



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CAMPUS CARAÚBAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Anderson Mateus Matozo de Melo

Análise estrutural em geometrias de um protótipo Baja via elementos
finitos

CARAÚBAS – RN
2021

Anderson Mateus Matozo de Melo

Análise estrutural em geometrias de um protótipo Baja via elementos finitos

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido (UFERSA),
Campus Caraúbas, como parte dos
requisitos para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jackson de Brito
Simões - UFERSA.

Caraúbas – RN

2021

M Matozo de Melo, Anderson Mateus.
528 a Análise estrutural em geometrias do protótipo
 Baja SEVERO 2.0 empregando simulação computacional
 / Anderson Mateus Matozo de Melo. - 2021.
 50 f. : il.

 Orientador: Jackson Brito de Simões.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de --Selecione um
Curso ou Programa--, 2021.

 1. Cálculo estrutural. 2. MEF. 3. ANSYS®. 4.
CAE. 5. Geometrias Bajas. I. Brito de Simões,
Jackson , orient. II. Título.

Anderson Mateus Matozo de Melo

Análise estrutural em geometrias de um protótipo Baja via elementos finitos

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido (UFERSA),
Campus Caraúbas, como parte dos
requisitos para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 02/06/2021

BANCA EXAMINADORA:

JACKSON DE BRITO Assinado de forma digital por
SIMOES:0361714840 JACKSON DE BRITO
SIMOES:03617148409
9 Dados: 2021.06.02 15:09:21 -03'00'

Prof. Dr Jackson de Brito Simões (UFERSA)
Presidente

DIEGO DAVID SILVA Assinado de forma digital por
DINIZ:07397414460 DIEGO DAVID SILVA
DINIZ:07397414460
Dados: 2021.06.01 14:47:19
-03'00'

Prof: Dr Diego David Silva Diniz (UFERSA)
Membro Examinador

VICTOR DEANDRADE Assinado de forma digital por
DANTAS:01662290403 VICTOR DEANDRADE
DANTAS:01662290403
Dados: 2021.06.02 12:57:50 -03'00'

Prof: Me Victor de Andrade Dantas (UFERSA)
Membro Examinador

Caraúbas- RN

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir alcançar mais essa meta em minha vida.

Em segundo agradeço a todos meus familiares que estiveram comigo em toda essa caminhada, em especial a minha mãe (Maria da Conceição Bezerra Matozo) e meu pai (Adonias Francisco de Melo), pois nunca me deixaram desanimar deste sonho e garantiram todo suporte. Também quero dedicar este título a minha avó Luzia Melo (in memoriam) tenho certeza que estar muito orgulhosa.

Agradeço a todos meus amigos, em especial Jorge Cruz e Alison Breno por sempre me apoiar e ajudar nos momentos mais delicados enfrentados e a minha namorada Suzanne Vieira pelo companheirismo e conselhos dados. Por fim quero agradecer aos integrantes da equipe Caraubaja por toda a amizade e pelos conhecimentos compartilhados e aos professores Jackson Simões de Brito e Diego David pela paciência e por toda ajuda.

“No meio de toda dificuldade encontra-se a oportunidade” (Albert Einstein)

RESUMO

O cálculo estrutural é de suma importância para garantir confiabilidade no projeto e fabricação, além de otimizar as estruturas como reduzindo massa e aumentando resistência mecânica, a melhora nesses parâmetros influencia diretamente na dinâmica do protótipo. O presente trabalho teve por finalidade mostrar as etapas de validação das estruturas usadas na montagem do protótipo SEVERO 2.0 da equipe Caraubaja SAE. O método de elementos finitos (MEF) foi usado nas simulações numéricas por permitir a discretização do modelo e consequentemente facilitar a obtenção de resultados. O software ANSYS® Workbench 2020 da ESSS, foi usado para a realização de todas as simulações computacionais (CAE) afim de manter um padrão, além de se tratar de programa conceituado neste segmento. Como é sabido a malha é uma das etapas mais importantes na simulação, desta forma foi feito um estudo de convergência no intuito de refina-la a uma configuração ideal para a geração de resultados mais fidedignos possível. Para objeto de estudo foi escolhido as seguintes geometrias: Chassi, Bandeja e discos de freio. Para cada estrutura, realizou-se uma simulação específica, rigidez torcional no chassi, fadiga na bandeja e Von Mises no disco de freio. Os resultados obtidos para tais análises foram satisfatórios, uma vez que, para a constante de rigidez torcional o valor obtido estar de acordo com a literatura, a tensão de Von Mises foi 1/3 menor que a de escoamento do material e a vida útil encontrada para a bandeja por meio do ensaio de fadiga é considerado infinita (10^6 ciclos).

Palavras chaves: Cálculo estrutural, MEF, ANSYS®, CAE, Geometrias Bajas

Abstract

Structural calculation is of paramount importance to ensure reliability in design and manufacture, in addition to optimizing structures such as reducing mass and increasing mechanical resistance, the improvement in these parameters directly influences the dynamics of the prototype. The purpose of this work was to show the stages of validation of the structures used in the assembly of the SEVERO 2.0 prototype of the Caraubaja SAE team. The finite element method (MEF) was used in numerical simulations because it allows the discretization of the model and consequently facilitates the obtaining of results. The software ANSYS® Workbench 2020 da ESSS was used to perform all computer simulations (CAE) in order to maintain a standard, in addition to being a reputable program in this segment. As it is known, the mesh is one of the most important stages in the simulation, so a convergence study was made in order to refine it to an ideal configuration for generating the most reliable results possible. For the object of study, the following geometries were chosen: Chassis, Tray and brake disc. For each structure, a specific simulation was performed, torsional rigidity in the chassis, fatigue in the tray and Von Mises in the brake disc. The results obtained for such analyzes were satisfactory, since, for the torsional stiffness constant, the value obtained is in accordance with the literature, the Von Mises stress was 1/3 less than that of the flow of the material and the useful life found for the tray through the fatigue test it is considered infinite (10^6 cycles).

Keywords: Structural calculation, MEF, ANSYS®, CAE, Bajas Geometry.

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	OBJETIVO GERAL.....	15
1.4	OBJETIVO ESPECIFICO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	17
2.2	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO.....	17
2.3	CRITÉRIO DE FALHA EM MATERIAIS DÚCTEIS	18
2.3.1	Teoria da tensão máxima de cisalhamento.....	18
2.3.2	Teoria da energia de distorção	19
2.4	ELEMENTOS FINITOS.....	19
2.4.1	ANSYS® 2020.....	20
2.5	COMPETIÇÃO BAJA SAE.....	21
2.5.1	Baja SAE Brasil	21
2.6	COMPONENTES ESTRUTURAIS.....	22
2.6.1	Tipos de chassi.....	22
2.6.1.1	Monobloco	23
2.6.1.2	Monocoque	23
2.6.1.3	Spaceframe.....	24
2.6.2	Sistema de frenagem.....	25
2.6.3	Sistema de suspensão	26
2.6.3.1	Suspensão Dependentes	27
2.6.3.2	Suspensão Independentes.....	27
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	OBJETO DE ESTUDO.....	28
3.1.1	Chassi SEVERO 2.0.....	28
3.1.2	Discos de freio.....	29
3.1.3	Bandeja de suspensão inferior.....	29
3.2	ETAPAS DA SIMULAÇÃO.....	30
3.3	MODELAGEM 3D DA GEOMETRIA.....	31
3.4	METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE MALHA NUMÉRICA	32
3.4.1	Estudo de convergência	33
3.5	MODELAGEM NUMÉRICA	34

3.5.1	Condições de Contorno	34
3.5.1.1	Carregamentos e restrições	34
3.6	PÓS PROCESSAMENTO	37
3.6.1	Rigidez torcional	38
3.6.2	Von Mises.....	38
3.6.3	Fadiga	39
3.6.3.1	Método S-N e o critério de Goodman modificado	39
4	RESULTADOS	40
4.1	ESTRUTURAS ANALISADAS	40
4.1.1	Chassi SEVERO 2.0.....	40
4.1.2	Discos de Freios.....	42
4.1.3	Bandejas de suspensão	42
4.2	REFINAMENTO DA MALHA NÃO ESTRUTURADA	42
4.3	ENSAIOS NAS GEOMETRIAS ESTUDADAS	44
5	CONCLUSÃO.....	47
6	PROPOSTA PARA ANÁLISE FUTURAS.....	48
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
8	ANEXOS.....	52

Lista de Figuras

Figura 1: SEVERO 2.0 na competição nacional	14
Figura 2: Escoamento do aço submetido a esforços axiais	19
Figura 3: Competição Nacional BAJA SAE.....	22
Figura 4: Chassi do tipo monobloco.....	23
Figura 5: Chassi monocoque	24
Figura 6: Chassi space frame	25
Figura 7: Suspensão dependentes	27
Figura 8: Tubos primários e secundários do Chassi SEVERO 2.0	28
Figura 9: Suspensão duplo A do protótipo SEVERO 2.0	29
Figura 10: Fluxograma de metodologia das simulações.....	31
Figura 11: Modelo 3D do protótipo SEVERO 2.0.....	32
Figura 12: Metodologia do estudo de convergência	33
Figura 13: Carregamentos e restrições aplicados no chassi.....	35
Figura 14: Teste experimental de rigidez torcional, feito pela FIAT	36
Figura 15: carregamento e restrições na bandeja de suspensão	36
Figura 16: Carregamentos e restrições aplicados no disco de freio	37
Figura 17: Comparativo entre os chassis.....	40
Figura 18: Análise da susceptibilidade dos componentes estruturais dianteiros à um impacto frontal a) SEVERO e b) SEVERO 2.0.....	41
Figura 19: Disco de freio SEVERO x Disco de freio SEVERO 2.0.....	42
Figura 20: Linha de convergência da malha usada	43
Figura 21: Tipo de malha adotado nas simulações estruturais.....	44
Figura 22: Deflexões mínimas e máximas do chassi.....	45
Figura 23: Tensão de von-Mises do disco de freio	45
Figura 24: Vida útil estimada para as bandejas de suspensão inferior dianteira	46

Lista de Tabelas

Tabela 1: Resultados de benchmarking para suspensão	30
Tabela 2: Propriedades mecânicas aços SAE	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Timoshenko (1878-1972), um dos pais da Engenharia Estrutural moderna, descreve em seu livro *História da Resistência dos Materiais* (Timoshenko 1983) um histórico do desenvolvimento teórico sobre o comportamento de estruturas. A Engenharia Estrutural vai encontrar raízes, se bem que de uma forma empírica, nos grandes monumentos, como pirâmides do antigo Egito e nos templos, estradas, pontes e fortificações da Grécia e da Roma antigas.

