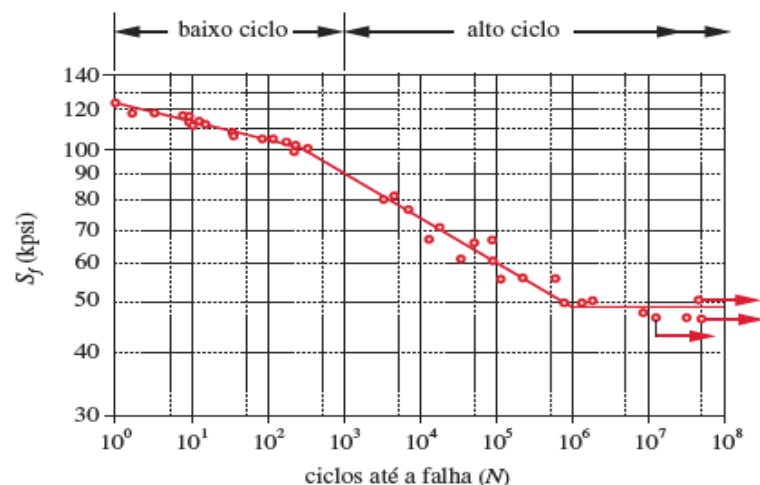
Figura 4 – Carregamento cíclico.



Fonte: Norton (2013).

Outro estudioso a respeito do assunto foi o engenheiro alemão, August Wöhler (1819-1914), realizou a primeira investigação científica sobre a falha por fadiga. Ele testou eixos até a falha sob carregamento alternado. Em 1870 publicou o resultado de suas pesquisas, as quais identificavam o número de ciclos de tensão variando no tempo como os causadores do colapso e a descoberta da existência de uma tensão limite de resistência à fadiga para aços, isto é, um nível de tensão que toleraria milhões de ciclos de uma tensão alternada. O diagrama S-N ou Curva de Wöhler, mostrado na Figura 5, foi a ferramenta desenvolvida por ele e até hoje utilizada que pode mostrar o comportamento da viga em fadiga em materiais submetidos a tensões alternantes.

Figura 5 - Diagrama S-N ou curva de Wöhler (AISI 4130).



Fonte: Norton (2013).

Contudo o termo “fadiga” foi aplicado pela primeira vez por Poncelet em 1839. O mecanismo de falha ainda não compreendida e a aparência de uma fratura frágil na superfície de um material dúctil gerou especulações de que o material, de alguma maneira, apresentou “cansaço” e fragilizou-se devido às oscilações da carga aplicada. Wöhler, mais tarde, constatou que cada metade dos eixos quebrados quando submetido a ensaios de tração continuava com a mesma resistência.

2.2.2 Conceito de Fadiga

Existem diversas literaturas a respeito do tema fadiga, com seus respectivos conceitos e definições, porém de maneira geral podemos descrever como: Uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenhamos deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil. (Abrahão, 2008).

Segundo Lima (2018), em relação aos materiais que são afetados por esse fenômeno temos que praticamente todas as classes de materiais podem chegar a passar pelo mesmo. Pois apesar de alguns materiais em nenhum momento de sua vida útil serem exigidos a sofrerem tensões próximas ou superiores ao escoamento podem falhar através de baixas, porém perigosas tensões cíclicas/dinâmicas ao longo de sua utilidade.

2.2.3 Os 3 estágios da falha por fadiga

Segundo Norton (2013), existem 3 estágios na falha por fadiga: início da trinca, propagação da trinca e ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca. O primeiro estágio pode ter uma pequena duração; o segundo estágio envolve o maior tempo da vida da peça; e o terceiro e último estágio é instantâneo.

2.2.3.1 Estágio 1 – Início da trinca

Segundo Norton (2013), os materiais comumente apresentam irregularidades na sua estrutura, que são provenientes em muitas vezes do seu próprio processo de fabricação, tornando-os em escala microscópica não homogêneos e não isentrópicos. Pois nesses materiais existem regiões, conhecidas como “entalhes”, onde tensões variantes no tempo agem

desgastando o material. A deformação plástica localizada causa distorções e cria bandas de deslizamentos (regiões de intensa deformação devido a movimentos cisalhantes) ao longo dos contornos dos cristais do material. À medida que os ciclos de tensão ocorrem, bandas de deslizamento adicionais aparecem e agrupam-se em trincas microscópicas. Mesmo na ausência de um entalhe (como em corpos de prova planos) este mecanismo ainda ocorrerá, desde que se exceda o limite de escoamento em alguma região do material. Vazios ou inclusões preexistentes servirão como intensificadores de tensão para iniciar a trinca. Materiais menos dúcteis não apresentam a mesma habilidade para escoar, comparados àqueles citados no parágrafo anterior, e tendem a desenvolver trincas mais rapidamente. Eles são mais sensíveis a entalhes. Materiais frágeis (especialmente os fundidos) que não escoam podem pular esse estágio inicial e proceder diretamente para a propagação da trinca em locais de existência de vazios ou inclusões, que atuam como trincas microscópicas.

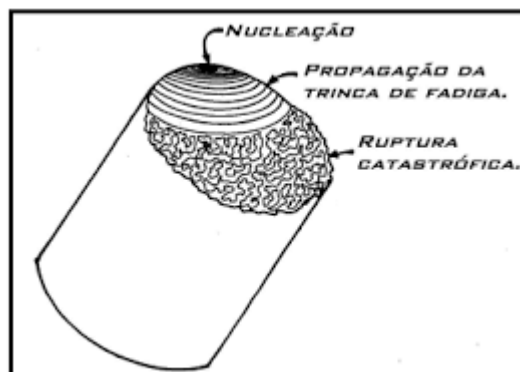
2.2.3.2 Estágio 2 – Propagação da trinca

Segundo Norton (2013), com o estabelecimento da trinca os mecanismos de fratura começam a entrar em funcionamento. Existem trincas mais severas que os entalhes, pois provocam maiores tensões, essas são trincas pontiagudas. Desenvolve-se, assim, uma zona plástica na ponta da trinca, cada vez que uma tensão de tração a alongando, abrandando-se as tensões em suas pontas e reduzindo a concentração de tensão efetiva. A tensão pode reduzir sua intensidade e cessar momentaneamente com flutuações de tensão nulas ou muito baixas, para compressão e tração respectivamente. Porém com retorno da aplicação de tensões tratativas cíclicas a trinca volta a aumentar, isso não é tão intensificado com tensões compressivas, por isso que em muitos casos trata-se essas falhas por fadiga como tratativas. Com o passar do tempo e aumento da quantidade de ciclos as zonas de tensão são intensificadas podendo ser visualizadas com o auxílio de microscópio óptico, onde pode-se observar o aparecimento de estrias no material.

2.2.3.3 Estágio 3 – Fratura

Segundo Norton (2013), a trinca continuará a crescer e se desenvolver ao mesmo passo que as tensões cíclicas e/ou fatores relacionados à corrosão de severidade estão suficientemente presentes no material. Em determinado ponto, o tamanho da trinca torna-se grande o bastante para aumentar o fator de intensidade de tensão na extremidade da trinca, até o nível da tenacidade à fratura do material, ocorrendo em seguida a falha no material que ocorre de forma súbita e repentinamente. A Figura 6 logo abaixo mostra como se dão esses estágios.

Figura 6 - Estágios de propagação da trinca no material.



Fonte: Pêcego (2015).

2.3 Baja SAE

2.3.1 Perfil dos estudantes “Bajeiros”

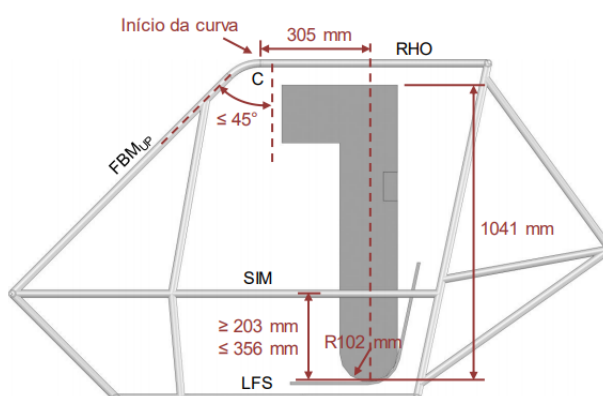
Nessa etapa decidiu-se mostrar um pouco da vivência como componente de uma equipe de veículo de competição Baja SAE, já que além de conhecer várias pessoas do ramo, passei quase 3 anos de graduação na equipe da UFERSA-Mossoró, a Cactus Baja SAE. O perfil do estudante que participa de equipes baja é muito diversificado, desde o início ele é colocado a trabalhar com prazos e sempre em pressão constante, tanto por parte dos comitês organizadores, como dentro da própria equipe, sempre visando a busca de um objetivo principal que vai além das premiações, que é a formação de um profissional que esteja ligado tanto ao que o mercado exige e acima de tudo saiba trabalhar em grupo, em hierarquia. Nós absorvemos conhecimentos que dificilmente são repassados em sala de aula, tais como metodologia e gestão de projetos, utilização de *softwares* de modelagem 3D e simulação computacional, gestão de recursos humanos, contato com idiomas estrangeiros, especialmente o inglês, tanto nas pesquisas com nas competições propriamente ditas, gestão de finanças, metodologia para realização de testes experimentais, e marketing e logística externa. Tudo isso aliado a característica individual de cada um favorece o crescimento desse ramo, e consequentemente da educação contemporânea.

2.3.2 Veículos Baja SAE

Os protótipos Baja, desenvolvidos por estudantes de universidades públicas e privadas do Brasil e do mundo, são veículos destinados geralmente a terrenos *off-road*, ou seja, fora de estrada. Por essa característica implícita estes são constantemente submetidos a oscilações severas em sua estrutura, e principalmente em seus elementos de massa suspensa (suspensão).

O veículo é em grande parte regulamentado pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), que determina vários parâmetros para segurança dos usuários e pilotos dos veículos, que vão desde restrições dimensionais no chassi do veículo até a potência e tipo/modelo de motor a ser utilizado nas competições. Sendo assim o grande diferencial existente entre um veículo e outro está em como os competidores gerenciam seus recursos disponíveis e projetam seus veículos para poderem superar seus adversários. A Figura 7 mostra uma parte do regulamento referente à gaiola do veículo. E a Figura 8 indica o modelo de motor a ser utilizado.

Figura 7 - Vista lateral regras chassi Baja SAE.



Fonte: RATBSB (SAE Brasil) – (2018).

Figura 8 - Modelo de motor especificado nas competições (*Briggs & Stratton*, série 19 [10 HP]).



Fonte: *Briggs & Stratton* (2019).

Em relação aos requisitos gerais do veículo segundo RATBSB (SAE Brasil), possui dimensões máximas de 1,62 m de largura e 2,74 m de comprimento, deve acomodar pilotos entre 1,45 e 1,90 m de altura com pesos que variam de 42 a 109 kg. Esses veículos

comumente possuem suspensão dianteira do tipo duplo A (*Double Wishbone*), na maioria dos veículos. E suspensão traseira bastante diversificada como: *multilink*, *swing axle*, *semi trailing arm*, *double Wishbone*, *H-arm*, ..., entre outras. Alguns estudos como YAN (2008) mostram que elementos da suspensão sofrem ativamente fadiga em componentes que são submetidos a obstáculos com variadas amplitudes. Alguns desses são ponta de eixo, manga de eixo, cubos de roda e braços de suspensão. A Figura 9 mostra o terreno sob qual o carro é colocado a trafegar.

