

Análise estrutural e otimização de um veículo mini baja

Structural analysis and optimization of a mini baja vehicle

¹ Mauricio Quelhas Antolin mauricioantolin@uezo.edu.br <http://orcid.org/0000-0002-1887-1694>

¹ Gisele Duarte Caboclo Antolin

¹ Livia da Conceição de Macedo

¹ Fernanda Almeida dos Santos

¹ Centro Universitário Estadual da Zona Oeste.

Resumo

Este trabalho teve como objetivo realizar a análise estrutural e a otimização do projeto de um veículo mini Baja, através de simulações computacionais. Para isso, desenvolveu-se um modelo 3D de um chassi do tipo *spaceframe*, obtido por meio do *software* CAD (*Computer-Aided Design*) SolidEdge. Esse modelo foi utilizado, em seguida, para a análise da estrutura veicular, que foi realizada através da sua simulação no *software* no FEMAP, utilizando-se como base o método de elementos finitos. A partir dos resultados obtidos, foi possível analisar a aplicação da tensão de flexão no chassi do veículo, representando o peso do motorista e do motor em um veículo do tipo mini baja, com chassi *spaceframe*, feito de aço 1020 e modelado em 3D no SolidEdge. Os resultados mostram que o aço 1020 é uma excelente escolha para a fabricação desses veículos e que o estudo das oscilações livres do veículo é um passo importante para garantir a segurança estrutural do projeto.

Palavras-chave:

Simulação. Mini Baja. FEMAP. Elementos finitos.

Abstract

This work aimed to carry out the structural analysis and the optimization of the design of a mini Baja vehicle, through computer simulations. For this purpose, a 3D model of a spaceframe-type chassis was developed using SolidEdge CAD (computer-aided design) software. This model was then used for the analysis of the vehicle structure that, was performed through its simulation in the FEMAP software, which uses the finite element method. From the results obtained, it was possible to analyze the application of bending stress on the vehicle chassis, representing the driver and engine weight in a mini Baja vehicle, with a spaceframe chassis, made of 1020 steel and modeled in 3D in SolidEdge. The results show that 1020 steel is an excellent choice for the manufacture of these vehicles and that the study of the vehicle's free oscillations is an important step to ensure the structural safety of the project.

Keywords:

Simulation. Mini Baja. FEMAP. Finite elements.

Como você deve citar?

ANTOLIN, Mauricio Quelhas et al. Análise estrutural e otimização de um veículo mini baja. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda (RJ), v. 16, n. 47, p. 7-17, dez, 2021.

1 INTRODUÇÃO

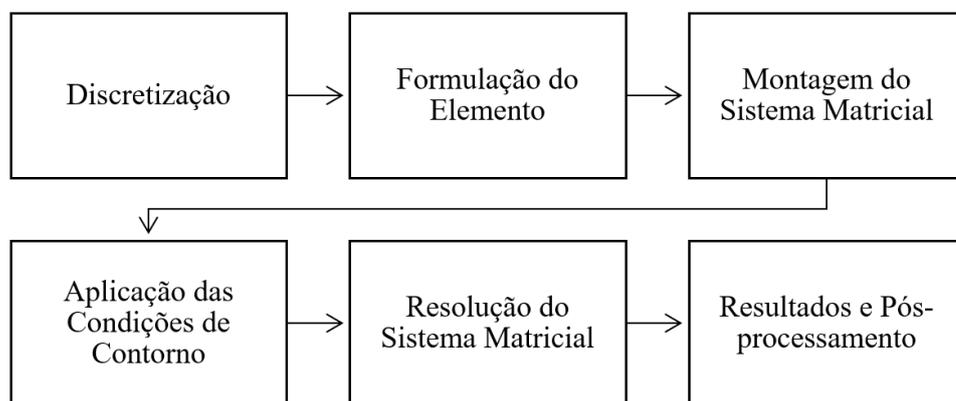
A utilização de *softwares* de análises estruturais vem crescendo exponencialmente, tornando possível a identificação de pontos críticos de um projeto e, a partir disso, realizar, não somente uma melhoria, como também uma modificação no projeto. Para realização de um projeto de chassi veicular, a análise estrutural é muito importante, uma vez que com ela se torna possível antever possíveis falhas, simular condições de operação e evitar a ocorrência de acidentes (GUAN *et al.*, 2003).