O início da formalização teórica da Engenharia Estrutural é atribuído à publicação do livro *Duas Ciências*, de Galileu, em 1638, que deu origem a todo o desenvolvimento da ciência desde o século 17 até os dias de hoje (MARTHA, 2010).

A partir da materialidade da simulação em computadores nos anos 50, a engenharia moderna conseguiu estabilidade, uma vez que a mesma permite otimizar e validar projetos sem que ao menos a geometria esteja construída. Os primeiros simuladores computacionais foram feitos para fins militares e era realizados em gigantes e lentos computadores (BALADEZ, 2016), hoje em dia é largamente utilizado nas indústrias e em projetos universitários, inclusive pelas equipes da competição Baja SAE.

O projeto Baja SAE foi criado na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, sob a direção do Dr. John F. Stephens, sendo que a primeira competição ocorreu em 1976. O ano de 1991 marcou o início das atividades da SAE no BRASIL, que, em 1994, lançou o Projeto Baja SAE BRASIL. No ano seguinte, em 1995, era realizado a primeira competição nacional, na pista Guido Caloi, bairro do Ibirapuera, cidade de São Paulo. E posteriormente a competição foi transferida para o Autódromo de Interlagos, onde ficaria até o ano de 2002. A partir de 2003, a competição passou a ser realizada em Piracicaba, interior de São Paulo, no ECPA – Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo. Desde 1997 a SAE BRASIL também apoia a realização de eventos regionais do Baja SAE BRASIL, através de suas Seções Regionais. Desde então dezenas de eventos foram realizados em vários estados do país como Rio Grande do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Bahia.

Atualmente a competição nacional é realizada na FATEC (Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo), cidade de São José dos Campos – SP, na edição de 2019 mais de 70 equipes de todo o Brasil, participaram da competição. Na Figura 01 é ilustrado o protótipo Severo 2.0 da equipe Caraubaja SAE participando da competição nacional.

Figura 1: SEVERO 2.0 na competição nacional



Fonte: CARAUBAJA, 2020

A cada competição, que ocorre anualmente, as três primeiras equipes são responsáveis por representar o Brasil no mundial que é disputado no Estados Unidos. Essa oportunidade, provoca uma enorme motivação aos participantes envolvidos no projeto, e que por meio dos esforços em alcançar tal feito, proporciona experiência.

Este evento está dividido em várias etapas classificatórias, onde além do desempenho do protótipo, também avaliam o relatório de projeto, avaliando a metodologia e conceitos empregados. Por ser uma competição que avalia segurança, durabilidade e desempenho, é fundamental que os componentes mecânicos sejam validados numericamente por meio de softwares específicos. Essas validações já são realidades presentes na indústria automotiva (SAE, 2019).

Assim visando à construção de protótipos competitivos as simulações computacionais são imprescindíveis no estudo das geometrias das estruturas,

desde um simples suporte de freio ao próprio chassi, pois a fratura desses membros pode ocasionar a perda de uma prova da competição e prejudicar a pontuação da equipe.

1.2 JUSTIFICATIVA

A motivação deste trabalho é apresentar uma metodologia para validação numérica de das análises estruturais análises estruturais desenvolvidas pela Equipe Caraubaja SAE. Por se tratar de um veículo fora de estrada, os protótipos Bajas SAE são constantemente submetidos a carregamentos das mais diversas tipas, oriundos do tráfego *off-road*, principalmente os componentes dos subsistemas de suspensão e direção. Por este motivo, ao longo dos anos a Equipe Caraubaja vem gradualmente implementando o uso de análises estrutural em elementos finitos destes componentes, visando garantir a sua integridade durante a competição.

A competição BAJA SAE Brasil, conta com provas que submetem o protótipo a condições extremas como no caso do enduro, que são 4 horas de rally *off-road* em uma pista com vários obstáculos dos mais diversos possíveis, evidenciando a importância de se ter um protótipo muito resistente de modo que a integridade da estrutura seja garantida através do uso de um modelo matemático confiável.

Por fim, cada vez mais o desenvolvimento de novos produtos passa por necessariamente ter uma análise estrutural para que se obtenha sua homologação principalmente em projetos de alta tecnologias.

1.3 OBJETIVO GERAL

Realizar simulação computacional usando o software ANSYS® para ser usado no cálculo estrutural dos componentes do Baja da equipe Caraubaja SAE, intitulado de SEVERO 2.0.

1.4 OBJETIVO ESPECIFICO

- Modelar e analisar ao menos 2 (dois) componentes estruturais do protótipo SEVERO, respeitando todas as regras da competição Baja SAE;
- Fazer estudo de convergência no processo de refinamento de malha, a fim de deixar uma simulação mais fidedigna;
- Identificar pontos de otimizações nas estruturas, como: reduzindo a massa final sem que provoque alteração na resistência mecânica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

O termo estrutural (ou estrutura) implica não só estruturas de engenharia civil como pontes e prédios, mas também naval, aeronáutica, estruturas mecânicas, cascos de navios, corpos de aeronaves, casas de máquinas, bem como componentes mecânicos como pistões, peças de máquinas e ferramentas (AZEVEDO, 2016).

Existem vários tipos de análises estruturais, entre estes os mais comuns são: análise estática, modal, harmônica, dinâmica transiente, etc. (AZEVEDO, 2016). O presente trabalho se restringirá à aplicação do MEF em análise estrutural estática.

A análise estrutural estática calcula os efeitos de condições de carregamento estático na estrutura, ignorando efeitos de inércia e amortecimento, tais como aquelas causadas por cargas que variam em função do tempo. Os tipos de carregamentos que podem ser aplicados em análise estática incluem (AZEVEDO, 2016):

- Forças e pressões aplicadas externamente;
- Forças inerciais estáticas (como gravidade ou velocidade rotacional);
- Imposição de deslocamentos diferentes de zero;

2.2 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

O conceito de otimização de forma geral nada mais é do que tornar algo próximo do ideal, podendo ser tratado como melhoria ou aperfeiçoamento, ou seja, é aplicar uma série de técnicas para solucionar ou melhorar um produto ou processo já existente (SILVA, et al. 2016).

Atualmente sempre se está buscando otimizar, seja o tempo, o dinheiro, a performance física etc. Este desafio também está presente na indústria, já que se deseja otimizar produtos ou processos com o intuito de reduzir tempos de desenvolvimento, melhorar a eficiência e/ou minimizar custos de fabricação (PAREDES, BRYAN 2016).

Trazendo esse conceito para a parte estrutural, Alexandre Pazian (2010) define-a como basicamente a obtenção de uma solução que atenda às necessidades, restrições e carregamentos relativos ao projeto de forma ótima e sem desperdícios, podendo propiciar redução de massas e custo do produto. (PAZIAN, 2010)

A aplicação da otimização estrutural foi iniciada nos anos 60 com a introdução do *ground structure approach* desenvolvido por Dorn, Gomory e Greenberg em 1964. A utilização da otimização estrutural está relacionada diretamente ao início da aplicação dos computadores (VICTORIA et al. 2009).

2.3 CRITÉRIO DE FALHA EM MATERIAIS DÚCTEIS

Os elementos estruturais e os componentes de máquinas são projetados de modo que o material que os compõem, sendo material dúctil, não venha a escoar pela ação dos carregamentos esperados (BUFFONI, 2017).

Grande parte dos projetos de engenharia utiliza-se de um estudo reverso, tomando como princípio a tensão de escoamento do material e com isso ser possível estabelecer o intervalo confiável de trabalho da estrutura sem que haja risco de falha utilizando-se ainda de coeficientes de segurança.

A ductilidade de um material é caracterizada pelo grau de deformação, considerada permanente, ou seja, plástica antes de chegar ao seu momento da sua fratura (ruptura). E após o descarregamento o material não retornará as suas dimensões iniciais ficando com uma deformação permanente.

2.3.1 Teoria da tensão máxima de cisalhamento

Esta teoria se aplica somente a materiais dúcteis, também conhecida como teoria de Tresca ou de Guest (SHIGLEY, 2005).

O caso mais comum de escoamento de um material dúctil, como o aço, é o deslizamento que ocorre ao longo dos planos de contato dos cristais que, aleatoriamente ordenados, formam o próprio material. Esse deslizamento deve-se a tensão de cisalhamento e, se fizermos um corpo de prova com uma superfície altamente polida e a submetemos a um ensaio de tração simples

poderá ser visto como a tensão provoca o escoamento do material como está no esboço da Figura 2 (BUFFONI, 2017).