Figura 9 - Veículo Baja sendo submetido a obstáculo de rampa.



Fonte: Autoria própria (2018).

2.3.3 Competições Baja SAE

De acordo com RATBSB (SAE Brasil) as competições regionais e nacionais são desafios lançados aos estudantes de engenharia com o intuito que eles sejam levados a projetar, contruir, testar promover e operar veículos do tipo *off-road* seguindo a regulamentação exigida visando não somente a participação nos eventos SAE, mas principalmente para formação do profissional (aluno) para o mercado de trabalho, em especial o da automobilística. Pois através dessas vivências desafiadoras os mesmos podem de certa forma estarem preparados para encarar o mundo do trabalho e exercer sua profissão com qualidade e excelência.

A competição é formada pelos estudantes, professores orientadores e co-orientadores em alguns casos, comitê organizador formado por juízes, avaliadores, patrocinadores e etc. Um fato importante que vale ser ressaltado é a respeito dos juízes. Esses em muitos casos são ex-bajeiros que se envolveram tanto no ramo que decidiram continuar, mas exercendo outra

função, muitos deles já fazem parte da engenharia automobilística, sendo engenheiros de diversas montadoras.

A disputa é constituída de provas estáticas e dinâmicas, avaliando dos competidores tanto os quesitos apresentação e defesa de projeto como qualidade de fabricação e setagem adequada de seus veículos. As provas da competição e suas respectivas pontuações são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de pontuações da competição.

Avaliação de projeto – 320 pontos	
Revisão de projeto	120
Avaliação de Projeto Dinâmico	20
Apresentação de Projeto e Finais de Apresentação de Projeto	180
Eventos dinâmicos – 280 pontos	
Aceleração	45
Velocidade Máxima	45
Tração	45
Lama	45
Suspensão	70
Manobrabilidade	30
Enduro de Resistência – 400 pontos	
Pontuação total	1000

Fonte: RATBSB (SAE Brasil) – (2018).

2.4 Métodos de Aquisição de dados para testes de fadiga

A fadiga como vimos anteriormente é um fenômeno que relaciona o nível de tensão/deformação do componente com o número de ciclos que o mesmo suporta. Nessa etapa busca-se mostrar as várias formas utilizadas atualmente para coleta e tratamento desses dados. Existem alguns mecanismos utilizados para essa coleta e análise de dados, como: extensômetros, sensores piezoelétricos, aquisitores de dados, ..., entre outros.

2.4.1 Extensômetros (*Strain Gauges*)

De acordo com Flatland. *et al* (2015), os extensômetros ou do termo em inglês (*Strain Gauges*) são dispositivos que são amplamente usados em aplicações cotidianas, tanto a nível

comercial, industrial ou mesmo em aplicações pessoais. O grande diferencial dos extensômetros é a versatilidade que apresentam, pois conseguem converter múltiplas variedades de carregamentos aplicados em apenas uma simples variação de resistência elétrica. Com isso eles conseguem converter propriedades mecânicas de um sistema físico em dados elétricos que podem ser usados para adquirir as cargas e/ou pressões para o futuro projeto do componente ou para ajustes realizados no sistema.

O *Strain Gauge* consiste de um simples filamento de um fio estruturado internamente em uma pequena grade para criar um resistor com uma resistência elétrica pré-definida. Seguidamente ela é ligada ao componente analisado, essa fixação geralmente é realizada através de colas especiais de alta resistência com a superfície do material sem obstruções, assim os *gauges* sofrem as tensões, cargas de força e pressões associadas ao componente. Através desses carregamentos o componente estrutural irá começar a se deformar. Essa deflexão é transmitida ao extensômetro, causando sua deformação que levemente causa sua retração ou expansão. Esses movimentos variam a deflexão interna do fio e consequentemente da resistência elétrica do extensômetro. Com isso deflexão/deformação no material fica diretamente relacionado com a variação de resistência na *gauge*. Algumas equações utilizadas são mostradas abaixo:

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_q}{2} + \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_q}{2} \cos(2\theta) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_q}{2} + \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_q}{2} \cos 2(\theta + 45^\circ) \quad (2)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_q}{2} + \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_q}{2} \cos 2(\theta + 90^\circ) \quad (3)$$

$\varepsilon_1 = \text{Extensômetro 1}$

$\varepsilon_2 = \text{Extensômetro 2}$

$\varepsilon_3 = \text{Extensômetro 3}$

$\varepsilon_p = \text{Deformação na direção primária horizontal}$

$\varepsilon_q = \text{Deformação na direção primária vertical}$

$\theta = \text{Ângulo no qual o gauge 1 está orientado em relação a direção primária horizontal}$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (4) \quad \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_P = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_P + \nu \varepsilon_Q) \quad (6) \quad \sigma_Q = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_Q + \nu \varepsilon_P) \quad (7)$$

σ_P : Tensão na direção primária horizontal

σ_Q : Tensão na direção primária vertical

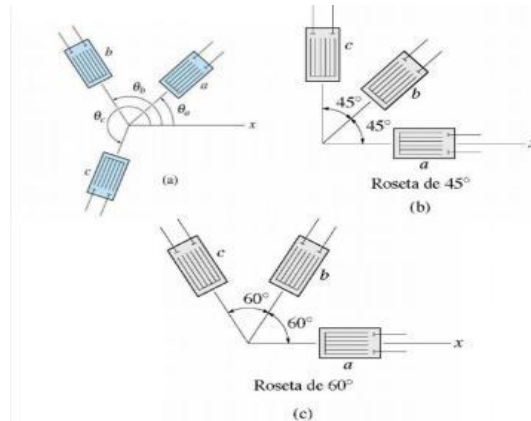
E : Módulo de elasticidade do material analisado

ν : Coeficiente de Poisson do material analisado

Um modo bastante utilizado para mensuração de deformação através de *strain gauges* é o posicionamento por rosetas de deformação, com essa configuração esses elementos conseguem ficar em uma certa angulação entre si, podendo ser entre intervalos de 60° e 45°, com isso o dispositivo conseguem registrar as tensões multiaxiais atuantes no componente analisado. No entanto antes que se realize esse processo se faz necessário considerar alguns parâmetros:

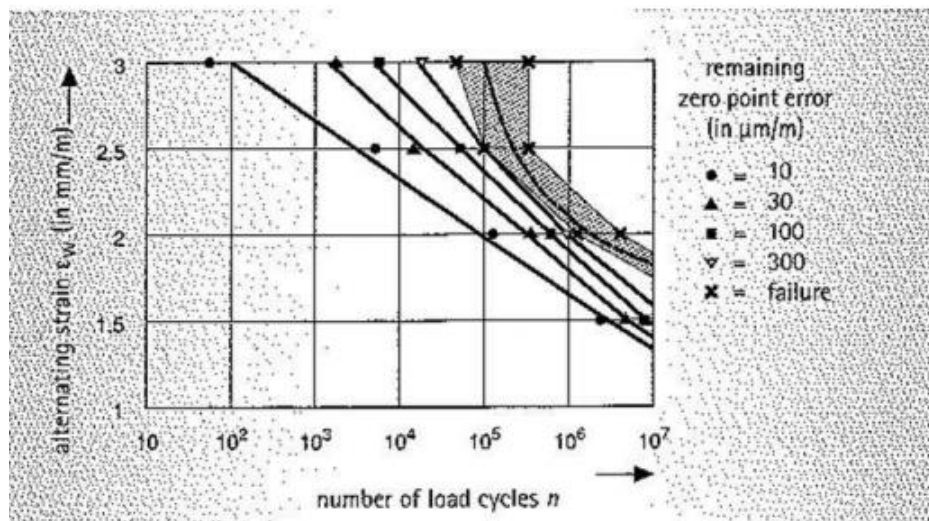
- Superfície de fixação do extensômetro deve se apresentar sem rugosidades e preferencialmente estar polida, para adequada fixação do mesmo;
- É estritamente recomendado a utilização de 4 *strain gauges* para a mensuração de variação de resistência através do método de ponte de *Whitstone*;
- Como dito no item anterior é necessário a utilização da ponte de *Whitstone* para mensuração do valor de variação de resistência em extensômetros, esse fato se dá porque esse valor é consideravelmente pequeno, porém com esse artifício físico essa variação causa um desequilíbrio na ponte formada pelos 4 resistores variáveis, resultando em uma DDP que pode ser medida, porém existem outras formas de amplificação desse sinal através de dispositivos que já utilizam internamente esses princípios para realizar esse processo. A Figura 10 mostra a configuração dos extensômetros em rosetas de deformação. Já a Figura 11 indica como esse extensômetro consegue representar um resultado de fadiga para o componente.

Figura 10 - Extensômetros em configuração de roseta de deformação.



Fonte: Hibbeler (2009).

Figura 11 - Diagrama S-N obtido por meio de extensômetro.



Fonte: Flatland *et al.* (2015).

2.4.2 Sensores Piezoelétricos

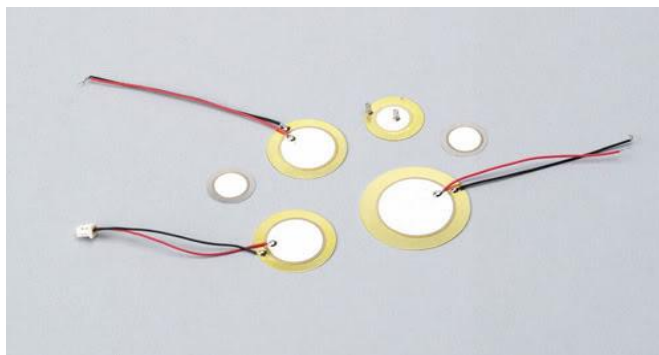
De acordo com Flatlan *et al.* (2015), os sensores piezoelétricos são dispositivos que medem a pressão ou tensão utilizando o fenômeno da piezoelectricidade que é a capacidade que alguns materiais possuem de gerar uma corrente elétrica quando deformado, ou seja, geram uma resposta a uma pressão mecânica exercida sobre o mesmo. O efeito piezoelétrico é reversível, pois os cristais deste tipo, quando são sujeitos a uma tensão externa, são capazes de sofrer variações em sua forma. A deformação gira em torno de 0,1% da dimensão original nestes tipos de cristais, estes dispositivos possuem algumas aplicações de grande importância, tais como a produção e detecção de sons, a geração de altas tensões e também a geração de uma frequência eletrônica.

O sensor piezoelétrico consegue converter a força exercida sobre ele por compressão em impactos de vibração em um sinal elétrico proporcional à intensidade da força. Os materiais

piezoelétricos podem ser sintetizados industrialmente, produzidos a partir de um único cristal como por exemplo de fosfato de gálio.