Dessa forma, a análise de uma estrutura veicular é uma etapa fundamental para garantir a segurança e a confiabilidade do veículo. Tal análise estrutural pode ser feita a partir do *software Finite Element Modeling And Postprocessing* - FEMAP, que utiliza como base o Método de Elementos Finitos (MEF) que tem como base a divisão da geometria da peça em pequenas partes (elementos finitos), conectada por pontos nodais (nós), formando uma malha (ALVES FILHO, 2009). O MEF permite a resolução de problemas vistos como complexos através de soluções numéricas aproximadas, ou seja, “para que atenda ao objetivo de solucionar equações diferenciais complexas, o método é baseado no processo de aproximação discreta, onde um meio contínuo geral em análise é dividido em pequenos elementos com as mesmas propriedades do todo, ou seja, a aproximação discreta transforma um problema infinito-dimensional em um problema finito-dimensional” (BEZERRA FILHO, 2020).

O método, quando aplicado em um corpo, utiliza elementos de forma simples, e “podem ser de diferentes formatos como triângulos, quadrados, tetraedros e cubos. Cada elemento dispõe de um número de pontos os quais são chamados nós. O conjunto de elementos utilizados na aproximação discreta é denominado malha” (BEZERRA FILHO, 2020).

Para a implementação do MEF, existem algumas etapas a serem seguidas, que serão apresentadas na Figura 1.

Figura 1- Fluxograma das etapas do Método de Elementos Finitos (MEF)



Fonte: Autor (2020)

A discretização consiste na divisão da estrutura em elementos finitos, que são definidos pelos seus pontos nodais; para a formulação do elemento, deve-se escolher a função aproximada que melhor representa a solução dentro de cada elemento (ou subdomínio). Essa função deve conter coeficientes não conhecidos que serão determinados de forma a minimizar o erro na solução. Esses coeficientes devem ser escritos em função das posições dos “nós” e, para isso, são utilizadas funções polinomiais para realizar a aproximação da malha à peça em estudo. Após esse passo, o método monta um siste-

ma matricial para os elementos e, posteriormente, realiza-se a montagem da matriz que representará a estrutura. Porém, antes da equação ser resolvida, ela deve ser modificada para levar em conta as condições de contorno do sistema; assim, a solução obtida (valores nodais) deve ser organizada na forma de tabelas, plotagens de gráficos, curvas de contorno, etc. para poder ser interpretada, na etapa de pós-processamento.

1.1 Mini Baja

Criada em 1991 e filiada da *SAE International*, a SAE Brasil (Sociedade dos Engenheiros Automotivos) desenvolve atividades de grande relevância, pois atuam diretamente como fonte de conhecimento para estudantes de nível superior e colocam em prática os conhecimentos teóricos adquiridos durante a graduação. Para Silva, Vieira & Tavares (2016), “o objetivo estatutário da SAE BRASIL, a exemplo da *SAE International*, é desenvolver o conhecimento das artes, ciências, normas e práticas de engenharia ligadas ao desenvolvimento, projeto, construção e uso de máquinas e equipamentos relacionados, preservando e melhorando a qualidade de vida na produção e no uso destes equipamentos, de forma a servir a humanidade”.

Com base nisso, a SAE Brasil promove programas estudantis que permitem os estudantes vivenciarem tudo o que foi aprendido na prática. Um desses programas é o Programa Baja SAE BRASIL, um projeto realizado mundialmente que tem como um de seus projetos um desafio estudantil de competição automobilística envolvendo veículos Mini Baja, que são pequenos carros do tipo *off road* (fora de estrada) e que visa promover aos participantes uma experiência em que possam aplicar na prática seus conhecimentos adquiridos na graduação, sob a forma de um processo integrado de desenvolvimento e aprendizado (BEZERRA FILHO, 2020; SOUSA *et al.*, 2017).

Diversos veículos do tipo baja têm sido projetados em universidades brasileiras. Em 2020, a competição teve 73 equipes inscritas de 13 Estados mais o Distrito Federal, representando 63 instituições de ensino superior com as quais os alunos têm vínculo acadêmico (ABC, 2020). Devemos destacar que o Brasil já foi, algumas vezes, inclusive, campeão da competição internacional. Isso nos mostra o alto grau de competitividade das equipes no Brasil. Cabe destacar que as melhorias na *performance* desses veículos passam diretamente pelo aprimoramento de seu projeto estrutural.

Com base nisso, o veículo mini aja é submetido a uma análise estrutural, no qual é identificado o tipo de estrutura veicular, também conhecido como chassi. Nesta pesquisa, a abordagem principal será em relação à estrutura veicular do tipo *spaceframe*, por ter um formato de gaiola, que “oferece grande flexibilidade em relação ao uso de materiais, podendo variar entre aços, alumínio e materiais compósitos”, o que nos permite entender o papel da seleção de materiais em um projeto (BEZERRA FILHO, 2020).