Figura 2: Escoamento do aço submetido a esforços axiais



Fonte: BUFFONI, 2017

À medida que o corpo de prova (material dúctil) é submetido à tração, linhas de deslizamento (chamadas linhas de Lüder) formam-se a um ângulo de aproximadamente 45° com eixo da tira (SHIGLEY, 2017).

2.3.2 Teoria da energia de distorção

A teoria da energia de distorção (DE) originou-se da observação de que materiais dúcteis tensionados hidrosticamente (tensões principais iguais) exibiam resistência de escoamento bem acima dos valores dados pelo ensaio de tração simples (SHIGLEY, 2017).

2.4 ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em uma aproximação numérica para a resolução de equações diferenciais por integração. Tal método é aplicado, inicialmente, a partir da divisão de um sistema ou conjunto, a ser analisado, em partes discretas menores (discretização do modelo). Na sequência, as equações diferenciais inerentes ao tipo de análise desenvolvida, correspondentes a cada parte discretizada do sistema, conhecido usualmente

como elemento finito, são resolvidas a partir de rotinas numéricas. Dessa forma, tem-se a origem do nome deste método numérico (SILVA et al., 2001).

A análise de elementos finitos desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento do projeto auxiliado por computador (CAD). Os procedimentos MEF são usados no projeto de edifícios, motores elétricos, fuselagens, motores térmicos, navios, etc. Um programa de elementos finitos moderno consiste em um modelador gráfico, um pré-processador, um solucionador de elementos finitos e um pós-processador.

Tradicionalmente, a modelagem geométrica e o MEF são dois processos separados. Devido à complexidade de algumas estruturas / projetos, o desenvolvimento de um modelo de elemento finito de tal estrutura, em alguns casos, pode levar mais tempo do que o tempo de solução real das equações de elemento finito. Duas razões para isso são: (1) o pré-processamento não é um processo totalmente automático que requer um alto nível de interação usuário-computador, e (2) geradores de malha automáticos podem usar algoritmos com baixo desempenho. (VICTORIA et al. 2009).

O software usado para executar o MEF no presente trabalho vai ser o ANSYS®. Programa especializado em simulações computacionais de renome mundial.

2.4.1 ANSYS® 2020

O programa ANSYS® Workbench é um dos vários programas de análises pelo método de elementos finitos existentes no mundo, se enquadra na categoria de *Computer Aided Engineering* (CAE). De maneira geral os programas de CAE permitem (AZEVEDO, 2016):

- A redução do custo e tempo necessário no processo de desenvolvimento do projeto, pois é acelerado pela rapidez de análise.
- A melhoria coerente da peça ou conjunto antes da sua fabricação reduzindo os custos associados ao material, a manufatura e final.
- A redução da probabilidade de falha dos componentes, pois uma eventual falha pode ser percebida antes de sua execução.

Cada sistema computacional acoplado no programa se destina a um determinado tipo de análise. Os diversos tipos de análise que podem ser

procedidos, de modo a simular o comportamento estrutural de um modelo real, mediante a utilização do programa ANSYS®, respaldado pelo MEF, estão listados a seguir: Estrutural, Térmica, Escoamento de Fluidos e Eletromagnética (SILVA et al., 2001).

O software conta com uma biblioteca de mais de 100 tipos diferentes de elementos finitos o que torna o programa capaz de realizar uma vasta gama de simulações numéricas. O programa ANSYS® Workbench mostra os resultados graficamente na tela permitindo identificação visual da geometria e resultados facilitando a interpretação do que está ocorrendo na peça ou conjunto (AZEVEDO, 2016) (SILVA et al., 2001).

2.5 COMPETIÇÃO BAJA SAE

Esta competição desde sua criação tomou grandes proporções, este projeto conta com o apoio de grandes empresas como Petrobrás e Ford. Este evento tem a capacidade de proporcionar um conhecimento, que não se pode conquistar no âmbito da universidade.

O objetivo de cada equipe era projetar e construir um protótipo de Baja (segundo especificações pré-determinadas pela SAE *International*), fazendo com que os alunos tivessem contato com situações da vida profissional de um engenheiro: projeto, construção, montagem, manutenção, controle de qualidade, seleção de materiais, tomada de decisões, administração, marketing e espírito de equipe.

2.5.1 Baja SAE Brasil

O ano de 1991 marcou o início das atividades da SAE no BRASIL, que, em 1994, lançou o Projeto Baja SAE BRASIL. No ano seguinte, em 1995, era realizado a primeira competição nacional, na pista Guido Caloi, bairro do Ibirapuera, cidade de São Paulo. E posteriormente a competição foi transferida para o Autódromo de Interlagos, onde ficaria até o ano de 2002. A partir de 2003, a competição passou a ser realizada em Piracicaba, interior de São Paulo, no ECPA – Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo.

Desde 1997 a SAE BRASIL também apoia a realização de eventos regionais do Baja SAE BRASIL, através de suas Seções Regionais. Desde então dezenas de eventos foram realizados em vários estados do país como Rio Grande do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Bahia. Atualmente a competição nacional é realizada na FATEC (Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo), cidade de São José dos Campos – SP, na edição de 2019 mais de 70 equipes de todo o Brasil, participaram da competição. As três primeiras equipes são responsáveis por representar o Brasil no mundial disputado no Estados Unidos. A Figura 03 ilustra a competição nacional Baja SAE na cidade de São José dos Campos.

Figura 3: Competição Nacional BAJA SAE



Fonte: CARAUBAJA, 2020

2.6 COMPONENTES ESTRUTURAIS

2.6.1 Tipos de chassi

O chassi tem como objetivo principal garantir a segurança do condutor, juntamente ao seu conforto, além de integrar todos os componentes dos subsistemas do veículo, e absorver todos os esforços provenientes destes. Com base nos requisitos de segurança da competição e ergonômicos, foi desenvolvido um chassi de forma a garantir uma boa relação entre a rigidez da estrutura, resistência e massa final.

Existe uma variedade de chassi com as mais diversas características, desde muito simples até complexas. A seguir será abordado alguns tipos,

inclusive o usado nas competições Baja SAE que é conhecido como o Spaceframe.

2.6.1.1 Monobloco

Esse tipo de estrutura é caracterizado pelo fato de que o chassi e carroceria formam uma única unidade básica, dando a forma geral do carro por meio da soldagem de chapas e peças. Até então os tipos apresentados anteriormente dependiam de uma carenagem lateral além do chassi para dar prover segurança aos passageiros (BEZERRA, 2020). Figura 04 representa um exemplo de chassi monobloco.

Figura 4: Chassi do tipo monobloco



Fonte: BLOG IVECO

Atualmente 95% dos veículos produzidos apresentam estrutura do tipo monobloco devido principalmente ao seu baixo custo de produção associado à uma grande adequação aos processos automatizados de fabricação (OLIVEIRA, 2007).

Algumas vantagens inerentes a este tipo de chassi que pode ser citada: eficiente utilização do espaço interno e boa proteção contra impactos graças a alguns membros como colunas laterais, central e traseira (OLIVEIRA, 2007).

2.6.1.2 Monocoque

O chassi do tipo monocoque é uma estrutura de peça única que por si só dá a forma geral do veículo. É fabricado por meio da união de peças menores

prensadas por estampagem com o assoalho, que abrange a maior parte da área estrutural.

Esse tipo de estrutura é bastante eficiente na proteção contra impactos, sendo usados em competições de alto nível como Fórmula 1 e Fórmula Indy”. O resultado é uma estrutura incrivelmente rígida que garante segurança ao piloto em situações extremas, como ilustrado na Figura 05.

Figura 5: Chassi monocoque



Fonte: SCALE AUTOWORKS, 2006

Uma revolução importante nesse tipo de estrutura foi a utilização da fibra de carbono para a produção de chassis em veículos de competição no início dos anos 80. Uma das grandes desvantagens que pode ser citada nesse tipo de chassi é o elevado custo de fabricação.

2.6.1.3 Spaceframe

Um chassi tipo *spaceframe*, inicialmente, foi desenvolvido para competições, como é o caso da BAJA SAE, o mesmo é composto por membros tubulares circulares de pequeno diâmetro e/ou quadrados posicionados em diferentes posições a fim de oferecer uma altíssima rigidez quando submetida a diversos tipos de carregamentos. A Figura 06 é possível ilustrar este tipo de chassi.

Figura 6: Chassi space frame



Fonte: CARAUBAJA, 2020

As estruturas do tipo gaiola oferece grande flexibilidade em termos de fabricação em baixa escala, pois permite a sua construção em uma variedade de materiais tais como o aço, alumínio, compósitos entre outros materiais. Contudo quando se trata de produção em larga escala o spaceframe torna-se inviável.

2.6.2 Sistema de frenagem

INGRAM (1983) relata que no início dos anos 60 existia veículos com todos os freios a disco, os chamados BMMOS14 (um ônibus simples urbano) e o CM5 (um ônibus rodoviário) dos quais foram produzidos conjuntamente 400 unidades.

A partir dos anos 80, os programas de fabricação de veículos foram seriamente considerados, resultados em uma adoção de freios a disco em larga escala. IOMBRILLER (2002) Estima que atualmente 50% dos veículos da Europa utilizam freios a disco.

Os freios a disco, de um modo geral tem apresentado algumas vantagens no desempenho em veículos (IOMBRILLER, 2002):

- Facilidade de operação devido às menores variações na frenagem com as mudanças de velocidade.

- Mantém sua eficiência de frenagem até em altas temperaturas porque a redução da força de frenagem após aplicações do freio é pequena;

Curva de torque plana, com uma pequena mudança da força de frenagem durante a aplicação dos freios.

2.6.3 Sistema de suspensão

As suspensões veiculares surgiram na aplicação em carruagem real puxada por burros no século VIII, na tentativa de ser o elemento mecânico capaz de absorver energia vertical provenientes das irregularidades da pista, mantendo, assim, a maximização do contato pneu-solo (DINIZ, 2014).