Segundo Flatland *et al.* (2015), a grande diferença existente entre os *straingauges* e os sensores piezoelétricos está no fato de que os segundos possuem uma grande limitação, porque as forças do carregamento precisam ser conhecidas para que se possa determinar as deformações induzidas no componente. Senso assim estes não são tão efetivos para projetos como o Baja, haja vista que como estão no nível de protótipo ainda não se sabem muitas informações a respeito de seus esforços, na verdade geralmente esse é o objetivo que se encontrem esses esforços. A Figura 12 mostra como são esses sensores encontrados comercialmente.

Figura 12 - Sensores piezoelétricos.



Fonte: Comunidade *Hardware*. (2009).

2.4.3 Aquisitores de dados

Em muitos casos se faz necessário a utilização de meios que propiciem uma maior coleta de dados ao longo tempo. Praticamente a maioria das considerações em aplicações dinâmicas se faz necessário a utilização de dispositivos que captem um maior nível de dados por segundo. Esses aparelhos são os aquisitores de dados, esses de acordo com Flatland *et al.*, são capazes de possuir uma ampla faixa de frequência de aquisição. Em certos casos atendendo a um range de 100 Hz até cerca de 90 ou 100 kHz.

Com base em *National Instruments* (2019) a aquisição de dados (DAQ) – *Data Acquisition* é um processo de medição de um fenômeno seja ele elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, com o auxílio de um computador. Um DAQ é constituído de sensores, *hardware* de aquisição e medição dos dados e um computador com *software* programável. Comparando esse sistema a outros tradicionais, esses exploram a capacidade de processamento, produtividade, sistemas de visualização e recursos de

- Condicionamento de sinais: É de conhecimento geral que os sinais na sua maioria dos casos são ruidosos e demasiadamente perigosos em casos de medição direta. Esses circuitos de condicionamento de sinal servem justamente para colocar o sinal em um formato adequado para a entrada em um conversor analógico-digital (ADC). Esses circuitos podem ainda ser formados de sistemas de amplificação, atenuação, filtragem e isolamento.
- Conversor analógico-digital (ADC): Antes de serem manipulados por equipamentos digitais, como computadores, os dados precisam ser convertidos e, sinais digitais. Um ADC é um chip que fornece a representação digital de um sinal analógico em um instante do tempo. Na prática, os sinais analógicos variam continuamente ao longo do tempo e um ADC coleta "amostras" periódicas de um sinal em uma taxa predefinida. Essas amostras são transferidas por um barramento ao computador, onde o sinal original é reconstruído a partir das amostras do *software*.
- Barramento do computador: Os dispositivos DAQ são então interligados ao computador por meio de *slots* ou portas. O presente componente atua como uma interface de comunicação entre o dispositivo DAQ e o computador, para transmitir instruções e dados de medição. São oferecidos dispositivos DAQ para os barramentos de computador mais comuns, incluindo USB, PCI, PCI Express e Ethernet. A Figura 14 mostra um modelo real de aquisitor de dados encontrado comercialmente.

Figura 14 - DAQ Keysight 34972A.



Fonte: Autoria própria. (2019).

2.4.3.3 Computadores e *softwares*

Com base em *National Elements* (2019), um computador pode controlar a operação do dispositivo DAQ, podendo ser usado para o processamento, visualização e armazenamento de dados de medição. Diferentes tipos de computadores são usados em diferentes tipos de aplicações. Um desktop pode ser usado em um laboratório, por sua capacidade de processamento, um laptop pode ser usado em campo, por sua portabilidade, ou um

computador industrial pode ser usado em uma fábrica, por sua robustez. Dentro dos vários sistemas de aquisição de dados existem vários componentes de *software* são eles:

- Software de driver: Permite a aplicação integrada a um dispositivo DAQ. Ele simplifica a comunicação com o dispositivo, abstraindo comandos de *hardware* de baixo nível e a programação no nível do registro. Tipicamente esse *software* expõe uma interface de programação de aplicações (API), que é utilizada para ambientes de construção de *software* de aplicação.
- Software de aplicação: Facilita a interação entre o computador e o usuário na aquisição, análise e apresentação dos dados da medição. É construída através de funções pré-definidas, ou um ambiente de programação destinado ao desenvolvimento de aplicações com funções customizadas. Essas últimas são utilizadas para automatizar as diversas funções do DAQ, executar algoritmos de processamento de sinais e exibir interfaces de usuário customizadas. A Figura 15 apresenta um sequenciamento dessas ideias.

Figura 15 - Fluxograma simplificado do DAQ.



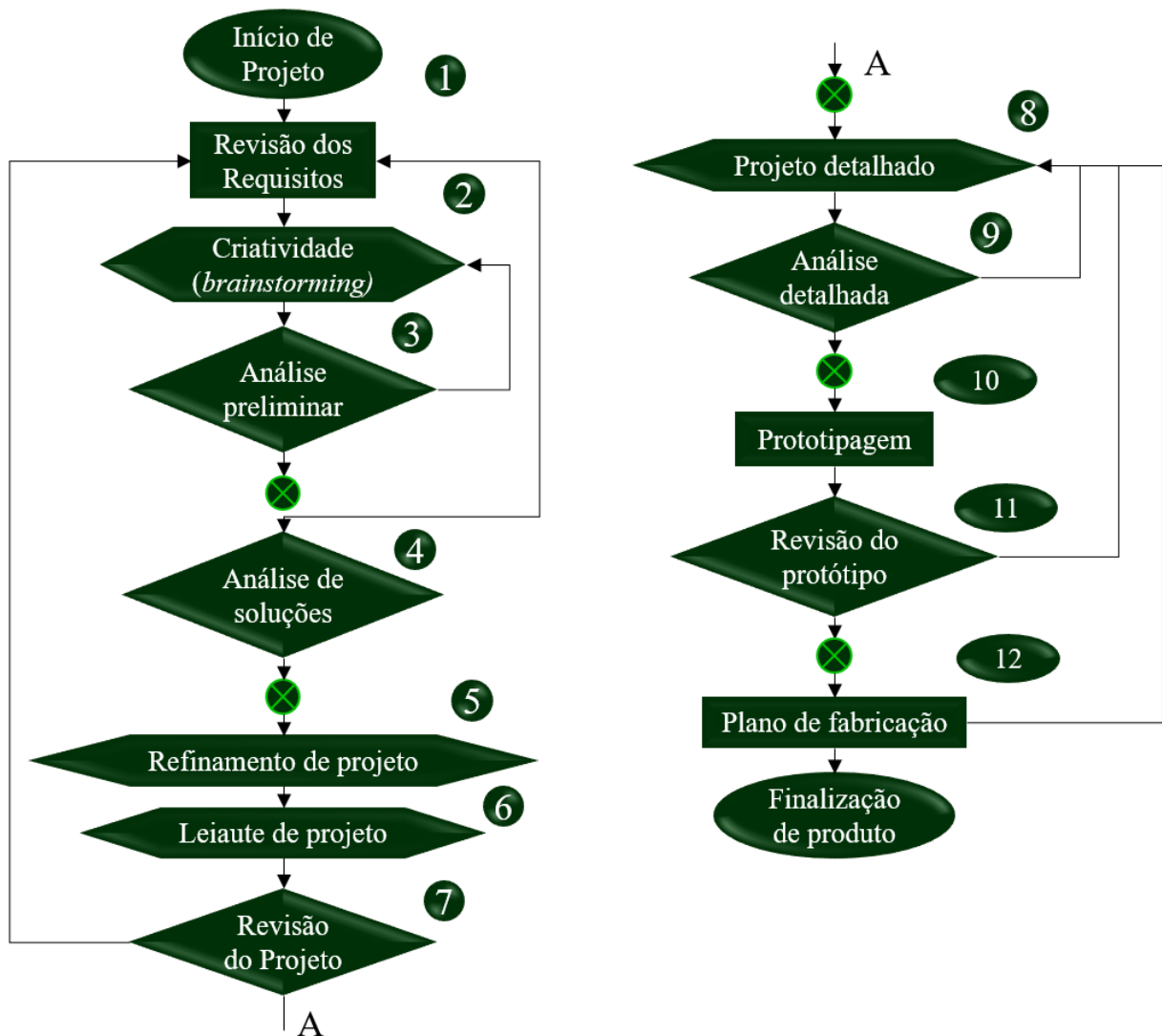
Fonte: *National Elements*. (2019).

Como pode-se observar através do que foi apresentado existem várias formas pra coleta e tratamentos dos dados em sistemas de medição, algumas com mais capacidade que outras, porém com princípio relativamente semelhante. Em aplicações como a coleta de esforços em protótipos Baja SAE, que são aplicações dinâmicas o ideal seria a utilização de aquisidores de dados, pois sua frequência de aquisição tem muito mais alcance que sistemas eletrônicos comuns, porém como na maioria dos casos não é demandado um recurso financeiro tão elevado para a realização desses testes experimentais se faz necessário a utilização de artifícios que possibilitem a realização desses testes, porém utilizando alternativas mais viáveis para as equipes.

3 PASSO A PASSO PARA REALIZAÇÃO DO PROJETO

Nesse capítulo serão abordados todos os procedimentos realizados para o desenvolvimento para a ideia do projeto, bem como sua posterior elaboração e execução. Como dito anteriormente a metodologia de projeto utilizada foi a Coryell, nos próximos registros serão mostrados como o atual projeto abordou cada tópico mencionado por Coryell, adequando-o de melhor forma possível a sua realidade. Na Figura 16 é mostrado o fluxograma geral de todo processo, com o detalhamento logo em seguida.

Figura 16 – Fluxograma geral do projeto segundo Coryell.



Fonte: Coryell. (2002) adaptado.

3.1 Revisão dos requisitos

Na fase inicial buscou-se fundamentar a ideia de projeto a partir de uma necessidade bastante recorrente na equipe de Baja da qual participei. Pois existiam muitos questionamentos acerca de como coletar os esforços atuantes no veículo, consequentemente, os esforços de fadiga também, que em muitos casos geravam certas dúvidas sobre a autenticidade e veracidade dos dados. A partir disso surgiu a ideia de desenvolver um projeto que pudesse sanar ou pelo menos diminuir essas dificuldades com aquisição de esforços de fadiga nos componentes.

3.2 Criatividade

Nessa segunda etapa foi utilizado a técnica de *brainstorming* na qual várias iniciativas foram pensadas com o intuito de que o objetivo inicial fosse alcançado. Essa fase de certa forma não foi apenas pontual, pois as ideias lançadas já foram até mesmo utilizadas no projeto Cactus Baja.

Algumas sugestões levantadas para medição de fadiga nos componentes de suspensão ao longo do tempo foram em grande parte derivada da utilização de extensômetros via módulos eletrônicos Arduino ou aquisitor de dados *Keysight* 34972. Os dispositivos eram posicionados nas bandejas e braços de suspensão e assim eram coletados ao período de um certo tempo através de transmissão cabeada e posteriormente transmissão via telemetria. Nesses testes eram utilizados veículos anteriores ou mesmo protótipos atuais que eram submetidos a mini circuitos elaborados pela própria equipe visando simular as situações reais encontradas nas provas das competições. O Quadro 1 logo abaixo mostra como se davam esses testes

Quadro 1 – Procedimentos para aquisição de dados (experimentos reais).