1.2 Estrutura veicular do tipo *spaceframe*

O chassi de um veículo automotivo tem como principal função conferir resistência e estabilidade ao veículo nas mais variadas situações de carregamento, de forma a garantir a segurança dos passageiros, bem como a correta operação dos sistemas de direção e suspensão (BEZERRA FILHO, 2020). Sendo assim, é necessário que o chassi possua uma estrutura que seja resistente e que não seja muito pesada, pois o peso da estrutura influencia na efetividade do carro, uma vez que, quanto mais leve for o chassi, melhor será a potência do motor.

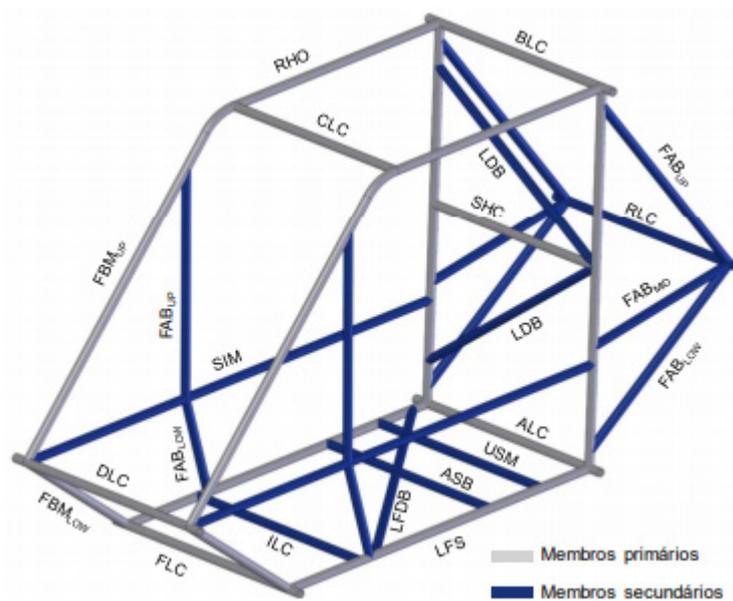
De acordo com as normas da SAE Brasil, os tubos e aço circular devem ter diâmetro externo igual a 25,4 mm e espessura de parede igual a 3,05 mm e um mínimo de 0,18% de carbono em sua composição.

Pensando nisso, para garantir a leveza, bem como a boa eficiência do mini Baja, os materiais devem ser bem selecionados. A construção de um chassi de *spaceframe* é composta de tubos de aço ou de alumínio colocados em um formato triangular, que se destinam a suportar as cargas de suspensão, motor, motorista e aerodinâmica (CHANDRA, 2020).

O veículo mini Baja, quando submetido a algumas condições, faz com que se exija esforços de sua estrutura. Sendo assim, além de identificar o tipo de chassi na análise estrutural, é necessário realizar um estudo dos carregamentos (forças) que atuarão nessa estrutura. Esta pesquisa teve como foco principal a aplicação da tensão de flexão, representando o peso do motorista e do motor.

A Figura 2 mostra quais são os membros primário e secundários da gaiola.

Figura 2 - Posicionamento dos elementos primários e secundários utilizados na estrutura



Fonte: SAE Brasil (2019)

1.3 Carregamentos - Tensão e Deformação

A análise de tensão e deformação de uma estrutura veicular possibilita entender como o chassi irá se comportar, seja de forma estática ou dinâmica. Essa análise é importante para se evitar grandes deformações grandes o suficiente que possam impedir a estrutura de atender à finalidade para a qual ela foi destinada, além de possibilitar a determinação das tensões na estrutura.

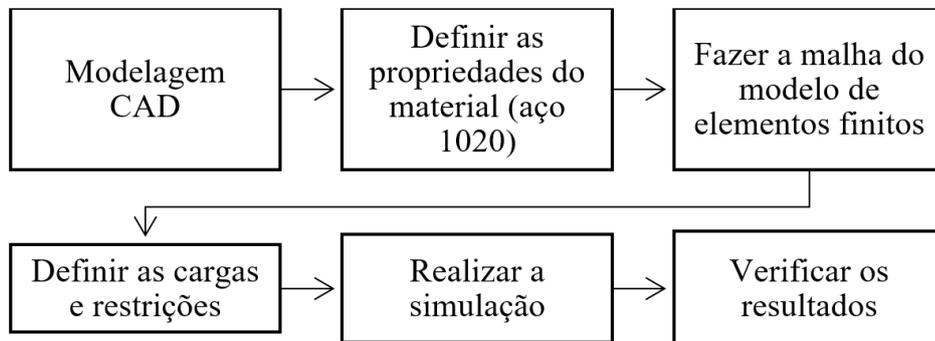
Neste artigo, será analisada somente a tensão de flexão que ocorre quando um objeto é submetido a um carregamento, fazendo que venha fletir (curvar), deformando assim sua estrutura em uma curva. Bezerra Filho (2020) afirma que se trata de uma 'propriedade estática referente à maneira como o chassi sofre deflexão à medida que o mesmo é submetido a esforços na região do entre eixos'.