DINIZ 2014, ressalta que o conceito de um bom projeto de suspensão é aquele que apresenta boa capacidade de isolar vibração e uma maximização no tempo de contato pneu-solo, o que garante boa dirigibilidade, estabilidade e segurança ao veículo, porém para o ramo da dinâmica veicular é justamente o oposto, visto que um veículo com bom isolamento de vibração e conforto é aquele que tem uma suspensão mais macia, apropriado para filtrar baixas frequências (na maioria dos veículos, a frequência natural do chassi é relativamente baixa), o que minimiza os deslocamentos relativos do chassi com a estrada.

De acordo com Barbieri (2009), o sistema de suspensão possui algumas funções primárias, que são:

- Fornecer elasticidade vertical para que as rodas possam acompanhar as irregularidades da pista, isolando o chassi destas irregularidades.
- Manter as rodas com altitudes adequadas
- Resistir à rolagem do chassi;
- Manter o contato dos pneus com a pista com a mínima variação das forças normais.

Existem dois tipos de suspensões, que são: as suspensões dependentes e independentes.

2.6.3.1 Suspensão Dependentes

Neste sistema, a oscilação da roda de um lado do veículo é condicionada ao movimento da outra roda do mesmo eixo. Desse modo, quando uma roda de um dos lados do veículo passa por um desnível, a outra sentirá esse efeito, e isso deteriorará a dinâmica do veículo, uma vez que esta roda tenderá a ter uma grande variação de forças de contato pneu-solo, podendo, em algumas situações, até perdê-lo totalmente (DINIZ, 2014).

Este tipo de suspensão rígida ou dependente é encontrado em praticamente todos os carros populares, por isso é muito comum ser visto no cotidiano, como exemplo pode ser visto na Figura 07.

Figura 7: Suspensão dependentes



Fonte: QUATRO RODAS, 2016

2.6.3.2 Suspensão Independentes

Este tipo de suspensão permite que cada roda se movimente verticalmente sem influenciar a outra roda oposta. A maioria dos carros de passeios e caminhões leves utilizam suspensão independente nas rodas dianteiras, já os veículos de competição usam, na maioria das vezes, este tipo de suspensão nas rodas dianteiras (principalmente) e traseiras. Isto, porque a vantagem é que não ocupa tanto espaço para a sua utilização, dando espaço para a colocação do motor, e também porque possuem melhores resistências às vibrações (DINIZ, 2014).

3 METODOLOGIA

3.1 OBJETO DE ESTUDO

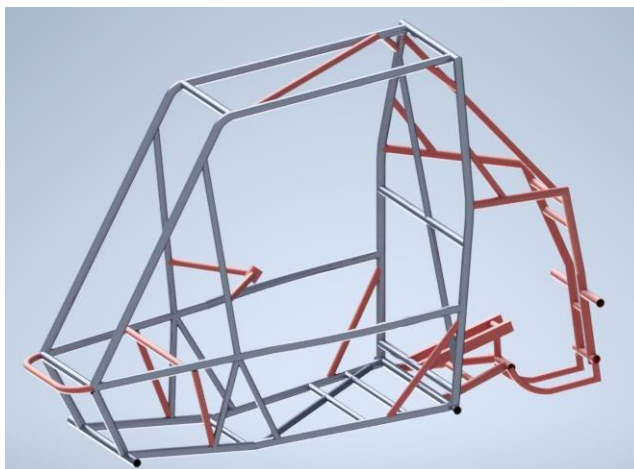
Neste trabalho foi escolhido algumas estruturas específicas como objeto de estudo para a validação da metodologia usadas nos projetos estruturais da equipe Caraubaja SAE, mais precisamente no protótipo SEVERO 2.0. As geometrias usadas foram: Chassi, bandejas de suspensão e discos de freio.

3.1.1 Chassi SEVERO 2.0

A estrutura tubular do protótipo severo é subdividida em tubos primários (cinza) e secundários (vermelho) como visto na Figura 08, todos os tubos são de aço SAE 1020. O regulamento da competição sugere utilizar tubos de 21,4 mm de diâmetro com 3 mm de espessura, entretanto a equipe CARAUBAJA utiliza tubos de 31,8 mm com espessura de 1,6 mm, pois essa modificação implicará em uma massa final menor e uma resistência equivalente ao do regulamento.

Para comprovar a igualdade dessas resistências a equipe CARAUBAJA realiza um cálculo de equivalência entre os dois modelos, encontrando o *Bending Stiffness* e o *Bending Strenght* de ambos, e constatou-se que os tubos utilizados no chassi do SEVERO estavam dentro das normas impostas pela SAE.

Figura 8: Tubos primários e secundários do Chassi SEVERO 2.0



Fonte: Autoria própria

3.1.2 Discos de freio

O método usado para possíveis otimizações nos discos de freios, foi principalmente problemas enfrentados pela equipe nas competições e por meio de *benchmarking* entre as equipes e então se viu a possibilidade de melhoramento na geometria. A geometria anterior apresentava um formato que dificultava o desempenho dos freios.

Outro fator que pesou muito na opção de alterar este sólido foi a redução de massa, pois como é sabido quando o carro estiver em altas rotações será mais difícil parar esta rotação, uma vez que o mesmo apresentará uma grande massa girante.

3.1.3 Bandeja de suspensão inferior

A bandejas de suspensão utilizada pela equipe compõem importante componente de uma suspensão independente, mais especificamente do tipo duplo A ou dupla bandeja como visto na Figura 9.

Figura 9: Suspensão duplo A do protótipo SEVERO 2.0



Fonte: CARAUBAJA, 2020

O motivo da escolha, se deu através de estudo de *benchmarking* (tabela 1) realizado com as 5 primeiras equipes classificadas nas etapas Baja SAE Regional Nordeste, Nacional e Mundial, entre 2014 e 2018.

Tabela 1: Resultados de *benchmarking* para suspensão

Etapa Baja SAE	Duplo A	Macpherson	Semi- trailing arm
Regional	27	1	0
Nacional	31	0	0
Mundial	28	1	0
TOTAL	86	2	0

Fonte: CARAUBAJA, 2020

3.2 ETAPAS DA SIMULAÇÃO

A metodologia utilizada nas simulações, seguirá o fluxograma mostrado na Figura 10. Primeiro se faz o entendimento de qual problema enfrentado para que seja possível traçar simulações no intuito de solucioná-los. Em seguida é realizado a modelagem 3D da geometria mais fidedigna possível, dentro deste tópico estar a seleção do material: para todas as geometrias foi utilizado o aço SAE 1020, por ser um material dúctil, boa soldabilidade e apresentar um ótimo custo benefício. Segundo Guessser (2003), o material escolhido para a fabricação do disco de freio deve apresentar importantes características tais como:

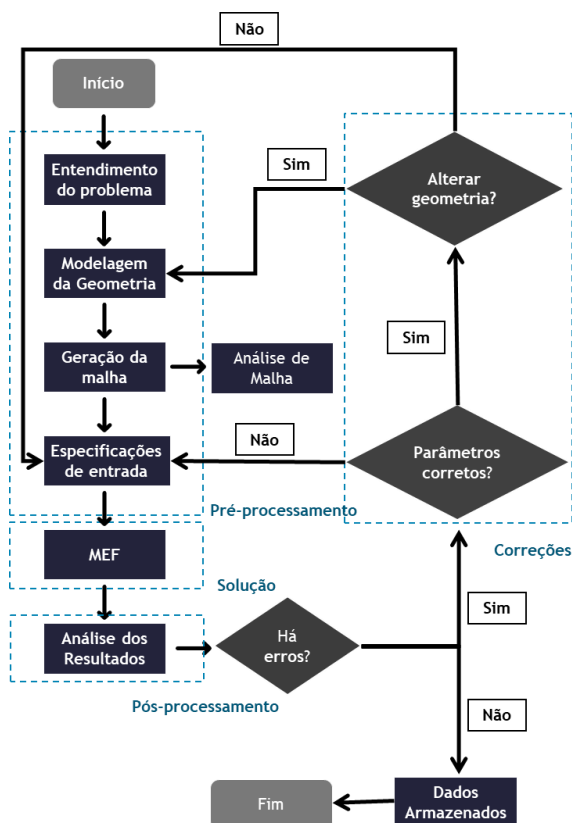
- Fadiga térmica - Cada ciclo de frenagem impõem um ciclo térmico variando, cujas temperaturas depende do material;
- Resistência mecânica e resistência fadiga - cada ciclo de frenagem impõe um ciclo de tensões ao disco de freio, de modo que é importante a resistência a fadiga do material do disco;
- Rugosidade superficial – grande concentração de carbono;
- Resistência ao desgaste – esta propriedade é função da dureza do material.

Feito isso, inicia-se um tópico de suma importância a geração da malha, sabendo disso, foi feito um estudo de convergência de refinamento de malha no intuito de garantir uma maior precisão nos resultados obtidos.

As especificações de entrada são as condições de contorno, onde estar reunido principalmente os carregamentos e restrições aplicados nas geometrias. Com isso finaliza o pré processamento, e inicia-se a fase de solução essas

interações são por meio do método de elementos finitos (MEF) e pôr fim a última etapa conhecida como: pós processamento. Nesta etapa os resultados são gerados, para que possa ser feito uma análise dos mesmos, se houver erros é necessário voltar para a fase de pré processamento e estudar o possível problema, seja na geometria, malha ou condições de contorno.