Extensômetro posicionado na bandeja de suspensão	Calibração do teste via aquisitor de dados <i>Keysight 34972^a</i>	Dispositivo LVDT para coleta de dados
		
Teste Salto	Teste Manilha	Teste Vala
		

Fonte: Autoria própria. (2019).

Alguns dos problemas que eram enfrentados nesses testes eram a instrumentação, que em várias ocasiões eram inadequadas muito devido aos recursos disponíveis, bem como a utilização dos veículos, que de certa forma fugia do objeto de um projeto ao ser testado após sua fabricação. Esses e outros motivos levaram a ideia do presente trabalho, que se fizesse uma bancada para que esses testes fossem realizados de uma maneira mais profissional e que os resultados fossem mais conclusivos.

3.3 Avaliação e efetuação da análise preliminar e análise das soluções

Nessas duas etapas decidiu-se realizar um apanhado geral sobre como estava o projeto considerando sua visão do setor interno, no que se refere aos próprios responsáveis pelo mesmo, bem como sua visão externa objetivando conhecer como possíveis interessados poderiam ver nosso produto em relação as alternativas já existentes no mercado. Para isso foi elaborada uma matriz QFD onde pode-se realizar melhor essa comparação, e com isso dar

uma melhor garantia caso o produto ficasse mais tempo em mercado ou fosse produzido comercialmente. A Figura 17 apresenta um esquema inicial da matriz QFD.

Figura 17 – Matriz QFD (Bancada de fadiga).

---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Fonte: Autoria própria. (2020).

3.4 Refinamento de projeto

Nessa etapa foram realizados procedimentos com o objetivo de alcançar um melhor detalhamento do projeto. Dessa forma, foram comparados possíveis componentes que poderiam ser utilizados no protótipo em suas várias partes. Considerando critérios como custo, versatilidade, precisão, resistência e etc.

Uma alternativa utilizada que se mostrou bastante viável foi a utilização de matriz de escolha para comparar as várias opções existentes de componentes para o protótipo, pois apresentou resultados adequados com um maior nível de simplicidade e rapidez de análise. A seguir serão apresentadas algumas matrizes de decisão acerca de componentes utilizados para o projeto.

3.4.1 Material da bancada

A escolha do material a ser utilizado para construção da bancada de fadiga considerou alguns critérios importantes, entre eles em especial o custo associado ao material, onde também foram consideradas as formas de aquisição e acesso ao mesmo. Outro fator importante considerado foi a soldabilidade do material, ou seja, sua facilidade em permitir o processo de soldagem, que de certa forma iria aumentar ainda mais o custo final do projeto com a necessidade de soldas mais elaboradas. Com isso a pontuação final mostrou que a melhor opção a ser utilizada para o protótipo seria o aço ABNT 1020 como é mostrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Matriz de escolha para o material da bancada.

Critérios de Análise <i>Pesos</i>	Resistência	Soldabilidade	Custo	Total
	2	3,5	4,5	10
Material (estrutura)				
ABNT 1020	7,5 15	8,5 29,75	9 40,5	85,25
ABNT 1045	9 18	8,5 29,75	8 36	83,75
SAE 4130	9,5 19	7 24,5	6,5 29,25	72,75

Fonte: Autoria própria. (2020).

3.4.2 Formas de atuação

Como o intuito do trabalho se constituía na mensuração de ciclos de fadiga era necessário escolher como se daria a excitação cíclica nos componentes de suspensão dos protótipos que seriam testados. Dessa forma foram considerados 3 tipos de atuadores diferentes: mecânicos, pneumáticos e hidráulicos. Os critérios mais relevantes foram o custo e o range de forças atendidas pelos mesmos. Após fazer o balanço pode-se perceber que a alternativa que apresentava um melhor custo-benefício para o projeto seria a utilização de atuadores pneumáticos como é explicitado na Quadro 3.

Quadro 3 – Matriz de escolha para as formas de atuação.

Critérios de Análise Pesos	Faixa de forças	Range de Controle	Instrumentação	Custo	Total
	Atuadores				
	2,5	2	2	3,5	10
Mecânico	5,5 13,75	5 10	9 18	9 31,5	73,25
Pneumático	9 22,5	9 18	8,5 17	8 28	85,5
Hidráulico	8,5 21,25	8,5 17	7,5 15	7,5 26,25	79,5

Fonte: Autoria própria. (2020).

3.4.3 Sensores utilizados

Para a coleta dos dados foram elencados possíveis sensores que poderiam ser utilizados para medição de força/tensão. Com base em Balbinot e Brusamarello (2007) foram consideradas algumas características comuns entre os vários sensores. Observando critérios como sensibilidade, custo e versatilidade os extensômetros foram escolhidos por apresentarem um melhor desempenho em comparação aos demais como é mostrado no Quadro 4

Quadro 4 – Matriz de escolha para o sensor.

Critérios de Análise Pesos	Durabilidade	Versatilidade	Sensibilidade	Adaptabilidade a superfície	Instrumentação	Custo	Total
	Sensores						
	1	2	1	1	2	3	10
Transdutor de força piezoelétrico	9,5 9,5	8,5 17	7,5 7,5	5 5	7,5 15	8,5 25,5	79,5
FSR (Force sensitive Resistor)	7 7	7,5 15	6,5 6,5	6 6	8,5 17	5,5 16,5	68
Transdutor de força Capacitivo	8,5 8,5	7,5 15	8,5 8,5	6 6	7,5 15	6,5 19,5	72,5
Extensômetro	7 7	9 18	8,5 8,5	6 6	8,5 17	9 27	83,5

Fonte: Autoria própria. (2020).

3.4.4 Seleção de aquisitores de dados (*Data logger*)

A etapa final da montagem da bancada seria a seleção dos métodos de controle que seriam utilizados, visando aliar um custo-benefício associado a correta adequação do aquisitor escolhido ao problema. O Arduino foi escolhido devido a sua praticidade de trabalho, custo consideravelmente menor quando comparado aos outros *Data Loggers*, e por conseguir atender a faixa de frequência de aquisição requisitada para o projeto. O Quadro 5 mostra mais claramente como se deu essa análise/comparação.

Quadro 5 – Matriz de decisão para escolha do aquisitor de dados.

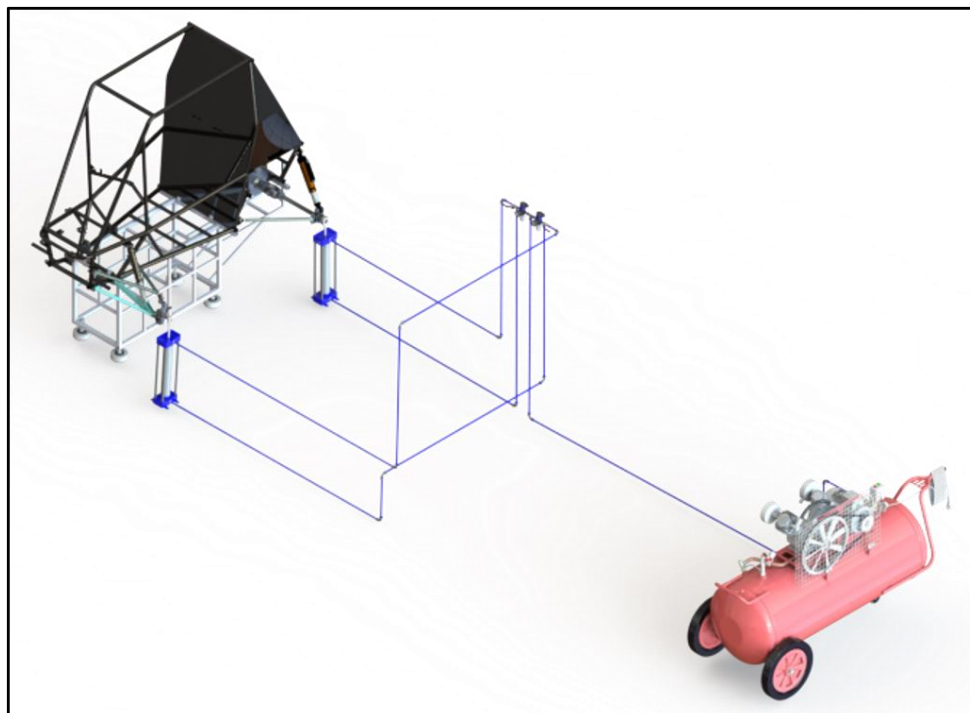
Critérios de Análise <i>Pesos</i>	Frequência de Aquisição	Versatilidade	Sensibilidade	Instrumentação	Custo	Total
	1,5	2	1,5	2	3	10
Data Logger						
Arduino	7 10,5	7,5 15	6,5 9,75	9,5 19	10 30	84,2
Aim EVO	9 13,5	8,5 17	8,5 12,75	7 14	6 18	75,25
Keysight 34792A	9 13,5	9,5 19	8,5 12,75	7 14	5 15	74,25

Fonte: Autoria própria. (2020).

3.5 Leiaute do projeto

Nessa etapa do projeto foi elaborada uma primeira ideia de como o protótipo será apresentado. Através das decisões realizadas nas etapas anteriores chegou-se a uma modelagem inicial de um projeto como um todo. Com auxílio de *software Solidworks 2019*® foram desenhados os modelos de cada componente individualmente e em seguida foi feita uma montagem completa do sistema como mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Montagem do sistema completo.



Fonte: Autoria própria. (2020).

3.6 Revisão do projeto

A fase de revisão do projeto se encarregou de realizar um apanhado geral do modelo preliminar adquirido na etapa anterior. Nela foram analisadas cuidadosamente todas as escolhas acerca dos componentes que seriam utilizados, se realmente conseguiriam atender ao que fora proposto de forma satisfatória.

Em relação ao modelo desenhado foram verificadas possíveis interferências que poderiam existir em relação a montagem dos componentes do protótipo, forma e adequação desses componentes e como os mesmos seriam dispostos na bancada de fadiga. Essa etapa se mostrou bastante importante pois pode proporcionar que os próximos passos que seriam dados possuissem uma base de projeto e revisão bem consolidada, dessa forma erros iniciais foram amenizados ou possivelmente eliminados.

3.7 Projeto detalhado

Essa etapa caracteriza-se por um grande volume de análises e adequações realizadas visando que a fase inicial de projeto conceitual e analítico fossem finalizadas para posterior etapa de desenvolvimento de protótipos e fabricação final. Entre as várias atividades

desenvolvidas nessa fase estão: dimensionamento das linhas pneumáticas, 2D detalhado com tolerâncias de todos os componentes e análise de custo.

3.7.1 Dimensionamento das linhas pneumáticas de trabalho

Visando-se detalhar mais sobre os métodos de acionamento e controle dos atuadores que seriam utilizados para que o processo de tensionamento cíclico fosse possível que a presente parte se encarregou de um estudo analítico das linhas pneumáticas do sistema objetivando proporcionar uma adequada seleção das mesmas posteriormente.

Parâmetros importantes analisados são: aceleração/velocidade de trabalho, pressões de trabalho em cada atuador necessárias para realização, bem como o diâmetro requerido para as tubulações suportarem adequadamente as vazões e pressões exercidas pelo sistema. Assim como o fluido de trabalho utilizado. Todos os cálculos tomaram como base Fialho (2003).

