

# Dimensionamento estrutural por elementos finitos do sistema de *balance bar* e pedal de um veículo Baja SAE

*Structural design by finite elements of the balance bar and pedal system in a Baja SAE vehicle*

<sup>1</sup> Ayslan Augusto de Almeida Silva [ayslaalmeida20@gmail.com](mailto:ayslaalmeida20@gmail.com)

<sup>1</sup> Rafael Jayme Franceschine

<sup>1</sup> Flavia de Oliveira Reis

<sup>1</sup> Rafael de Souza Tolomei

<sup>2</sup> Maria Carolina dos Santos Freitas

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense - Escola de Engenharia Industrial e Metalúrgica de Volta Redonda.

<sup>2</sup> Doutora em Engenharia Metalúrgica, Mestre em Engenharia Metalúrgica e Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Fluminense.

## Resumo

O protótipo Baja SAE é um veículo *off-road* projetado por estudantes com o objetivo de participar de competições que testam sua confiabilidade e eficiência. Perante o exposto, este artigo tem como objetivo realizar o dimensionamento estrutural a partir do método de elementos finitos do sistema *balance bar* (clévis, *barrel nuts* e eixo de ajuste) e pedal. Dessa forma, a análise estrutural dos componentes visa garantir a resistência e uma baixa massa do protótipo. Sendo assim, no subsistema de freio, a *balance bar* e pedal devem ser analisados estruturalmente, garantindo um dimensionamento seguro. A análise do sistema de *balance bar* deve utilizar condições de contornos reais, cálculos concretos e ser realizado por meio de *software*, assim o processo de dimensionamento busca ajudar a definir a melhor geometria que suporte os carregamentos impostos ao veículo baja SAE. Para isso, é necessário saber analisar os componentes e as condições de contorno, selecionando peças resistentes e seguras. Assim, obtemos como resultado para o pedal o Aço SAE 1045 normalizado; para o eixo de ajuste, o Aço SAE 8640 temperado e revenido; e para o conjunto *Barrel Nuts* e Clévis, o Alumínio 7075 - T651. Com relação aos fatores de segurança, atingimos os valores 0,95, 1,10 e 1,70, para o Pedal, Eixo de Ajuste e Conjunto *Barrel Nuts* e Clévis, respectivamente.

## Palavras-chave:

Dimensionamento Estrutural. *Balance Bar*. Baja SAE. Elementos Finitos.

## Abstract

The Baja SAE prototype is an off-road vehicle designed by students with the aim of participating in competitions that test its reliability and efficiency. In view of the above, this article aims to carry out the structural design through the finite element method of the balance bar (clevis, barrel nuts and adjustment shaft) and pedal system. Thus, the structural analysis of the components aims to guarantee the resistance and a low mass of the prototype. So in the brake subsystem the balance bar and pedal must be structurally analyzed, ensuring a safe design. The analysis of the balance bar system must use real contour conditions, concrete calculations and be done through software, so the design process seeks to help the definition of the best geometry that supports the loads imposed on the SAE low vehicle. Therefore, it is necessary to know how to analyze the components and the boundary conditions, selecting resistant and safe parts. Thus, we obtain a normalized SAE 1045 Steel for the pedal, for the adjustment shaft we obtained a seasoned and tempered SAE 8640 Steel, and for the Barrel Nuts and Clevis set the Aluminum 7075 - T651. Concerning the safety factors we reached the values 0,95, 1,10 and 1,70, for the pedal, adjustment shaft, and barrel nuts and clevis respectively.

## Keywords:

Structural Design. *Balance Bar*. Baja SAE. Finite Elements.

## Como você deve citar?

SILVA, Ayslan Augusto de Almeida *et al.* Dimensionamento estrutural por elementos finitos do sistema de balance bar e pedal de um veículo Baja SAE. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda (RJ), v. 17, n. 48, p. 07 -19, abril, 2022.

## 1 INTRODUÇÃO

Os veículos Baja SAE são protótipos *off-road* projetados e fabricados por estudantes que participam anualmente de competições regionais, nacionais e mundiais. Os eventos são organizados pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) e tem como objetivo ajudar no desenvolvimento profissional universitário, além de buscar inovações para o setor automotivo. Na disputa, existem diversos tipos de provas que avaliam o protótipo quanto à robustez, velocidade, tração, segurança e conforto.