Figura 10: Fluxograma de metodologia das simulações



Fonte: CARAUBAJA, 2020

3.3 MODELAGEM 3D DA GEOMETRIA

De acordo com Dassault Systèmes Solidworks Corporation (2010), a intenção do projeto deve determinar como o modelo será modelado e, eventualmente, alterado. A relação entre as *features* e a ordem em que foram aplicadas vão auxiliar na definição desta intenção de projeto.

As formas básicas de um modelo 3D, em geral, são originadas de um contorno 2D. A escolha do perfil será essencial para facilitar a modelagem da peça e, eventualmente, tornar mais simples qualquer alteração posterior necessária. A Figura 11 é possível ver a modelo 3D do protótipo SEVERO 2.0.

Figura 11: Modelo 3D do protótipo SEVERO 2.0



Fonte: CARAUBAJA, 2020

3.4 METODOLOGIA PARA GERAÇÃO DE MALHA NUMÉRICA

Segundo Silva et al. (2001), deve-se realizar a discretização do domínio de um problema, dividindo-o em pequenas regiões para que a descrição do comportamento de todas as variáveis envolvidas obedecendo as condições de contorno do problema seja facilitada, bem como a representação da geometria e do comportamento de deformação do material. Assim, a partir dos valores nodais das variáveis, o comportamento de cada elemento é definido e consequentemente o domínio como um todo é descrito. Segundo Souza (2003), as subdivisões do domínio, ou elementos finitos, são conectadas por meio de pontos, formando uma malha.

Souza (2003) afirma que para descrever o comportamento da estrutura em um problema, além do tamanho e do número de nós de um elemento, os graus de liberdade descrevem os movimentos possíveis, um elemento sólido pode ter seis graus de liberdade, com movimentos em todos sentidos de translação e rotação, porém o mesmo elemento com o mesmo número de nós pode ser utilizado com um número menor de graus de liberdade se esta situação melhor se adequar à dimensão e condição do problema.

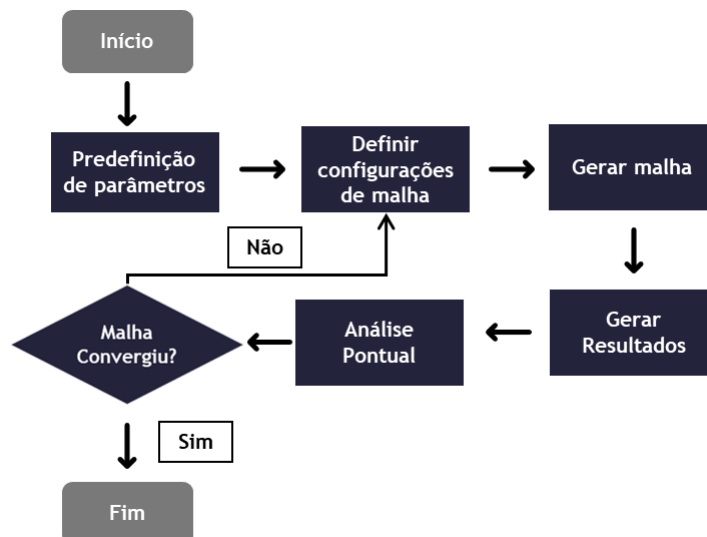
3.4.1 Estudo de convergência

A má escolha de uma malha, pode comprometer totalmente o resultado final de uma simulação computacional. Para se obter uma malha ideal ao projeto é necessário um processo de refinamento que pode ser definido a partir de um estudo de convergência, onde conforme o número de elementos aumenta e o tamanho dos mesmos diminui a solução obtida se aproxima do resultado exato do problema.

Então, é razoável pensar que quanto menor a quantidade de nós no modelo melhor, pois o tempo de espera do usuário para que se tenham os resultados será menor o que implica em um menor custo de simulação. Entretanto, quando há grande quantidade de nós a aproximação entre resultados apresentados dos valores obtidos pelo método analítico será maior.

Deste modo seguindo a referência de Quresh (2008), foi realizado um estudo de convergência para se chegar a uma melhor configuração de malha. E então minimizar os erros nos resultados. Na Figura 12 ilustra a metodologia usada no estudo de convergência.

Figura 12: Metodologia do estudo de convergência



Fonte: CARAUBAJA, 2020

Inicialmente foi definido o parâmetro macro: uma malha não estruturada, predefinido este, estabeleceu-se as configurações internas, optou-se em alterar o *element size* até se atingir a convergência da malha.

3.5 MODELAGEM NUMÉRICA

3.5.1 Condições de Contorno

Na análise estrutural, as condições de contorno são os carregamentos, as restrições, cargas de corpos, tipos de contatos, etc. Ao se definir uma peça ou conjunto de peças montadas para análise, existem várias considerações e procedimentos que devem ser preparatórias para análise, denominadas condições de contorno (AZEVEDO, 2016).

Estas condições de contorno são fatores que influenciam o comportamento dos modelos de análise, alterando os resultados e devem ser atribuídos pelo usuário do software (AZEVEDO, 2016).

3.5.1.1 Carregamentos e restrições

Os carregamentos são os esforços aplicados em determinada superfície de uma geometria, esses esforços podem ocasionar variáveis de suma importância para análise de resultados nas simulações.

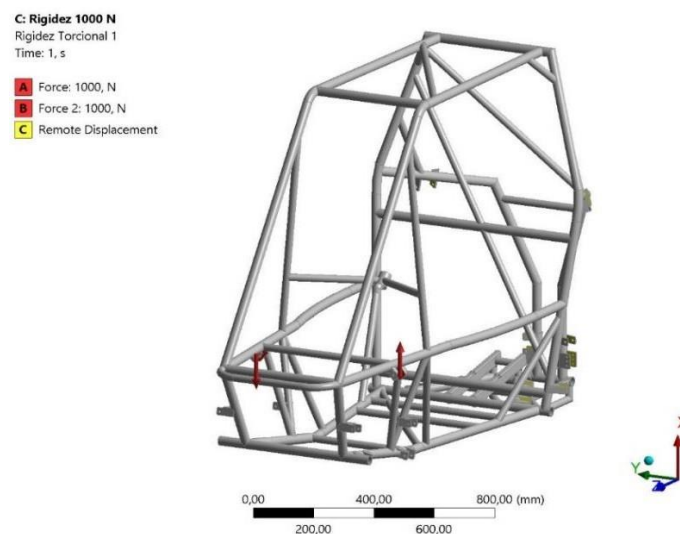
Segundo Chandrupatla e Belegundu (2014), os carregamentos atuantes sobre um corpo podem ocorrer como uma força de corpo, uma força de superfície ou uma carga pontual. O primeiro tipo atua de forma distribuída no volume de um corpo, como por exemplo o peso do próprio corpo devido à gravidade. A carga de superfície atua também de forma distribuída, porém, em parte da área de um corpo, como ocorre quando é originada uma força devido ao atrito do corpo com alguma superfície. A última forma é representada por forças externas atuando de forma concentrada sobre o sólido.

As restrições servem como limitadores da geometria, esta variável quem define se o corpo sólido estará livre no espaço ou com alguma fixação, seja para rotação ou translação de movimento.

Dentro do software ANSYS® existe uma diversidade de restrições como: apoio fixo, deslocamento, deslocamento remoto, apoio apenas para compressão, apoio cilíndrico e etc. Nas simulações deste presente trabalho irá ser usado o deslocamento remoto nos olhais de fixação das geometrias.

A Figura 13 representa as condições de contorno para uma simulação de rigidez torcional do chassi. Neste ensaio, foi aplicado duas forças simulando o esforço que o amortecedor dianteiro exerce no chassi, haja vista que a rigidez torcional é uma constante, então independe da força aplicada, desde que seja igual magnitude e em sentidos opostos como mostrado pelas setas vermelhas. Em amarelo estar apresentado o *remote displacement* nos olhais da suspensão a fim de impedir movimentos translacionais e rotação na traseira do protótipo.

Figura 13: Carregamentos e restrições aplicados no chassi



Fonte: Autoria própria

Um exemplo de ensaio de rigidez torcional de uma montadora automobilística é mostrado na Figura 14. Esse ensaio é realizado de acordo com a norma da própria montadora, a FIAT. Forças são aplicadas sobre as torres dos amortecedores dianteiros para gerar um binário. Sobre as fixações da suspensão traseira são aplicadas restrições de deslocamentos e de rotação em torno de todos os eixos (CASTRO, 2008).

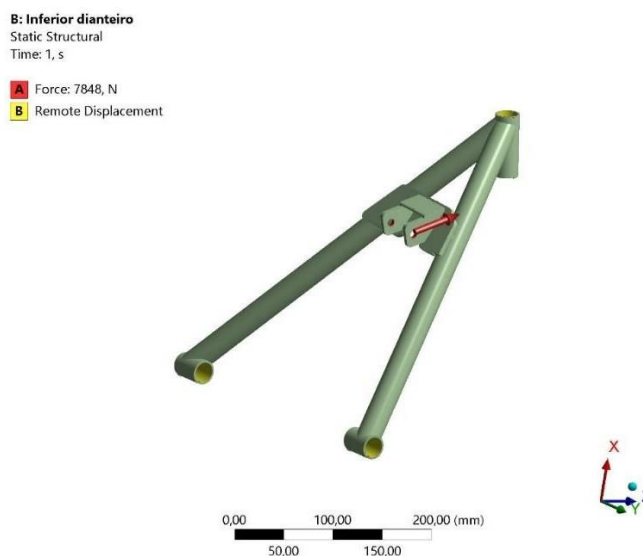
Figura 14: Teste experimental de rigidez torcional, feito pela FIAT



Fonte: CASTRO, 2008

A Figura 15 representa o esforço do amortecedor nos olhais da bandeja dianteira de suspensão, em vermelho a força e em amarelo os pontos de deslocamento remoto.