A força para os atuadores da suspensão dianteira e traseira foram tomadas com base em testes e estudos anteriores de aquisição de dados na suspensão realizados pela equipe. De forma simplificada o valor da força pode ser dado unicamente através da equação da segunda lei de Newton.

$$F_{req} = m \times a \quad (8)$$

Onde:

massa (em relação a força requerida exercida) “kg”

aceleração (para esse sistema simples) = $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

F_D (Força requerida para o atuador da suspensão dianteira “N”)

F_T (Força requerida para o atuador da suspensão traseira “N”)

$$F_D = 164,538 \times 9,81 \cong 1614,12 \text{ N}$$

$$F_T = 77,54 \times 9,81 \cong 760,67 \text{ N}$$

Para o cálculo da pressão temos:

$$P_{tb} = \eta_T \times P_N \quad (9)$$

Considerando:

$$P_{ND} = \frac{F}{A} = \frac{164,59 \text{ kp}}{18,02 \text{ cm}^2} = 9,133 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \quad (10)$$

$$P_{NT} = \frac{F}{A} = \frac{77,56 \text{ kp}}{16,713 \text{ cm}^2} = 4,64 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

P_{ND} (Pressão Nominal para a dianteira) = 8,95 bar, e P_{NT} (Pressão Nominal para a traseira) = 4,55 bar, pois a aplicação em sua completude é pneumática.

$\eta_T = 80\%$ (Rendimento Total do sistema)

Com isso, podemos calcular a pressão de trabalho para os dois atuadores:

$$P_{tbD} = 0,80 \times 9,133 = 7,30 \text{ kp/cm}^2 \quad (11)$$

$$P_{tbT} = 0,80 \times 4,64 = 3,712 \text{ kp/cm}^2$$

Seguidamente é realizado o cálculo para o conhecimento do diâmetro adequado para os pistões de atuação.

$$D_p = 2 \times \sqrt{\frac{\varphi \times Fa}{\pi \times P_{tb}}} \quad (12)$$

Onde:

φ = Fator de correção (Tabela 3.4, Fialho, 2003), processo desenvolvido com rapidez e com carga aplicada somente no fim de curso, semelhante a operação de estampagem: 1,35.

Fa_D = Força de atuação na dianteira (kp). [1614,12 N = 164,59 kp]

Fa_T = Força de atuação na traseira (kp). [760,67 N = 77,56 kp]

P_{tbD} = Pressão de trabalho para a dianteira (kp/cm²). [7,30 kp/cm²]

P_{tbT} = Pressão de trabalho para a traseira (kp/cm²). [3,712 kp/cm²]

D_{pD} = Diâmetro do pistão para a dianteira (cm)

D_{pT} = Diâmetro do pistão para a traseira (cm)

$$D_{pD} = 2 \times \sqrt{\frac{1,35 \times 164,59}{\pi \times 7,30}} = 6,22 \text{ cm} \quad (13)$$

$$D_{pT} = 2 \times \sqrt{\frac{1,35 \times 77,56}{\pi \times 3,712}} = 6 \text{ cm}$$

Com os diâmetros calculados passa-se agora a consulta da tabela A9 do Apêndice do livro do Fialho, em que estão contidos os diâmetros comerciais que devem ser utilizados. O valor que mais se aproxima igualmente aos dois cilindros é $D_p = 63 \text{ mm}$ e diâmetro da haste do cilindro $d_h = 20 \text{ mm}$. Vale ressaltar que os atuadores devem ser utilizados no projeto

devem possuir características especiais como por exemplo a sua geometria de envolver os elementos de ligação das suspensões que serão analisadas. Dessa forma a haste em si pode ser mantida, porém o pistão tem que se adequar ao veículo que será analisado, podendo ser até usinado, caso seja necessário.

Para a verificação do critério de Euler, usaremos a equação 14, a seguir:

$$dh = \sqrt[4]{\frac{64 \times S \times \lambda^2 \times Fa}{\pi^3 \times E}} \quad (14)$$

Onde:

S = Coeficiente de segurança [adota-se 5].

λ = Comprimento Livre de Flambagem (cm), caso 1 (extremidade livre e outra fixa), [60 cm pela Tabela A10 Fialho 2003].

Fa = Força de Avanço [1614,12 N], para a dianteira e [760,67 N], para a traseira.

E = Módulo de Young [$2,1 \times 10^7$ N/cm²]

$$d_{hD} = \sqrt[4]{\frac{64 \times 5 \times 60^2 \times 1614,12}{\pi^3 \times 2,1 \times 10^7}} = 13 \text{ mm}$$

$$d_{hT} = \sqrt[4]{\frac{64 \times 5 \times 60^2 \times 760,67}{\pi^3 \times 2,1 \times 10^7}} = 10,7 \text{ mm}$$

Como os valores obtidos para dh foram menores quando comparados ao do apêndice A9, a segurança do atuador pelo critério de Euler está atendida.

Para o cálculo do diâmetro das tubulações e dimensionamento das válvulas precisa-se do valor da vazão que passará por esta. Logo, é necessário também o valor da velocidade, haja vista que o sistema é conservativo, hermético, e a vazão é constante por toda sua extensão. A velocidade do fluido é dada pela Equação 15, empírica, retirada de Fialho (2003), que relaciona velocidade com pressão (que para nosso caso é nominal de média de 17,3 bar), através da seguinte relação:

$$V = 121,65 \times 17,3^{\frac{1}{3,3}} = 288,58 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad (15)$$

Para o cálculo da vazão, foi utilizada a Equação 16 de Dall'amico (2007), como segue abaixo:

$$Q = 59,25 \times c \times \sqrt{(p + 1,013) \times \Delta p} \times \sqrt{\frac{273}{273 + \theta}} \quad (16)$$

Onde:

Q = vazão [l/min]

c = coeficiente do tubo [1,6m/Pa]

p = pressão de saída [17,3 bar (Demanda média de pressão)]

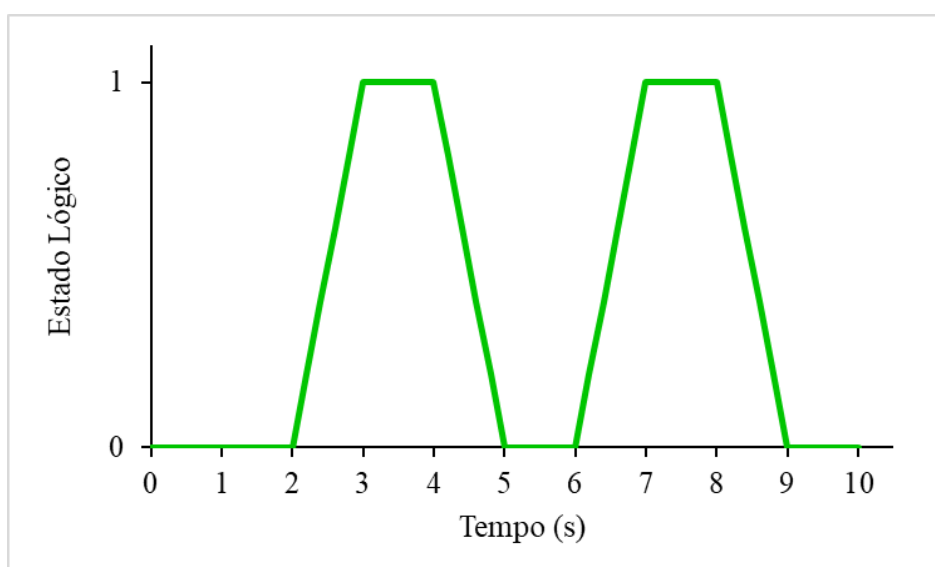
Δp = queda de pressão admissível [0,01bar]

θ = temperatura do ar [assume-se 30°C]

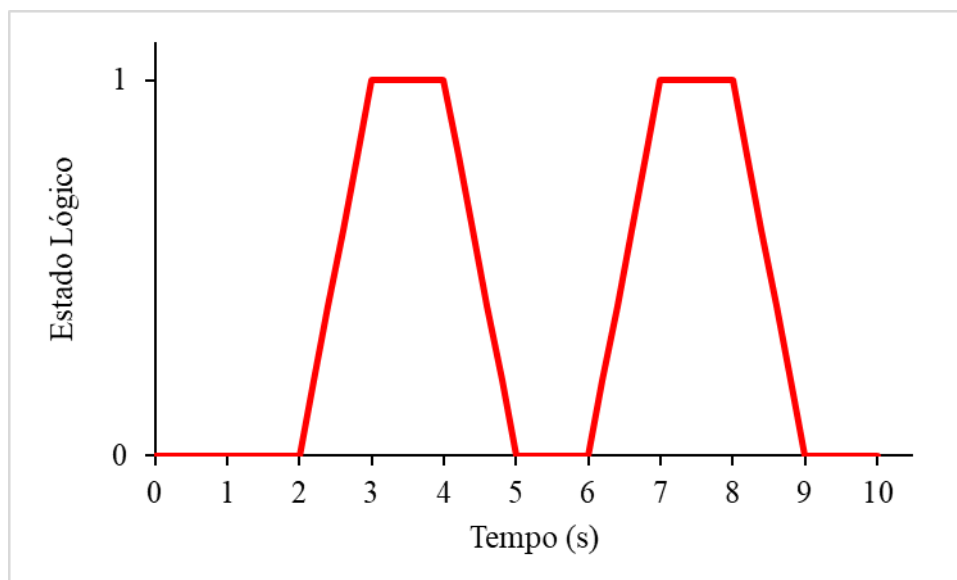
$$Q = 59,25 \times 1,6 \times \sqrt{(17,3 + 1,013) \times 0,01} \times \sqrt{\frac{273}{273 + 30}} = 38,50 \text{ l/min}$$

De forma a permitir uma melhor visualização acerca do funcionamento do sistema, foi elaborado um diagrama trajeto-passo mostrando as sequências de acionamento/funcionamento de cada um dos atuadores, bem como o esquema do circuito desenvolvido no *FluidSim Pnematic*® contido no **Anexo A**, na Figura 19. Os Gráficos 1 e 2 apresentam o diagrama trajeto-paso para dianteira e traseira respectivamente.

Gráfico 1 – Diagrama trajeto-passo para o atuador da dianteira.



Fonte: Autoria própria. (2020).

Gráfico 2 – Diagrama trajeto-passo para o atuador da traseira.

Fonte: Autoria própria. (2020).

Analisando os diagramas para dianteira e traseira podemos perceber que os atuadores percorrem um ciclo repetitivo, como era de se esperar de uma aplicação de fadiga. O atuador sai de sua posição lógica 0, ou seja, parado e eleva a sua haste rapidamente ao maior nível de deslocamento, posição lógica 1, no ponto de força máxima. Em seguida recolhe sua haste à posição original, repetindo o ciclo logo em seguida.