Como supracitado, o carro está em constante avaliação quanto à aceleração e velocidade e, dessa forma, é necessário a realização de diversos estudos com o propósito de se atingir os melhores resultados nesses quesitos. Dado que o motor exigido é padronizado e tem limitação de potência, a fim de nivelar as equipes, uma das formas de melhorar o desempenho é na redução de massa (SILVA, 2009).

Para alcançar um protótipo mais competitivo, é necessário dimensionar os componentes para que sejam leves e resistentes. Sendo assim, é preciso ter um bom entendimento das solicitações mecânicas e avaliar sua resistência estrutural nessas condições. Dessa forma, reduções de massa devem ser estudadas, para evitar falhas que comprometam o seu funcionamento. Os componentes do setor que serão avaliados são o pedal e o *balance bar*.

Segundo Limpert (1999), a operação segura de um automóvel requer ajuste contínuo da velocidade para as mudanças das condições de tráfego. Os freios e os pneus, assim como o sistema de direção, são os mais importantes componentes de um veículo motorizado para evasão de acidentes. Eles devem possuir uma *performance* segura sob condições variadas de operação, incluindo estradas escorregadias, molhadas e secas; quando levemente ou totalmente carregado; com freios molhados ou secos; quando aplicados por um motorista amador ou experiente; quando freado em estradas suaves ou acidentadas; ou quando puxando um trailer.