Figura 15: carregamento e restrições na bandeja de suspensão



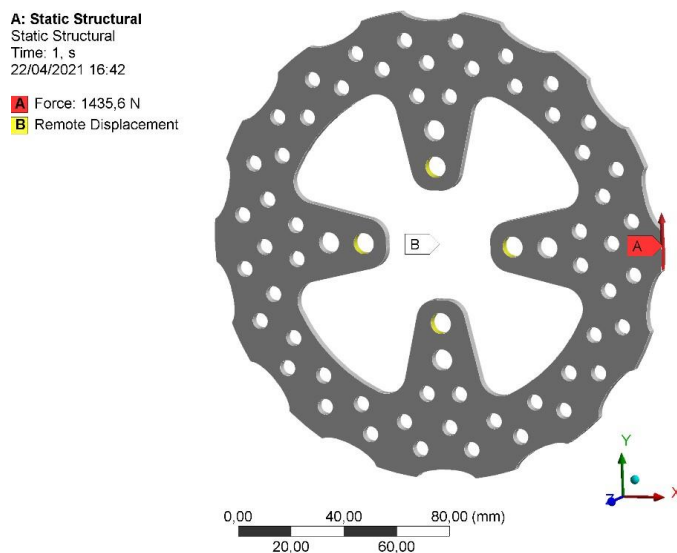
Fonte: Autoria própria

A magnitude de 7848 N foi obtida através de uma suposição feita pela equipe, no qual considerou-se uma situação crítica em que toda a massa do carro recai sobre uma única roda, traduzindo a consideração para matemática,

tem-se a fórmula $F = 4mg$. Onde a massa do protótipo (m) = 200Kg e a gravidade (g)= 9,81 m/s². Uma vez que a bandeja resista a este esforço, é bem provável que em quaisquer outras situações será perfeitamente suportado pela mesma.

Nas condições de contorno aplicado no disco de freio, foi adotado mais uma vez uma ocasião crítica. Em que se considerou: o protótipo estático em um solo asfáltico (possui maior coeficiente de atrito) sofrendo uma força externa. Então para que o veículo se mantenha inerte é necessário que a força de frenagem seja equivalente ao somatório das forças atuantes. Na Figura 16 é ilustrado os pontos de fixação e a força tangencial de frenagem.

Figura 16: Carregamentos e restrições aplicados no disco de freio



Fonte: Autoria própria

Durante a competição BAJA SAE têm uma prova específica para medir a eficácia do sistema de freios, o objetivo da prova é analisar se o carro quando em velocidade máxima ao ser acionado o freio implica no travamento das 4 rodas em um espaço delimitado pelos organizadores.

3.6 PÓS PROCESSAMENTO

Nesta etapa é onde se estuda as variáveis que se quer obter, para este trabalho foi encontrado a rigidez torcional do chassi, um ensaio de fadiga para encontrar vida útil das bandejas e pôr fim a tensão Von Mises dos discos de freio.

3.6.1 Rigidez torcional

É importante conhecer a rigidez torcional do chassi, pois a mesma estar diretamente ligada a dinâmica veicular e a resistência da estrutura. Quanto mais rígido o chassi menos deformará, porém a alta rigidez irá atrapalhar a tanto a dirigibilidade quanto o comportamento vibracional do veículo são afetados pela rigidez do chassi.

Muitos problemas podem ser ocasionados pela falta de rigidez do chassi, tais como (SAMPÒ, 2011):

- Dificuldade no controle da distribuição de carga lateral;
- Deslocamentos desnecessários no chassi na conexão com suspensão, assim não se garante o desejado controle de movimento dos pneus;
- Vibrações podem ser ocasionadas;
- De forma geral, o veículo torna-se imprevisível e de difícil ajuste;
- Veículo mais suscetível ao fenômeno da fadiga;
- Falta de dirigibilidade.

3.6.2 Von Mises

Neste trabalho será empregado o critério de Von Mises na simulação dos freios à disco do protótipo SEVERO 2.0. Este critério permitirá comparar à tensão obtidas no ANSYS® com o limite de escoamento do material escolhido, que no caso foi o Aço SAE 1020 e assim é possível prever se o sólido irá suportar os esforços. Segundo Cury 2019, para o escoamento em materiais dúcteis, a teoria de Von Mises se relaciona melhor com os dados experimentais e desse modo é geralmente mais utilizada.

Este método será fundamental para a validação dos freios à disco que são estruturas sempre exposto a tensões, provenientes de forças de frenagem recorrentes incontáveis vezes ao longo da competição. Logo com o método Von Mises, uma geometria resistente que não seja super dimensionada será perfeitamente possível ser criada.

3.6.3 Fadiga

3.6.3.1 Método S-N e o critério de Goodman modificado

Foi utilizado o método S-N para representar a fadiga do material por meio de diagrama, plotado com a variação da tensão versus o número de ciclos. É denominado de alto ciclo, devido a grande quantidade de ciclos para a ocorrência da falha por fadiga. Os ensaios para determinação do diagrama S-N são feitos em corpos de-prova ou em componentes da própria estrutura, conduzidos pela norma (ASTM E-466, 96), com carregamento totalmente reverso (CASTRO, 2007).

O critério utilizado na simulação de fadiga das bandejas foi o de Goodman modificado, apesar de ser um dos mais antigos métodos até hoje, é muito bem aceito pelos projetistas pela sua facilidade de construção e análise, além de ser mais conservadora do que o critério de Gerber (LIMA, 2019).

4 RESULTADOS

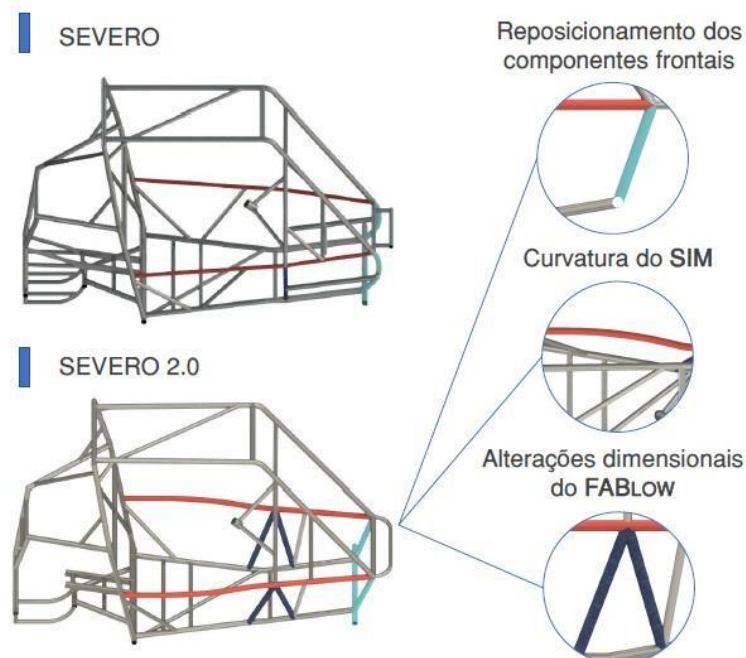
4.1 ESTRUTURAS ANALISADAS

4.1.1 Chassi SEVERO 2.0

O chassi SEVERO 2.0 contou com algumas otimizações em relação ao chassi do SEVERO, otimizações essas que foram implementadas devido alguns gargalos enfrentados pela equipe na fabricação, montagem de outros subsistemas e na própria competição disputada pela equipe.

As premissas adotadas pela equipe para o projeto do chassi do SEVERO 2.0 foi aliar resistência a menor massa final, menor quantidades de erros de fabricação e por fim sem encontrar a melhor forma de se aliar aos demais subsistemas (suspensão, transmissão, freio e etc.), pois todos são acoplados no chassi. Na Figura 17 é possível ver um comparativo entre o chassi SEVERO e o SEVERO 2.0.

Figura 17: Comparativo entre os chassis



Fonte: Autoria própria

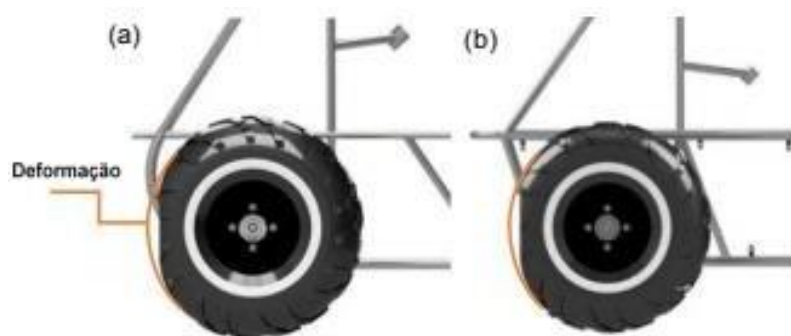
Ao todo foram três alterações realizadas como visto na Figura 17: implementação da curva nos tubos SIM (Vermelho), frontal do chassi (Azul claro) e modificação no FAB LOW (azul escuro).

A curvatura do SIM foi implementada por dois motivos: proporcionar um maior habitáculo ao piloto e permitir que o FAB LOW esteja no mesmo plano do FBM LOW, facilitando assim a montagem das bandejas de suspensão, no SEVERO era preciso posicionar um tubo entre ambos os tubos para só então ser soldados os olhais das bandejas dianteiras.

A alteração no FAB LOW teve o intuito de aumentar a resistência estrutural, isso porque foi aumentada a rigidez torcional do chassi, principalmente causado pelo esforço do amortecedor dianteiro acoplado no SIM.