2 METODOLOGIA E MATERIAIS DA PESQUISA

A fase metodológica está presente na Figura 3, na qual foram apresentadas as etapas para alcançar o objetivo estabelecido neste trabalho. Na primeira etapa, modelagem CAD, foi realizado o modelo do chassi *spaceframe* em 3D, no SolidEdge; em seguida, já no FEMAP, com o modelo em CAD do chassi, foram definidas as propriedades do material utilizado no projeto (aço 1020). Feita a malha do modelo, foram definidas também, as cargas e condições de restrição do projeto.

Diversos materiais têm sido propostos para compor a gaiola, dentre eles, destacam-se o aço 1018, o aço 1020 e o aço 4130 (KRISHNA *et al.*, 2017). Para realização desta pesquisa, foi escolhido o aço SAE 1020 para a modelagem do chassi mini Baja. Na Tabela 1, são listadas algumas de suas propriedades mecânicas:

Figura 3 - Fluxograma das Etapas da metodologia da pesquisa



Fonte: Autor (2020)

Tabela 1 - Propriedades Mecânicas Aço SAE 1020

Propriedades Mecânicas do Aço SAE 1020	
Limite de escoamento	351 MPa
Módulo de elasticidade (E)	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29

Fonte: Base de dados do software FEMAP (2020)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados obtidos para a simulação da estrutura descrita na Seção 1

Inicialmente, tratamos os membros do carrinho como um único sólido, para a realização de um estudo preliminar do projeto. Foram aplicadas duas forças no mini Baja: uma localizada na parte traseira do chassi, representando o peso do motor que, de acordo com o regulamento técnico (SAE BRASIL, 2019), deve ser do modelo Briggs & Stratton. Sabendo disso, foi utilizado, como base para a simulação, o Motor Briggs & Stratton 10 HP e tanque de combustível que, juntos, possuem 35 kg, o que corresponde a uma força peso de 343,35 N, dividida entre as duas barras traseira. A outra força, localizada na base (parte de baixo) do veículo, representa o peso do motorista que, de acordo com o regulamento técnico

(SAE BRASIL, 2019), varia de um condutor desde 1,90 m de altura, com peso de 109 kg até um condutor de 1,45 m de altura, com peso de 42 kg. Considerando isso, para a realização da simulação, foi utilizada uma força peso de 1069,29 N, que equivale ao peso máximo permitido de 109 kg.

Ambas as forças foram aplicadas com o propósito de aferir os pontos críticos da estrutura, ou seja, que apresentam as maiores tensões. Os resultados obtidos na simulação, referentes aos valores da tensão normal (σ), Von Mises (σ_m) e deformação (ϵ), podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades Mecânicas do Mini Baja

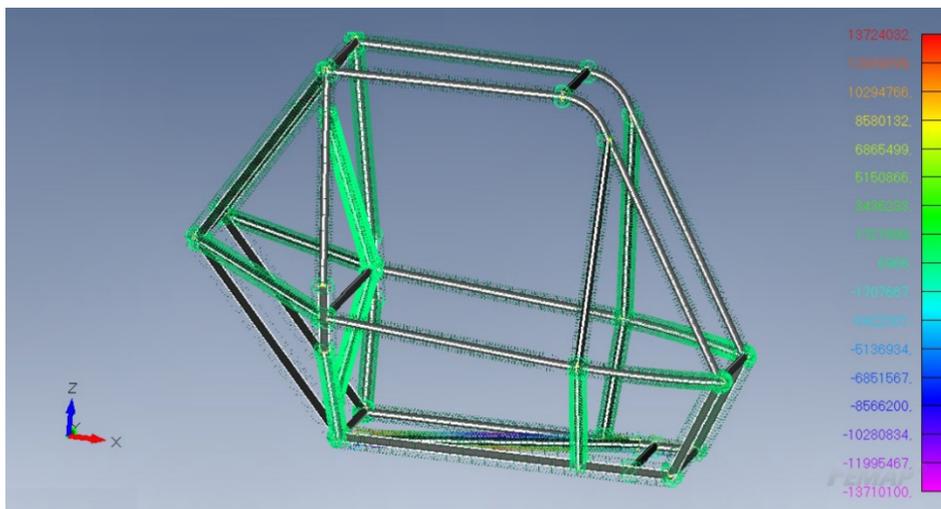
Peça	σ (Mpa)	σ_m (MPa)	ϵ
Chassi <i>spaceframe</i>	13,72	15,03	1,48x10 ⁻⁴