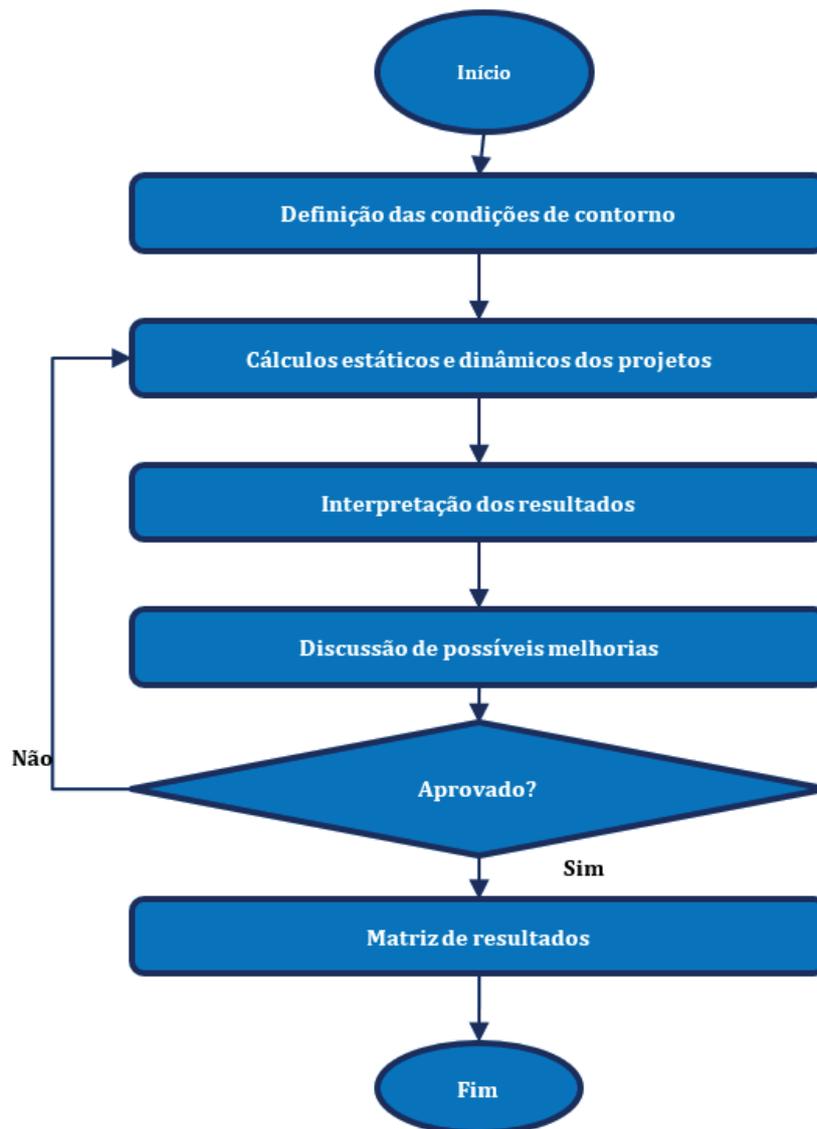
## 2 DESENVOLVIMENTO

Para alcançar um conjunto resistente, seguro, eficiente e leve, o processo de dimensionamento do sistema de frenagem de um protótipo baja SAE é composto por diversas fases. Dessa forma, vários passos devem ser seguidos, como, por exemplo, a escolha do material, definição das condições de contorno, dimensionamento estrutural e otimização.

### 2.1 Método de Desenvolvimento

Uma das etapas mais importantes em um projeto é o planejamento. Sendo assim, a definição dos passos do dimensionamento do sistema de freio é de extrema importância. A criação de um fluxograma serve como um direcional, para que o estudo seja eficaz e otimizado, como mostrado na Figura 1. A definição das condições de contorno, que será discutida posteriormente no tópico de cada peça, é de suma importância, pois condições de contorno que não representam de maneira suficiente a realidade resultam em análises falhas. Com a definição das condições de contorno, efetivamente começa a parte dos cálculos, que serão definidos de acordo com os métodos disponíveis para a sua realização. Logo após, acontecerá a interpretação dos resultados e sua discussão, levando à aprovação ou não de cada geometria.

Figura 1 – Passos para dimensionamento



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Após a definição do fluxograma, é necessário analisar as possíveis falhas do subsistema, a fim de que sejam evitadas. Os materiais dúcteis, como os aços, podem falhar por fratura após atingir o limite de escoamento (NORTON, 2013) ou por plastificação generalizada (MEDINA, 2009). Na Tabela 1 são apresentadas as funções de cada componente, bem como seus possíveis modos de falha.

Tabela 1 – Modos de falha

Componente	Função	Modo de falha
Pedal	Receber e transmitir a força aplicada pelo piloto.	Plastificação generalizada.
Eixo de ajuste	Transmitir e ajustar a distribuição de força das <i>barrel nuts</i> .	Plastificação generalizada, fratura.
<i>Barrel nuts</i> e Clévis	Transmitir a força do eixo para as hastes dos cilindros.	Plastificação generalizada.

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

## 2.2 Materiais

Para se selecionar o material dos componentes, deve ser considerado a resistência e o peso, além de diversos critérios relacionados à fabricação e montagem. Para tanto, foram elaboradas as tabelas a seguir para cada componente analisado, nas quais são apresentados os fatores decisivos para a escolha do material a ser empregado. Na coluna Limite de Escoamento, é considerado o valor de cada limite e são atribuídas notas a eles, sendo que quanto maior o limite de escoamento, maior a nota. Na coluna Custo, foi realizado um levantamento de preço para cada material e também foram atribuídas notas, considerando-se as maiores notas para os materiais de menor valor de mercado.

Para a seleção do material do pedal de freio, devemos considerar a relação entre resistência e peso e também o custo. Por ser uma peça que contém soldas, deve-se considerar materiais com boa soldabilidade e cujo limite de escoamento não seja modificado após o processo de soldagem, o que pode ocorrer devido às altas temperaturas atingidas na região de solda (PERINI, 2008). Com isso, a escolha se deu por materiais de Aço Carbono. Na tabela 2 é possível observar a seleção.

Tabela 2 – Seleção de Material para o Pedal

Material	Limite de escoamento [MPa]	Custo	Resultado
Peso	1	1	
Aço SAE 1020 Normalizado	345(6)	10	16
Aço SAE 1040 Normalizado	372(9)	8	17
Aço SAE 1050 Normalizado	427(10)	6	16

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Para a seleção do material do Eixo de Ajuste, devemos considerar a relação entre resistência e peso e também o custo do material. Na Tabela 3, é possível observar a seleção.