3.7.2 Modelagem e projeto da estrutura da bancada de fadiga

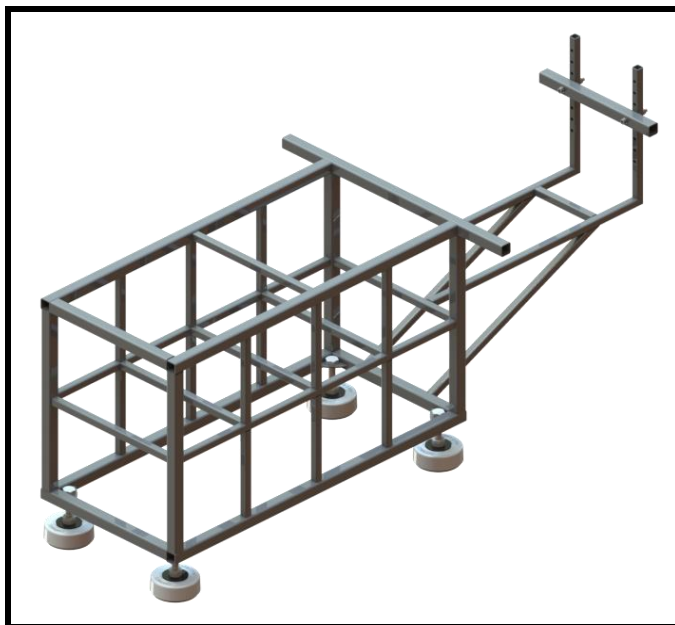
Para o *design* da bancada que comportaria os veículos durante os testes de fadiga foram tomadas algumas metas, antes da sua finalização, visando um resultado que fosse compacto e eficiente.

Um dos critérios iniciais foi a determinação do perfil da base que estaria em contato direto com os protótipos para serem analisados. Como ideia para uma referência inicial foi utilizado o projeto atual da equipe Cactus Baja, o CB 20. Como as dimensões dos protótipos são determinadas segundo regulamento da SAE, principalmente as do *Cockpit* (habitáculo do piloto), não haveriam diferenças significativas caso outros protótipos utilizassem a máquina de fadiga.

De forma a deixar a estrutura mais rígida e mais estável estaticamente, principalmente em funcionamento, foram colocados travamentos e utilizados amortecedores de vibração nas 4 extremidades da estrutura, visando uma estabilidade adequada quando a máquina estiver submetendo os veículos aos simultâneos ciclos de tensão. Como dito anteriormente a bancada

foi projetada em aço ABNT 1020, devido ao seu custo reduzido e viabilidade. A Figura 20 abaixo mostra como ficou o projeto finalizado.

Figura 20 – Estrutura da bancada de fadiga.



Fonte: Autoria própria. (2020).

3.7.2.1 Particularidades e dispositivos extras da bancada

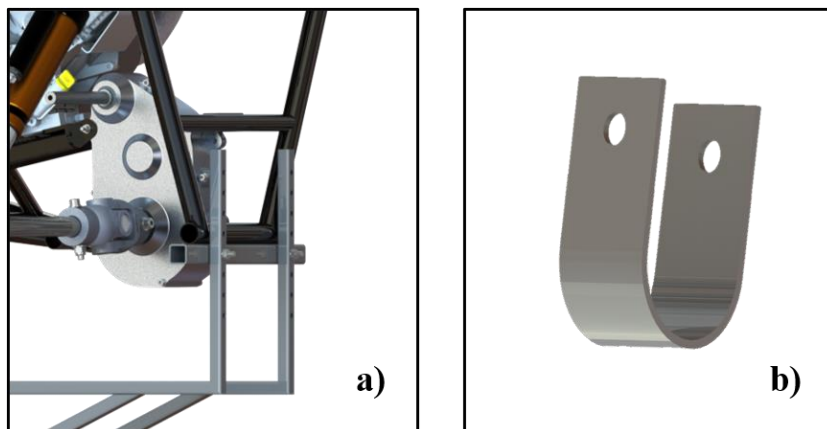
Como dito anteriormente o perfil principal da estrutura deveria ser moldado em grande parte pelo que já é regulamentado pela SAE, haja vista que todos veículos são muito semelhantes nesse aspecto e alterações para adaptação de testes em outros protótipos não seriam necessárias. Entretanto como é observado pelos vários projetos das universidades, a traseira possui diferenças mais acentuadas, pois de certa forma essa parte dos veículos não apresenta tantas restrições quanto ao regulamento.

Dessa forma o projeto da bancada buscou se adequar a essa particularidade, fazendo um suporte que permitiria se adequar aos vários pontos de engate da traseira, segundo uma variação de altura na sua extremidade. A traseira também foi reforçada com travamentos, pois como é sabido essa região dos veículos baixa contém a maior massa do veículo por dispor grande parte do sistema trativo.

Por fim foram desenvolvidos dispositivos de fixação para gaiola dos protótipos na estrutura da bancada de fadiga, com o intuito que estes ficassem mais estáveis quando em testagem. Os acessórios são semelhantes a braçadeiras de metal, podendo até serem

substituídos por estas, pois deveriam envolver os tubos da gaiola dos veículos. As imagens da Figura 21 ilustram bem as adaptações realizadas.

Figura 21 – Particularidades na estrutura, a) geometria da traseira e b) Aparato de fixação.



Fonte: Autoria própria. (2020).

3.7.3 Elaboração dos 2D's da estrutura da bancada

Nessa etapa o trabalho se encarregou de elaborar os desenhos técnicos da estrutura da bancada de fadiga que seriam importantes para posterior fabricação e/ou prototipagem. O procedimento seguiu as normas NBR 10582 e NBR 10126 buscando obter uma padronização adequada e qualidade, tanto no desenho em si, como na sua de apresentação e utilização correta de tolerâncias. Os desenhos estão contidos no Anexo A, na Figura 22.

3.8 Análise detalhada

Essa etapa do projeto/produto se mostra bastante importante, pois é onde verifica-se a viabilidade do projeto quanto a solicitação de esforços atuantes no seu funcionamento, bem como todas as forças envolvidas para realização do objetivo proposto inicialmente.

Visando proporcionar uma diminuição nos custos com a confecção de protótipos, bem como um alcance mais rápido de resultados conclusivos foram adotadas análise CAE (*Computer Aided Engineering*), que simularam ambientes reais de trabalho sobre a qual a bancada será submetida.

3.8.1 Análise de tensão estática

Visando garantir que a estrutura suporte as forças de fadiga no instante de uma situação transiente, ou seja, saída da condição estacionada da máquina para funcionamento instâneo foi

realizada uma simulação computacional com o auxílio do *software* Ansys 2020 R1®. A Tabela 2 abaixo mostra detalhadamente as condições de contorno para a simulação.

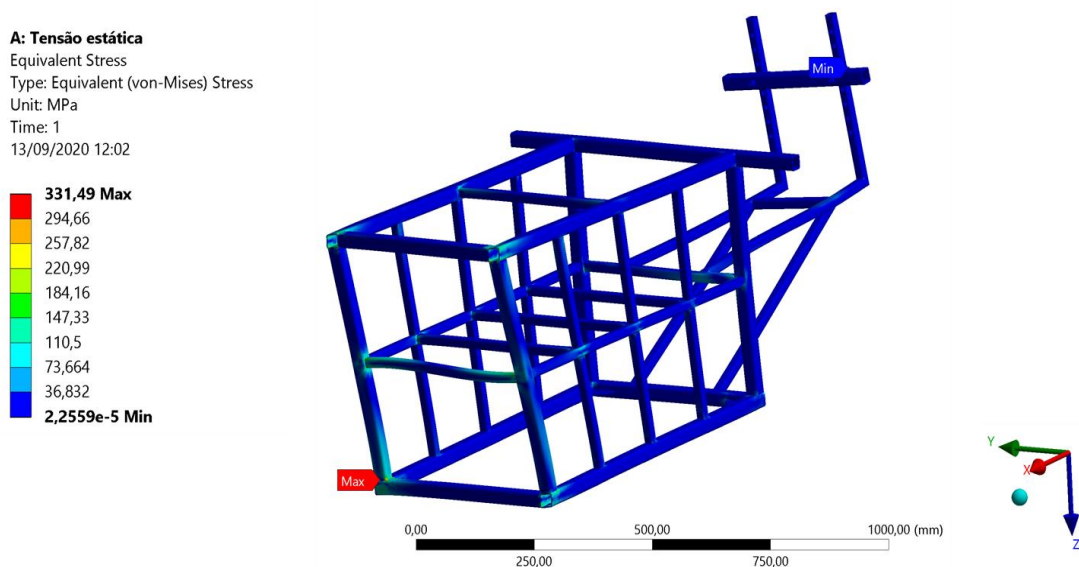
Tabela 2 – Condições de contorno simulação estática da bancada de fadiga.

Simulação estática - Bancada de Fadiga		
Condições de contorno	Configuração de malha	Resultados
F1-1700 N (Força referente ao atuador posicionado na suspensão dianteira);	Tipo: Tetraedral de 10 nós e hexagonal de 20 nós, determinada segundo a necessidade de adaptação para cada parte da geometria da bancada. Além disso essas geometrias de malha possibilitam a obtenção de resultados mais acurados, sem demandar de um tempo maior comparado a outras que poderiam ser utilizadas.	Tensão máxima de Von Mises: 331,49 Mpa
F2-800 N (Força referente ao atuador posicionado na suspensão traseira);		Deslocamento máximo: 3,13 mm.
C- Restrição fixada de movimento.		

Fonte: Autoria própria. (2020).

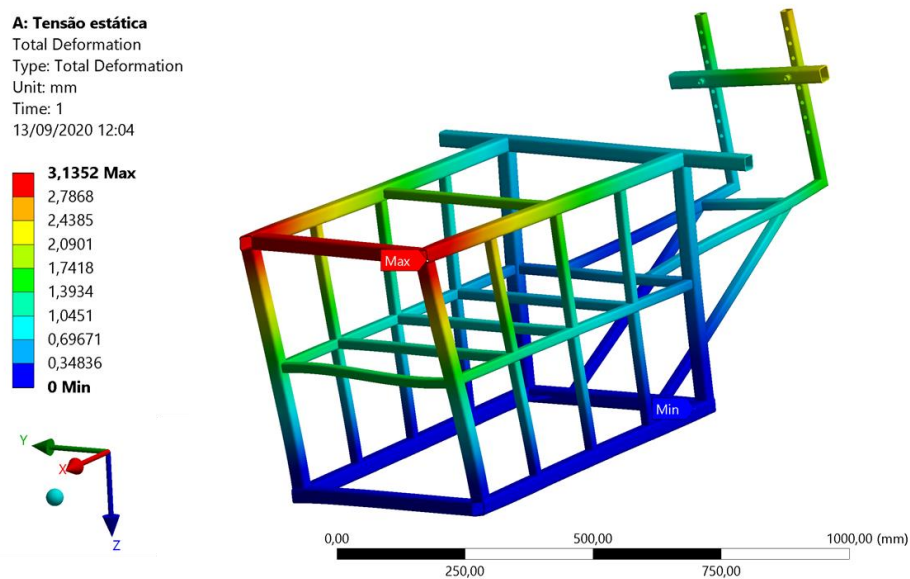
Considerando os parâmetros de entrada acima expostos podê-se realizar a simulação computacional. As Figuras 23 e 24, logo abaixo, mostram os resultados obtidos para a tensão máxima e deslocamento máximo para a estrutura.