Fonte: Autor (2020)

Na simulação realizada, os valores obtidos são representados em escala de cores, na qual a cor rosa representa o valor baixo, enquanto a cor vermelha representa o valor em seu nível máximo, identificando em quais locais o projeto poderia estar mais suscetível a falhas.

Das forças aplicadas, é possível perceber que aquela que resultou em uma tensão normal máxima de 13,72 MPa (ver Figura 4) foi a que está localizada na base do chassi, representando o peso do motorista. A partir disso, pode-se verificar que essa região está propensa a sofrer deformação, permanecendo no regime elástico e confirma a localização do ponto crítico da estrutura.

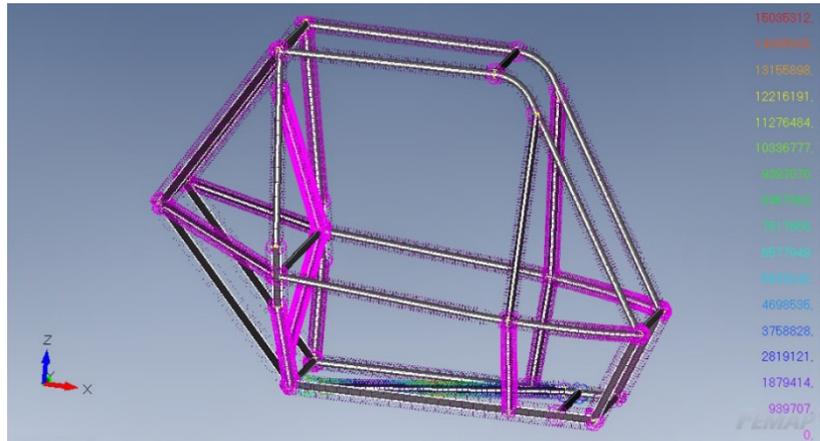
Figura 4 - Tensão Normal do Mini Baja



Fonte: Autor (2020)

Ao comparar os resultados da tensão de *von Mises* do mini Baja com a tensão de escoamento do aço 1020, é possível verificar que a tensão obtida na simulação do mini Baja está bem abaixo do limite de escoamento. Isso quer dizer que o chassi não sofrerá deformações plásticas e o fato de a tensão de *von Mises* ser, aproximadamente, 23 vezes maior que a tensão de escoamento, nos mostra que a estrutura está superdimensionada (ver Figura 5).

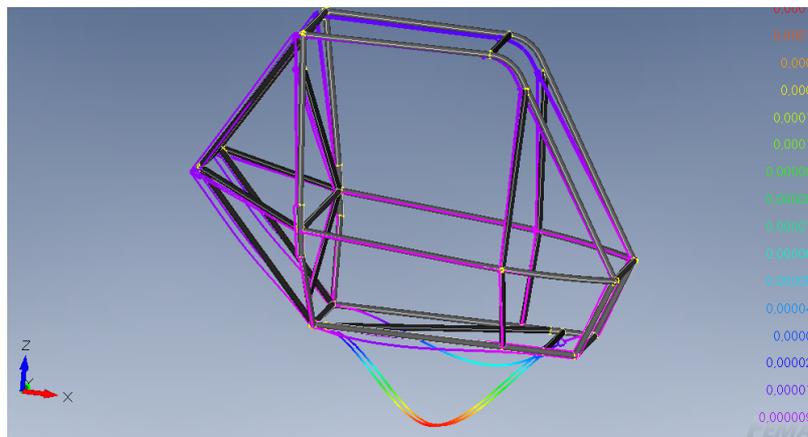
Figura 5 - Tensão Von Mises do Mini Baja



Fonte: Autor (2020)

Além disso, pode-se observar que a deformação máxima acontece na seção onde foi aplicada a força que representa o peso do motorista, como foi previsto na tensão normal. Na escala de cores, verificamos que a cor vermelha representa a deformação máxima de $1,48 \times 10^{-4}$, fazendo com que a estrutura na base fique em forma curva (Figura 4).