O reposicionamento dos componentes frontais tem por objetivo permitir que o protótipo tenha mais facilidade em transpor os obstáculos oriundos da competição BAJA SAE. No SEVERO como é visto na Figura 18-a) esses tubos são dobrados e ficam à frente dos pneus, isso implica que o primeiro impacto no obstáculo será diretamente no tubo. Ao contrário do que acontece no SEVERO 2.0, os tubos ficam em um plano atrás dos pneus.

Figura 18: Análise da susceptibilidade dos componentes estruturais dianteiros à um impacto frontal a) SEVERO e b) SEVERO 2.0



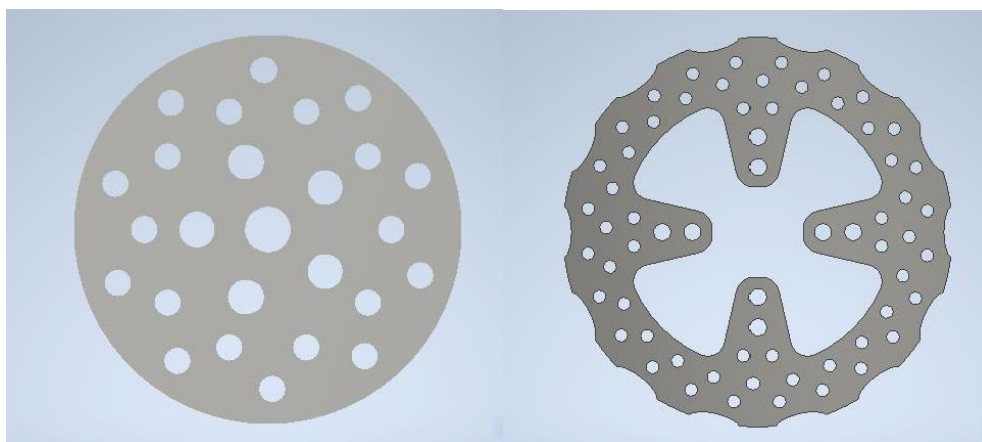
Fonte: Autoria própria

4.1.2 Discos de Freios

A Figura 19 mostra a nítida evolução do disco de freio usado no Severo

2.0 com relação aos protótipos anteriores. Vale salientar que o modelo otimizável apresenta a mesma resistência do anterior, e com outras vantagens como: menor massa final, geometria mais arrojada que permite uma melhor limpeza das pastilhas e furação que possibilita uma maior ventilação do disco.

Figura 19: Disco de freio CT-17 x Disco de freio SEVERO 2.0



Fonte: Autoria própria

4.1.3 Bandejas de suspensão

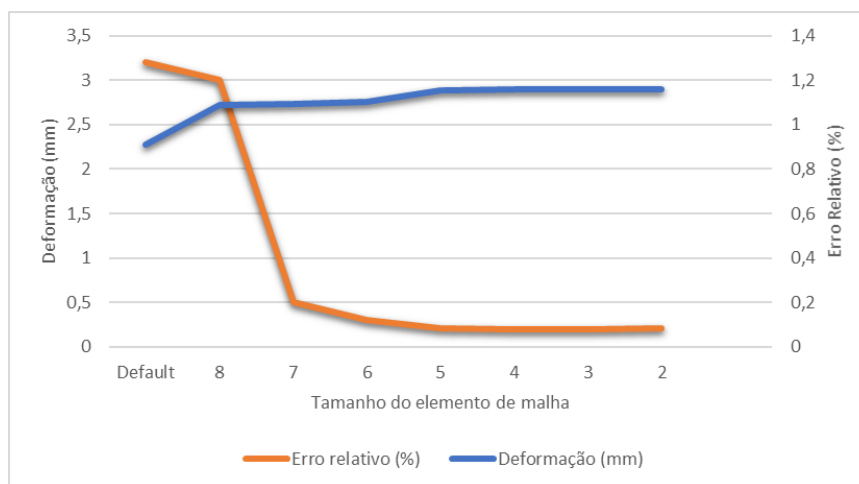
Uma modificação muito importante nas bandejas de suspensão foi a alteração do diâmetro e espessura dos tubos, passando de 3/4" x 1,5 mm para 1" x 2 mm. Tal fato é justificado devido a bandeja antiga, não suportar o esforço causado pelo amortecedor, fazendo com que a mesma apresentasse empenos em sua estrutura.

4.2 REFINAMENTO DA MALHA NÃO ESTRUTURADA

A primeira etapa para se realizar esse estudo, foi definir qual tipo de malha a ser usada, optou-se em usar uma do tipo não estruturada e não ortogonal devido a sua capacidade de adaptar à complexas geometrias como o caso do chassi do Baja.

O elemento size foi o parâmetro configurado dentro da mesh (malha) escolhida, partindo do tamanho padrão (default) até em um tamanho que a malha irá convergir. Para identificar se isso ocorreu é necessário observar a deformação causada por cada simulação. A Figura 20 mostra um gráfico de convergência, onde dá pra visualizar de forma gráfica a malha convergindo.

Figura 20: Linha de convergência da malha usada

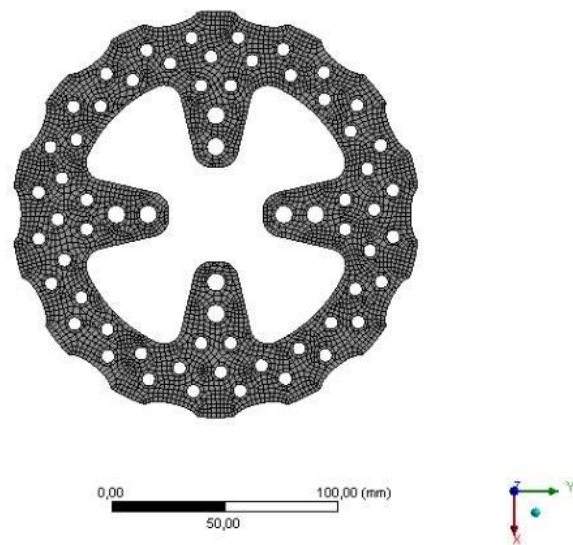


Fonte: Autoria própria

A partir da Figura 20 é possível concluir que do tamanho 5 mm em diante, praticamente não se tem variação na deformação, evidenciando o fato da malha estar convergindo.

Após todo estudo de refinamento de malha chegou-se o resultado mostrado na Figura 21. A imagem mostra o disco de freio, ilustrando o tipo de malha adotado nas simulações estruturais da equipe Caraubaja SAE.

Figura 21: Tipo de malha adotado nas simulações estruturais



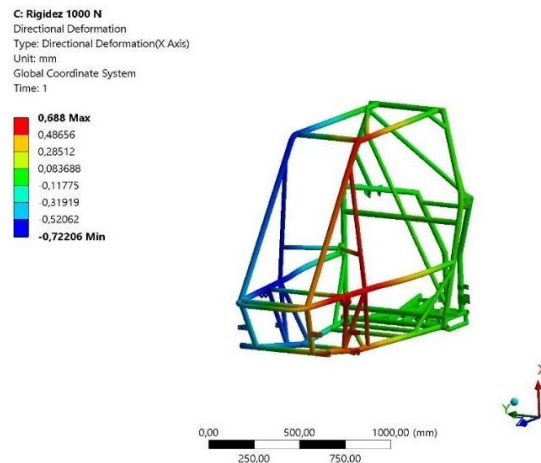
Fonte: Autoria própria

4.3 ENSAIOS NAS GEOMETRIAS ESTUDADAS

Na Figura 22 é apresentado as deformações mínimas e máximas provenientes do torque gerado pela aplicação de binários verticais nos pontos de ancoragem do amortecedor da suspensão dianteira, distantes lateralmente por uma distância d . Vale ressaltar que as tensões provocadas são diferentes, enquanto uma lateral do chassi sofre esforços trativos a outra sofre compressão.

A partir das deflexões direcionais críticas e da distância entre os pontos de aplicação da força (0,465m), foi possível determinar os ângulos de torção e estimar uma média para os valores encontrados para a rigidez.

Figura 22: Deflexões mínimas e máximas do chassi

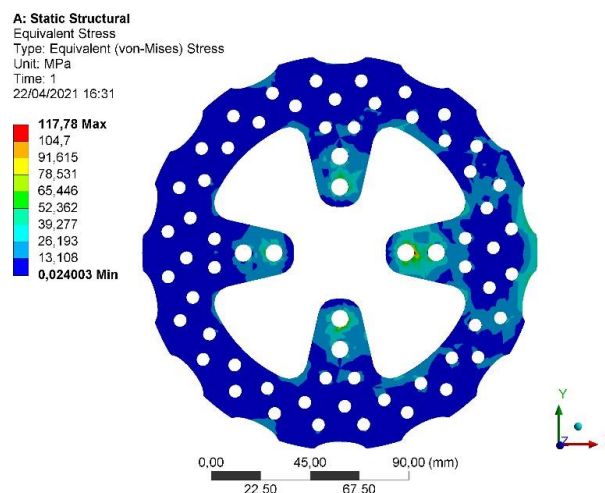


Fonte: Autoria própria

Os resultados obtidos indicaram uma rigidez torcional média de 1224,7 N.m/grau, considerada satisfatória para a faixa estimada por Barbosa 2015 para um chassi de competição Baja SAE.

A simulação do disco de freio teve o objetivo de medir a resistência deste sólido, quando submetido a força de frenagem. A tensão de Von Mises encontrado de 117,8 Mpa (Figura 23), evidencia o fato desta geometria estar dentro dos padrões confiáveis, uma vez que a tensão de escoamento do material (aço SAE 1020) usado é superior como visto na tabela 02.