Figura 23 – Resultado da simulação de esforço estático (Gradiente de tensões de Von Mises).



Fonte: Autoria própria. (2020).

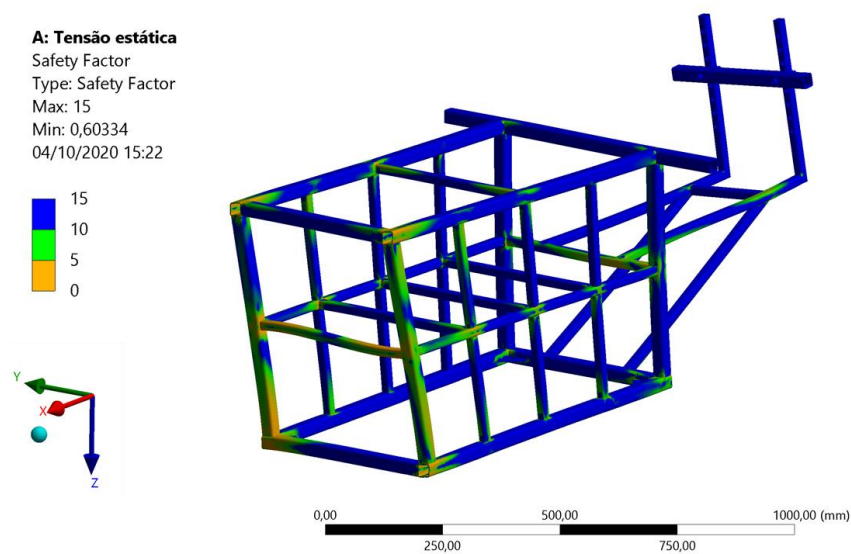
Figura 24 – Resultado da simulação de esforço estático (Gradiente de deslocamentos).



Fonte: Autoria própria. (2020).

Visando conhecer como a estrutura poderia se comportar ao longo da sua utilização de trabalho foi realizada uma análise CAE de fadiga para o componente segundo critério de falha de Von Mises. A Figura 25 abaixo mostra o gradiente para o fator de segurança à fadiga N_f para cada local da estrutura.

Figura 25 – Resultado da simulação de esforço estático (Fator de Segurança de Fadiga).



Fonte: Autoria própria. (2020).

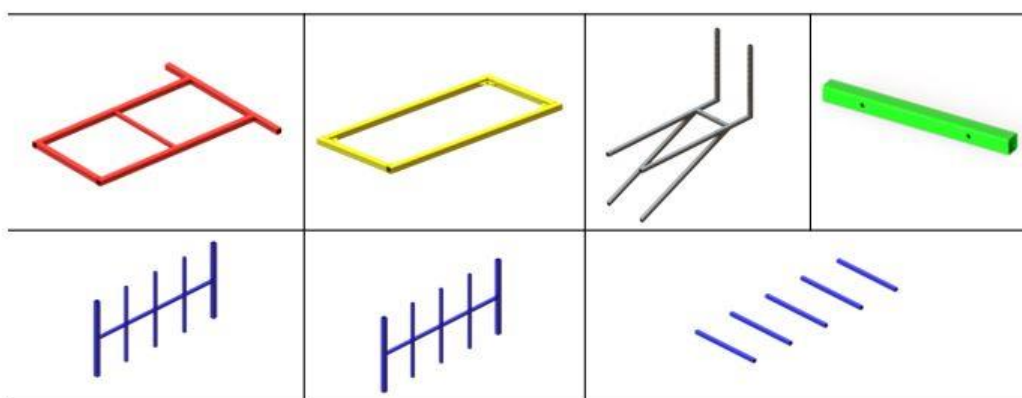
3.9 Prototipagem e revisão do protótipo

Essas duas etapas compreendiam a parte de fabricação e consequentemente testes do protótipo para conferência dos resultados, adequações ou mesmo utilização imediata e posterior liberação para reprodução de mais unidades. Porém, como mencionado anteriormente, no tópico 1.2.2, na parte de objetivos específicos sua reprodução em protótipo não foi possível haja visto o custo associado com os componentes auxiliares de controle e automação, bem como a não disponibilidade tão facilitada dos laboratórios de mecânica da universidade nesse período de luta e combate ao COVID 19. Entretanto o trabalho, com seu passo-a-passo apresentado visou proporcionar da melhor maneira possível uma sequência de produção do projeto para posteriores estudos relacionados ao tema.

3.10 Plano de Fabricação

A fabricação do protótipo da bancada de fadiga seguirá a metodologia de planos de gabaritagem, sendo eles 2D e 3D. Os gabaritos serão em escala de 1:1 e os tubos fixados com auxílio de cantoneiras e braçadeiras, permitindo assim que o protótipo final apresente o menor desvio dimensional possível em relação ao que foi colocado em projeto. A Figura 26 logo abaixo mostra como ficará a sequência de planos de fabricação, sendo primeiramente o inferior e o superior, seguidos dos travamentos e demais suportes e por fim a parte para sustentação da traseira do veículo.

Figura 26 – Planos de fabricação da estrutura para a bancada de fadiga.



Fonte: Autoria própria. (2020).

Para a fabricação dos componentes será utilizado o método de soldagem por eletrodo revestido do tipo E6013 x 2,5 mm de espessura, por apresentar uma grande suavidade da

operação, excelente soldabilidade e uma boa morfologia de cordão para soldas em todas as posições. Por sua vez a escória é de fácil remoção e o eletrodo proporciona cordões de solda lisos e regulares. Outro fator importante para a escolha desse tipo de soldagem está no custo associado, bem mais reduzido em comparação a outros processos, bem como a casualidade de poder realizar o processo em diversos ambientes sem o contraponto da contaminação na soldagem (WURTH 2015).

3.10.1 Dispositivos de automação

Visando alinhar uma pequena lista de produtos que serão necessários para o devido funcionamento da bancada de fadiga que o presente tópico vem trazer os componentes que são minimamente necessários para a realização do projeto.

Primeiramente, temos as **linhas pneumáticas** que exercerão a função de carregamento do fluido de trabalho ao longo das diversas conexões e atuadores. Para as linhas que exercerão o funcionamento da dianteira e traseira temos os tubos de poliamida com dimensões de 16 mm de diâmetro externo e parede de 2 mm, cuja pressão de trabalho opera em cerca de 14 bar, modelo PA12-16X2. Ambas trabalham em uma faixa de temperaturas entre -10°C à 80° C e são da fabricante *RuberPlastic*. Como é mostrado no Quadro 6.

Quadro 6 – Parâmetros de pressão para as linhas pneumáticas (Poliamida).

Código	Ext.	Int.	Parede	Pressão de Rupt. (bar)	Pressão de Trab. (bar)	Raio de Curva. (mm)	Rolos M
PA12 - 4x2	4,00	2,00	1,00	135	45	15	100
PA12 - 4x2,5	4,00	2,50	0,75	93	31	20	100
PA12 - 6X4	6,00	4,00	1,00	81	27	40	100
PA12 - 8X6	8,00	6,00	1,00	57	19	40	100
PA12 - 10X7	10,00	7,00	1,50	72	24	60	100
PA12 - 10X8	10,00	8,00	1,00	45	15	50	100
PA12 - 12x9	12,00	9,00	1,50	57	19	60	100
PA12 - 16x12	16,00	12,00	2,00	42	14	120	100

Fonte: Rubber Plastic (2015).

As **conexões** necessárias respeitarão as mesmas configurações das linhas pneumáticas, de modo a se adequarem a elas, sem prejuízos no momento da montagem do circuito pneumático.

Os **atuadores** serão configurados de acordo com a pressão que é requerida para cada local, no caso maior para dianteira, haja vista que possui uma maior força do sistema. De acordo com a tabela de associações entre pressões e diâmetros das haste dos cilindros obtemos para o diâmetro de 63 mm da camisa do pistão e 20 mm da haste as pressões de 5 bar

e 3 bar respectivamente. As forças de avanço e de retorno atendem aos requisitos de projeto observando a escala mostrada na tabela. Os atuadores escolhidos são de dupla-ação como mostrado no circuito da figura 19. E como detalhado através do Quadro 7.

Quadro 7 – Parâmetros para atuadores em relação a pressão de trabalho.

DIÂMETRO interno da camisa (mm)	Diâmetro haste (mm)	Rosca da haste	Rosca para conexões	 FORÇA DO CILINDRO em kgf									
				2 bar		4 bar		6 bar		8 bar		10 bar	
				Extensão	Retração	Extensão	Retração	Extensão	Retração	Extensão	Retração	Extensão	Retração
10	4	M4x0,7	M5	1,6	1,4	3,3	2,7	4,9	4,1	6,5	5,5	8,2	6,9
12	6	M6x1,0	M5	2,4	1,8	4,7	3,5	7,1	5,3	9,4	7,1	11,8	8,8
16	6	M6x1,0	M5	4,2	3,6	8,4	7,2	12,5	10,8	16,7	14,4	20,9	18,0
20	10	M8x1,25	G 1/8"	6,5	4,9	13,1	9,8	19,6	14,7	26,1	19,6	32,7	24,5
25	10	M10x1,25	G 1/8"	10,2	8,6	20,4	17,1	30,6	25,7	40,8	34,3	51,0	42,9
32	12	M10x1,25	G 1/8"	16,7	14,4	33,5	28,7	50,2	43,1	66,9	57,5	83,6	71,9
40	16	M12x1,25	G 1/4"	26,1	22,0	52,3	43,9	78,4	65,9	104,5	87,8	130,7	109,8
50	20	M16x1,5	G 1/4"	40,8	34,3	81,7	68,6	122,5	102,9	163,3	137,2	204,2	171,5
63	20	M16x1,5	G 3/8"	64,8	58,3	129,7	116,6	194,5	174,9	259,3	233,2	324,1	291,5
80	25	M20x1,5	G 3/8"	104,5	94,3	209,1	188,6	313,6	283,0	418,1	377,3	522,7	471,6
100	25	M20x1,5	G 1/2"	163,3	153,1	326,7	306,2	490,0	459,4	653,3	612,5	816,7	765,6
125	32	M27x2,0	G 1/2"	255,2	238,5	510,4	477,0	765,6	715,4	1.020,8	953,9	1.276,0	1.192,4
160	40	M36x2,0	G 3/4"	418,1	392,0	836,3	784,0	1.254,4	1.176,0	1.672,5	1.568,0	2.090,7	1.960,0
200	40	M36x2,0	G 3/4"	653,3	627,2	1.306,7	1.254,4	1.960,0	1.881,6	2.613,3	2.508,8	3.266,7	3.136,0
250	50	M42x2,0	G 1"	1.020,8	980,0	2.041,7	1.960,0	3.062,5	2.940,0	4.083,3	3.920,0	5.104,1	4.900,0
320	63	M48x2	G 1"	1.672,5	1.607,7	3.345,0	3.215,4	5.017,6	4.823,1	6.690,1	6.430,8	8.362,6	8.038,5

Fonte: Master tecnologia Industrial (2017).