Figura 6 - Deformação do Mini Baja



Fonte: Autor (2020)

Dizer que a estrutura está com um superdimensionamento significa que há um excesso de material devido ao alongamento causado pela aplicação da força peso na seção dimensionada, interferindo diretamente no peso do veículo.

3.2 Proposta de otimização estrutural

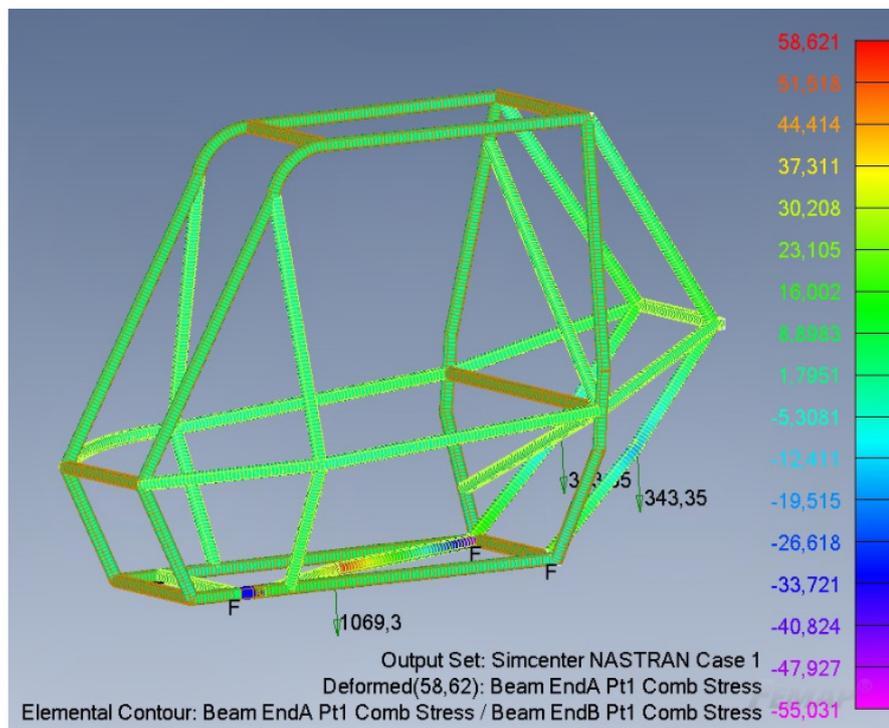
Visando à redução da massa, analisamos a estrutura e as normas SAE Brasil e observamos pontos que aceitam retiradas de material sem comprometer a rigidez estrutural. Essa redução de massa da estrutura é importante para a redução dos custos do projeto. O objetivo principal foi obter uma configuração ótima de chassi, que apresentasse baixo peso e elevada rigidez à flexão. Foi observado que, de acordo com as normas, existem tubos que são chamados primários e tubos que são chamados de secundários (Figura 2).

A geometria foi inicialmente simplificada, transformando o modelo sólido em um modelo de vigas. Isso faz com que os tubos que compõem a estrutura sejam representados por linhas que passam pelo centroide dos componentes. Tal medida foi adotada para reduzir o gasto computacional, já que os elementos de malha não serão tridimensionais, mas sim elementos lineares, trazendo resultados muito próximos do modelo sólido sem perda de precisão.

Os membros primários devem ter as dimensões especificadas na seção 1.2 deste trabalho, enquanto os membros secundários devem ser de tubo com espessura da parede mínima de 0,89 mm, diâmetro externo maior ou igual a 25,4 mm e conteúdo de aço carbono de, pelo menos, 0,18%. A distinção de quais tubos são primários e quais são secundários foi mostrada na Figura 2. A redução dos tubos é possível, pois os tubos primários são aqueles que recebem os maiores esforços, em caso de colisão, e os elementos secundários possuem a função apenas de reforço estrutural.