Figura 23: Tensão de von-Mises do disco de freio



Fonte: Autoria própria

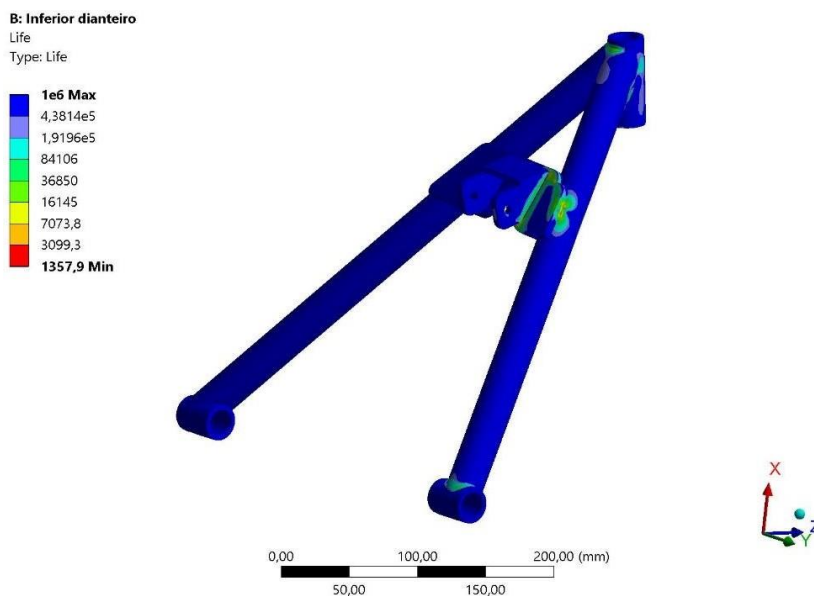
A região crítica como esperado é justamente os pontos de fixação, pois os parafusos exercem uma força de cisalhamento nos furos do disco. Como base nos resultados, a otimização feita na geometria do disco foi bem sucedida, uma vez que aliou boa resistência com menor massa final.

Modo de falha por fadiga é muito perigoso para peças mecânicas, porque a tensão necessária para fazer com que falhe, é normalmente inferior a resistência à tração e a resistência à deformação do material.

A fadiga foi escolhida como objeto para as simulações da bandeja, pois como é sabido o esforço do amortecedor é cíclico, desta forma é imprescindível que o projeto estrutural esteja bem dimensionado para este tipo de esforço.

O critério usado para este ensaio foi o de Goodman modificado, por ser muito bem aceito pelas literaturas, além de ser conservador apresentando uma grande confiabilidade. Foi inserido o fator Kt, através da determinação analítica dos fatores modificadores de tensão. Na Figura 24, é possível ver o resultado de 10^6 ciclos, o que pela literatura é considerado como uma vida infinita.

Figura 24: Vida útil estimada para as bandejas de suspensão inferior dianteira



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Portanto, após os ensaios é possível fazer apontar alguns importantes pontos:

- A rigidez torcional para o chassi SEVERO 2.0 encontrada estar na faixa aceitável para um protótipo Baja, segundo a literatura. Este importante parâmetro será de suma importância para a validação do projeto na competição;
- No disco de freio, mesmo submetido a uma força oriunda de situação crítica, que dificilmente será encontrada nas competições. A geometria otimizada, com redução de massa apresentou uma resistência expressiva, no qual a tensão de Von Mises foi aproximadamente, metade com relação a de escoamento do material;
- Nas bandejas de suspensão inferior, mais um importante parâmetro foi descoberto, através de um ensaio de fadiga com base no critério de Goodman modificado, como solução a vida útil encontrada na simulação foi infinita.

6 PROPOSTA PARA ANÁLISE FUTURAS

- Construir a linha de carga de forma empírica para ser comparado com os critérios de fadiga (Soderberg, Gerber e Goodman);
- Realizar de forma experimental o ensaio de rigidez torcional;
- Encontrar a constante de rigidez torcional do SEVERO.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, Domingos Flávio. Análise estrutural com ANSYS® workbench. Mogi das Cruzes: Editado pelo autor, 2016.

ASTM, E 1823-96. Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing, 1996.

BALADEZ, Fabio. O passado, o presente e o futuro dos simuladores. FaSCi-Tech, v. 1, n. 1, 2016.

BEZERRA, R. J. L. Otimização e Análise Estrutural do Chassi de um veículo Baja SAE. 2020. 87 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2020.

BUFFONI, Salete. Critérios de falha. Universidade Federal Fluminense, 2017. Disponível em: <http://www.professores.uff.br/salete/wp-content/uploads/sites/111/2017/08/aula141.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.

CASTRO, Carlos Alberto Carvalho. Estudo do comportamento à fadiga de metais dentro e fora da água na presença de pressão hidrostática. 2007.

CASTRO, Márcio Schneider de et al. Uma metodologia para melhoria da rigidez torcional de componentes estruturas automotivos. 2008.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R.; BELEGUNDU, Ashok D. Elementos finitos. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014.

DASSAULT, SYSTÈMES SOLIDWORKS CORPORATION (Estados Unidos). SolidWorks® 2011: Conceitos básicos do SolidWorks. Concord: Dassault Systèmes Solidworks Corporation, 2010. 502 p

DINIZ, Diego David Silva. ESTUDO DA DINÂMICA VERTICAL EM SUSPENSÃO DUPLO A DE UM VEÍCULO OFF-ROAD TIPO BAJA. 2014. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Pb, 2014.

GUESSER, Wilson Luiz et al. Ferros fundidos empregados para discos e tambores de freio. In: Brake Colloquium, Gramado–Brasil. 2003.

IOMBRILLER, Silvia Faria. Análise térmica e dinâmica do sistema de freio a disco de veículos comerciais pesados. São Carlos, 2002.

LIMA, liJosé Eduardo Salgueiro. Determinação dos coeficientes de segurança pelo método SN através das curvas de Goodman, Soderberg e Gerber. Caleidoscópio, v. 11, n. 1, p. 56-62, 2019.

MARTHA, Luiz Fernando. Métodos básicos da análise de estruturas. Rio de Janeiro: Campus, 2010.

MITCHELL, M. R. Fatigue analysis for design. I Seminário Internacional de fadiga, SAE Brasil São Bernardo do Campo – SP p. 1-29, 31 de outubro de 2001.

OLIVEIRA, Fernando César Gama de. Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica. Uberlândia, MG: 2007. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal De Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica.

PAZIAN, Alexandre. Proposta de procedimentos de desenvolvimento de suportes aplicados em chassi veicular. 2010.

PAREDES, Brayan (ed.). Otimização em engenharia: otimização. otimização. 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/otimizacao-em-engenharia/#:~:text=Para%20come%C3%A7ar%20a%20aplicar%20a,entrada>

%2C%20fun%C3%A7%C3%B5es%20objetivo%20e%20restri%C3%A7%C3%B5es.&text=Essas%20fun%C3%A7%C3%B5es%20s%C3%A3o%20as%20for%C3%A7as,pode m%20ser%20uma%20ou%20mais. Acesso em: 02 mar. 2021.

QURESH, E, M.; Analysis of Residual Stresses and Distortions in Circumferentially Welded Thin-Walled Cylinders. 2008. 215f. Thesis (Doctorate) Mechanical Engineering – National University of sciences and Technology, Rawalpindi, Pakistan 2008.

SAE Brasil. Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil. RATBSB – Ementa 3. Data de Efetividade: 30 de setembro de 2019.

SAMPÒ, Enrico. Modelling chassis flexibility in vehicle dynamics simulation. 2011. Tese de Doutorado. University of Surrey.

SILVA, Átila Paulino Corrêa da; VIEIRA, Paulo Henrique; TAVARES, Thomas. PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DO VEÍCULO BAJA SAE. 2016. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Mecânica Automotiva, Faculdade de Tecnologia de Santo André, Santo André, 2016. Cap. 13

SILVA, João Guilherme Santos da *et al.* ANÁLISE ESTRUTURAL DE CHASSIS DE VEÍCULOS PESADOS COM BASE NO EMPREGO DO PROGRAMA ANSYS®. 2001. 8 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2001

VICTORIA, Mariano, Martí, and Osvaldo M. Querin. "Topology design of two-dimensional continuum structures using isolines." *Computers & structures* 87.1-2 (2009): 101-109.

8 ANEXOS

Tabela 2: Propriedades mecânicas aços SAE

Propriedades mecânicas dos aços nas condições: laminados a quente: normalizado e recozido.									
Qualidade		Condições	Temperatura de austenitização (°C)	Resist. à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza (HB)	Impacto (J)
AFP	AISI (1)								
1015	1015	Laminado	-	420	315	39,0	61	126	111
		Normalizado	925	425	325	37,0	70	121	115
		Recozido	870	385	285	37,0	70	111	115
1020	1020	Laminado	-	450	330	36,0	59	143	87
		Normalizado	870	440	345	35,8	68	131	118
		Recozido	870	395	295	36,5	66	111	123
1030	1030	Laminado	-	550	345	32,0	57	179	75
		Normalizado	925	525	345	32,0	61	149	94
		Recozido	845	460	345	31,2	58	126	69
1040	1040	Laminado	-	620	415	25,0	50	201	49
		Normalizado	900	595	370	28,0	55	170	65
		Recozido	790	520	350	30,2	57	149	45
1050	1050	Laminado	-	525	415	20,0	40	229	31
		Normalizado	900	750	430	20,0	39	217	27
		Recozido	790	635	365	23,7	40	187	18
1060	1060	Laminado	-	815	485	17,0	34	241	18
		Normalizado	900	775	420	18,0	37	229	14
		Recozido	790	625	370	22,5	38	179	11

Fonte: LG STEEL, S.D