No que se refere aos dispositivos de sensoriamento e controle em si temos primeiramente a utilização do **microcontrolador** arduino, modelo Mega 2560 R3 CH340. Esse aparelho, apesar de compacto mostra um custo benefício bastante interessante, pois consegue atender a demanda proposta em projeto, no que se refere a coleta de dados de pressão e pulsos no tempo, aliado a um custo bem reduzido em comparação a outros sensores mais sofisticados, além disso devido a grande gama de bibliotecas digitais disponíveis na web o *setup* inicial de programação é bem simples de se realizar por qualquer usuário. Para a medição de pressão buscou-se a utilização do **transmissor de pressão** modelo *Ebowan* dc 5V, adequado para aplicações em pneumática e hidráulica. Sua faixa de medição entre 0 e 1,2 Mpa se adequa aos requisitos de projeto ao mesmo tempo que apresenta um preço relativamente baixo quando comparado a outros sensores de semelhante aplicação (Ali Express, 2018).

Por último temos os elementos de regulação e ativação do sistema, que são os **lubrefis** ou unidades de armazenamento, filtragem e regulação de pressão e as **válulas** que servem basicamente para permitir o adequado funcionamento do sistema e movimento dos atuadores. Os primeiros foram escolhidos o modelo YANGUI-YG402 por apresentar uma faixa de

pressão que era necessária para o devido funcionamento do projeto. Já as válvulas direcionais foram escolhidas de acordo com os esquema da figura 20, do anexo A. Totalizando uma quantidade de duas válvulas 5/2 vias e 6 válvulas de 3/2 vias (M. TECNOLOGIA, 2017).

A Tabela 3 logo abaixo mostra a ilustração de cada elemento/dispositivo de automação para o projeto da bancada de fadiga. Em seguida é mostrada uma tabela com um panorama geral de custos para a elaboração do projeto.

Tabela 3 – Ilustrações dos dispositivos de controle e automação.

DISPOSITIVOS DE AUTOMAÇÃO			
Linhas pneumáticas	Conexões	Atuadores	Microcontrolador
			
Transmissor de pressão	Lubrefil (Unidade de armazenamento de pressão)		Válvulas direcionais
			

Fonte: Autoria própria. (2020).

3.11 Custo do projeto

Por fim é realizado um estudo de todos os custos referentes a fabricação do modelo-protótipo. Dessa forma pode-se analisar melhor avaliar sua viabilidade e custo-benefício de uma forma geral. O Quadro 8 mostrado logo a seguir nos apresenta um apanhado geral sobre o relatório de custos do projeto para cada equipamento necessário e/ou material requerido.

Quadro 8 – Relatório de custos do projeto.

CUSTO GERAL DO PROTÓTIPO	
ESTRUTURA	AUTOMAÇÃO

Metalon ABNT 1020 (30x30x2,6 mm) – 8,2 m	R\$ 43,82	Atuador Pneumático Ø63x200 – 2X	R\$ 799,6
Metalon ABNT 1020 (20x20x2 mm) – 11 m	R\$ 39,98	Linhas pneumáticas PU (Ø 16mm) – 10 m	R\$ 89,95
Chapa de aço 1/8” (40x40 cm)	R\$ 32,00	Conexões e periféricos pneumáticos	R\$ 22,56
Eletrodo revestido E6013 – 1 Kg	R\$ 13,00	Válvulas direcionais (2X-5/2 vias e 6X-3/2 vias	R\$ 491,2
Fixadores (parafusos, porcas e arruelas)	R\$ 7,50	Lubrefil modelo (YANGUI-YG402)	R\$ 307,98
Vibra STOP – 4X	R\$ 120,24	Motocompressor de ar (TEKNA CP-8525)	R\$ 662,90
DISPOSITIVOS CONTROLE			
Microcontrolador Arduino MEGA 2560 R3 CH340		R\$ 74,90	
Jumpers e cabos para conexão		R\$ 5,90	
Extensômetro Bf350 – 20 unid		R\$ 35,00	
Transmissor de pressão Ebowan 5v g1/4		R\$ 72,56	
Notebook Lenovo E420 Core i3		R\$ 1161,00	
TOTAL: R\$ 3980,09			

Fonte: Autoria própria. (2020).

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o desenrolar de todas as etapas de projeto pode-se analisar que para um projeto final atinja êxito em seu objetivo inicial é requerido uma vasta metodologia e etapas que devem e precisam ser necessariamente seguidas à risca, pois cada estágio do projeto vai influir e de certa forma contribuir para o resultado final alcançado. Nesse trabalho podemos observar a aplicação da metodologia de projeto em um desenvolvimento de protótipo, as etapas que se seguiram apresentaram elementos-chave que fizeram com que o produto final alcançado apresentasse um nível de segurança muito melhor, haja vista que todas as checagens iniciais permitiram que possíveis erros já pudessem ser corrigidos em etapas anteriores.

Infelizmente a etapa de construção do protótipo e testagem do mesmo não pode ser concluída haja vista a impossibilidade do uso dos laboratórios de construção mecânica por causa do difícil período atual com o combate à COVID 19. Porém, o projeto acabou se adaptando a situação adversa e apresentou uma proposta de relatório minucioso acerca da fabricação e itens necessários para a obtenção da bancada de fadiga, dessa forma qualquer pessoa que dispusesse dessa passo-a-passo poderia simplesmente reproduzir o projeto da bancada de fadiga em etapas futuras.

A realização desse projeto proporcionou de certa forma um resumo geral do que foi a trajetória durante a graduação. Desde as etapas de teorias e cálculos iniciais com as disciplinas acadêmicas, em seguida a entrada no projeto de extensão Cactus Baja, que possibilitou um mundo de conhecimentos novos, bem como o despertar da curiosidade em relação a esse tema específico de trabalho. Por fim a entrada no setor de pesquisas com o orientador que pode apresentar um ramo de estudos que ainda não tinha adentrado, a metodologia de projeto. Basicamente como dissera anteriormente tudo isso se reuniu nesse projeto.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, Rodrigo Rebello; et al. Fadiga de materiais - uma revisão bibliográfica. In: XII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., 2008, Uberlândia. **Anais eletrônicos ...** Uberlândia: UFU, 2008. Disponível em: <
<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/seg/cd2008/PDF/IC2008-0165.PDF>>. Acesso em: 11 agos. 2019.
- A. E. CORYELL. The Design Process: 12 Steps that turn Ideas Hardware. Machine Design, 9 de Novembro de 1967.
- ALI EXPRESS. **Ebowan Transmissor de pressão**. São Paulo, 2018. Disponível em: <
<https://pt.aliexpress.com/item/32656389610.html>>. Acesso em: 11 Jun. 2020.
- BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 669 p.
- BÓSON TREINAMENTOS. **O que são sensores**. São Paulo, 2019. Disponível em:<
<http://www.bosontreinamentos.com.br/eletronica/curso-de-eletronica/o-que-sao-sensores/>>. Acesso em: 11 agos. 2019.
- BOYER, H. E. *Fatigue testing*. **ASM Internacional**, EUA, v.1, n.1, p. 1-10/1986. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/063f/6856e40a7a85018d1d86337ba9612bef54c9.pdf>>. Acesso em: 11 agos. 2019.
- BRIGGS & STRATTON. **Briggs Engines**. Nova Iorque, 2019. Disponível em:<
<https://www.briggsracing.com/racing-engines/model-19>>. Acesso em: 11 agos. 2019.
- COMUNIDADE HARDWARE. **Sensores piezoelétricos**. São Paulo, 2014. Disponível em: <
<https://www.hardware.com.br/comunidade/sensores-piezoelétricos/984664/>>. Acesso em: 11 agos. 2019.
- FIALHO, Arivelto Bustamante. **Automação Pneumática: Projetos, Dimensionamento e Análise de circuitos**. São Paulo: Érica, 2003. 328 p.
- FLATLAND, RYAN; et al. **SAE BAJA Dynamic loading – Final project report**. 2015. 244 p. Relatório de projeto (categoria baja) – University of Pretoria, África do Sul, 2018. Disponível em:<

<https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1312&context=mesp>>. Acesso em: 11 agos. 2019.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. São Paulo (tradução): Pearson Prentice Hall, 2010. 659 p.

LIMA, Alex Gutierrez; et al. Fadiga em componentes mecânicos: estudo para redução de perdas econômicas e de vidas. In: XV SIMPÓSIO DE EXCELENCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 14., 2018, Resende. **Anais eletrônicos...** Resende, 2018. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos18/12326138.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

MASTER, Tecnologia Industrial. **Guia completo do cilindro pneumático**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://www.mtibrasil.com.br/guia-do-cilindro-pneumatico.php>>. Acesso em: 11 Jun. 2020.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **O que é um sensor piezoelétrico**. São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/634-o-que-e-um-sensor-piezoelétrico/>>. Acesso em: 11 agos. 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é aquisição de dados**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>>. Acesso em: 11 agos. 2019.

NBR – ABNT, “NBR 10126: Cotagem em desenho Técnico” ABNT., vol. 01, no. 1987, pp. 1-13, 1987.

NBR – ABNT, “NBR 10582: Apresentação da folha para desenho técnico” ABNT., vol. 01, no. 1988, pp. 1-4, 1988.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. Porto Alegre (tradução): Bookman, 2013. 1055p.

PÊCEGO, André Lemos. **Análise fractográfica e metalográfica de uma região de fratura**. 2015. 44p. TCC (Graduação em Engenharia mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/25620/25620.PDF>>. Acesso em: 11 agos. 2019.

RUBBER PLASTIC. **Tubo de nylon PA12 Preto**. Cajamar, 2014. Disponível em: <<https://rubberplastic.com.br/linha-pneumatica/tubo-de-nylon-pa12-preto.html>>. Acesso em: 11 Jun. 2020.

SOCIEDADE DE ENGENHEIROS AUTOMOTIVOS DO BRASIL - **RATBSB: Regulamento administrativo e técnico baja SAE Brasil**. São José dos Campos, p.137. 2018

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE International's Collegiate Design Series (CDS). EUA, 2018. Disponível em: <<https://www.sae.org/attend/student-events>>. Acesso em: 01 agos. 2019.

SPADA, Alexandre. **Matriz de decisão: A ferramenta ideal para decisões rápidas**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<https://blog.sforweb.com.br/matriz-de-decisao-a-ferramenta-ideal-para-decisoes-rapidas/>>. Acesso em: 11 Jun. 2020.

WURTH. **Eletrodo E6013**. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://static.wurth.com.br/catalog/PDF/Info/10.01.0020_Eletrodo-E6013.pdf>. Acesso em: 11 Jun. 2020.

YAN, Lawrence Tack Wen. Análise estrutural utilizando o método de elementos finitos de componentes do veículo Baja SAE submetidos a esforços de fadiga. **Revista Poli USP**, São Paulo, v.1, n.1, p. 1-10/ Out-2011. Disponível em:<http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Artigos/Art_TCC_035_2011.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2019.

YANGUI. **YG402 – Filtro Regulador E Lubrificador de 1/2"**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em:< <https://yangui.com.br/Produtos/yg402-filtro-regulador-e-lubrificador-de-1-2/>>. Acesso em: 11 Jun. 2020.