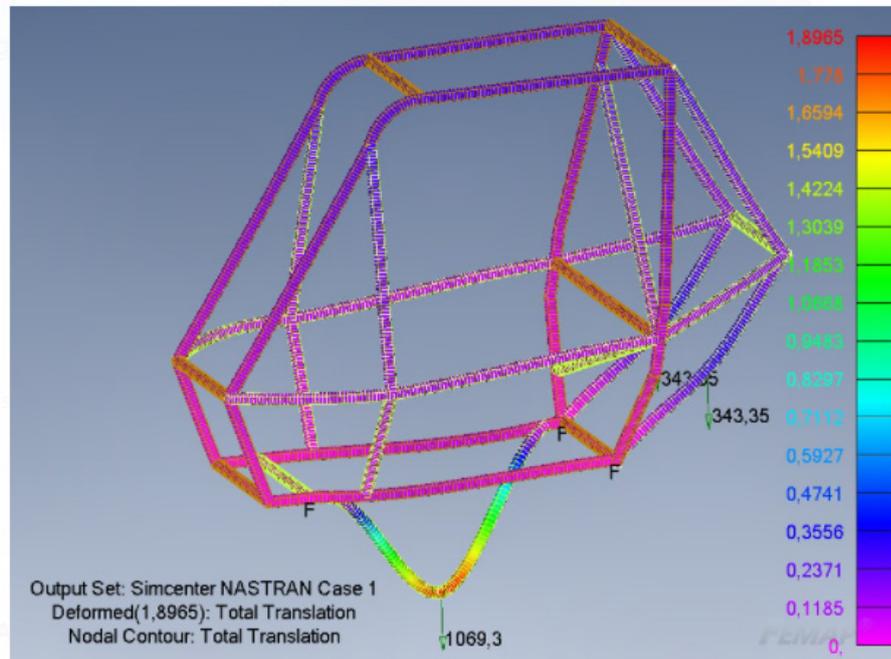
Os resultados para essa nova simulação são apresentados nas Figura 7 e Figura 8.

Figura 7 - Estresse na estrutura



Fonte: Autor (2020)

Figura 8 - Deformação da estrutura



Fonte: Autor (2020)

Podemos observar que a deformação experimentou um severo aumento de 10^4 , em relação ao modelo anterior. Contudo, a tensão aumentou 4 vezes, em relação ao valor do modelo anterior e permanece abaixo do valor da tensão de escoamento do material.

Outra questão importante é que, antes da otimização, a estrutura possuía 40,39 kg e, após a otimização, passou a ter 25,89 kg, o que nos mostra que a estrutura sofreu uma redução significativa de massa (35,9%). Esse resultado é importante, pois uma redução de material representa uma redução no custo final do projeto.

Podemos observar que os valores de tensão continuam inferiores ao valor da tensão de escoamento do aço 1020, o que torna o projeto 2 viável, além de ser o mais econômico.

Após a otimização do projeto, foi realizado um estudo da frequência natural do sistema (Figura 9). A realização deste estudo é de extrema importância, pois forças de excitação externas, originadas ou não na estrutura, possuem frequências naturais, que, caso coincidam com as frequências naturais do sistema em estudo, as oscilações resultantes podem levar ao seu colapso estrutural.

Para o projeto de um mini Baja, o maior fator de contribuição de forças vibratórias é o motor (de 10 HP), exigido pela SAE, o qual possui frequências naturais que variam entre 15 e 25 Hz (KABILAN, 2016). Dessa forma, a estrutura do chassi deve possuir frequência natural acima dessa faixa para se evitar o colapso estrutural.

Para a definição da quantidade de nós a ser utilizada no modelo estrutural final, também foi realizado um estudo de convergência dos resultados da análise modal. Para isso, a quantidade de nós da simulação foi aumentada até que a variação desses resultados obtidos passe a ser mínima. Quando isso ocorre, obtemos a quantidade mínima de nós para a realização da simulação, como apresentado na Tabela 3.

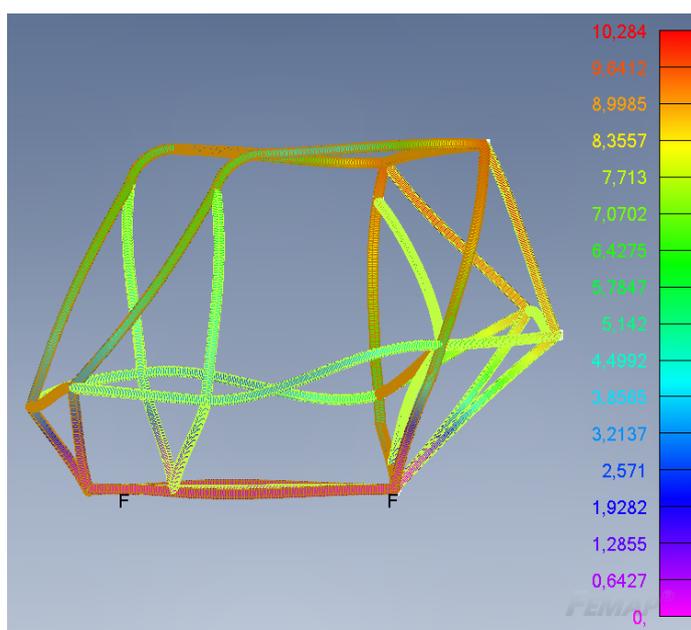
Tabela 3 - Frequências naturais de vibração em função no número de nós da estrutura

Tamanho dos Elementos (mm)	Número de elementos	Frequência (Hz)
35	713	57,17
30	812	57,17
25	972	57,17
20	1219	57,17
15	1621	57,17

Fonte: Autor (2020)

Os resultados nos mostram a convergência dos valores para uma quantidade de nós igual a 713 elementos, visto que, a partir desse valor, a frequência de vibração não muda com o aumento do número de elementos. Dessa forma, utilizou-se esse valor para a simulação da malha de elementos finitos. Os modos normais de vibração da estrutura e suas respectivas frequências são mostradas na Figura 9:

Figura 9 - Vibração da estrutura



Fonte: Autor (2020)

A partir desses resultados, podemos observar que o sistema não entrará em ressonância, visto que as frequências verificadas foram superiores às do motor. Outra conclusão é que, como podemos observar, temos apenas a vibração devido à flexão na estrutura, que ocorre em virtude da natureza das forças que foram aplicadas na estrutura.

4 CONCLUSÕES

Foi possível verificar que o aço 1020 é uma excelente opção de material para compor a estrutura dos veículos mini Baja, visto que os valores da simulação computacional encontrados mostram que, para os principais carregamentos aplicados nesse tipo de estrutura, teremos os valores de tensões muito inferiores aos admissíveis para o aço 1020.

A realização de uma otimização estrutural possibilitou uma redução significativa de material no projeto (35,9%) e, com certeza, contribuirá para a redução dos custos finais do projeto sem prejuízos na segurança.

A respeito dos resultados de simulação das vibrações, podemos verificar que o modelo projetado é capaz de resistir às oscilações causadas pelo motor exigido pela competição, sem que a estrutura sofra danos estruturais oriundos dessa oscilação, visto que o resultado encontrado para a frequência foi 57,17Hz, valor muito acima do gerado pelo motor.

REFERÊNCIAS

ABC. **Competição Baja SAE Brasil 2020 traz novos desafios às equipes**. São José dos Campos, 2020. Disponível em: <https://www.abccoabc.com.br/abc/noticia/competicao-baja-sae-brasil-2020-traz-novos-desafios-equipes-97710>. Acesso em: 23 jun. 2021.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos**: A base da Tecnologia CAE. 6 ed. São Paulo: Érica, 2009.

BEZERRA FILHO, R. J. L. **Otimização e análise estrutural do chassi de um veículo BAJA SAE**, Brasil. 2020. (Monografia) Universidade Federal do Rio Grande do Norte Centro de Tecnologia - Curso de Engenharia Mecânica. Natal – RN.

CHANDRA, Y. Design, Analysis and Optimization of a BAJA-SAE Frame, **International Journal of Science and Research (IJSR)**. v. 9, n. 2, Feb. 2020.

GUAN, Z.-Q; GU, Y.-X; ZHANG, Hong-Wei; LI, Y.-P; ZHAO, G.-Z; KANG, Zhan; XING, B.-C. **Parameterized method for 3D finite element modeling based on CAD/CAE integration**. Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS. 9. 1112-1119, 2003.

KABILAN, K. M.; MURKUTE, A.; MARATHE, A. H. **Structural otimization of sae baja car frame**, 2016. Disponível em: http://designinformatics.github.io/_teaching/designopt/projects/2016/desopt_2016_01.pdf. Acesso em: 30 maio 2021.

KRISHNA, J. S.; SHETYE, A; MALLAPUR, P. Design and Analysis of Chassis for SAE BAJA Vehicle. **IOSR Journal of Engineering**, 2017.

SAE BRASIL. **Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil - RATBSB** – Emenda 3, 2019.

SILVA, A. P. C.; VIEIRA, P. H.; TAVARES, T. **Proposta de Otimização Estrutural do veículo BAJA SAE**. (Monografia) Faculdade de Tecnologia de Santo André - Curso de Mecânica Automotiva. Santo André, 2016.

SOUZA, L. C.; LOPES, A. P.; SANTOS, A. A. **Estudo de vibrações livres de um chassi space-frame tipo baja**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC'2017 Hangar Convenções e Feiras da Amazônia - Belém - PA, 2017.