Tabela 3 – Seleção de Material para o Eixo de Ajuste

Material	Limite de escoamento [MPa]	Custo	Resultado
Peso	1	1	
Aço SAE 4140 Temperado e Revenido	1138(8)	9	17
Aço SAE 8640 Temperado e Revenido	1.296(9,5)	8	17,5
Aço SAE 4340 Temperado e Revenido	1365(10)	6	16

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Para a seleção do material da Clévis e *Barrel Nuts*, devemos considerar a relação entre resistência e peso e também o custo do material, por ser uma peça que necessita de uma boa usinabilidade. Então, devem-se considerar materiais com baixa dureza. Na Tabela 4, é possível observar a seleção.

Tabela 4 – Seleção de Material para a Clévis e *Barrel Nuts*

Material	Limite de escoamento [MPa]	Custo	Resultado
Latão CA230 Revenido de endurecimento	414(10)	6	16
Alumínio 7075-T651	390(9,5)	8	17,5
Alumínio 6351-T651	260(6,2)	10	16,2

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

### 2.3 Seleção do Método de Cálculo

A tensão equivalente de von-Mises é definida como a tensão de tração uniaxial que criaria a mesma energia de distorção que é criada pela combinação atual das tensões aplicadas. Esse procedimento nos permite tratar casos de tensão multiaxial combinada a tensões de cisalhamento, como se fossem devidos a um carregamento de tração pura. Essa teoria concorda com dados experimentais e, para esse caso, é mais precisa (NORTON, 2013).

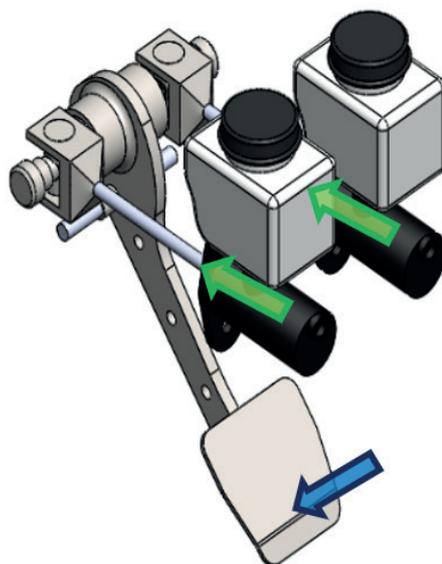
O método numérico de elementos finitos, segundo Norton (2013), divide o componente em um número finito de elementos discretos conectados pelos seus nós (chamados de malha). Com isso, pode-se obter uma aproximação das tensões e deformações, em qualquer parte do componente, para um dado conjunto de condições e de cargas aplicadas em alguns nós da estrutura. O método analítico visa realizar os cálculos através de formulações já existentes e comprovadas.

Para definir o método de dimensionamento estrutural, primeiramente, deve-se considerar a possibilidade de obtenção de uma solução exata através do método analítico, sendo esse método mais indicado para geometrias simples, como vigas, eixos, etc. (NORTON, 2013). Porém, a complexidade de algumas geometrias e condições de contorno pode inviabilizar o método analítico (WEHRMANN, 2012). Nesse caso, o método dos elementos finitos é uma excelente opção, uma vez que é capaz de fornecer boas aproximações de diferentes tipos de resultados (tensão, deformação, etc.) e também pode ser aplicado em diferentes tipos de estruturas (JUVINALL; MARSHEK, 2012).

### 2.3.1 Pedal

O pedal é o componente que estará diretamente em contato com o piloto, pois a força aplicada passa por todo o sistema até ser convertida em torque nas rodas, que é aumentada por uma razão de alavanca e depois dividida entre os dois cilindros-mestres. Cada cilindro-mestre corresponde a um dos eixos. Conforme a Figura 2, a seta azul é a força aplicada pelo piloto e a seta verde é a força resistiva nas hastes dos cilindros-mestres. A segunda ocorre devido ao aumento da pressão na linha de freio durante a compressão do fluido.

Figura 2 – Ilustração do funcionamento Pedal/Balance Bar



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Considera-se falha a situação em que o sistema deixa de cumprir seu requisito funcional, ou seja, deixa de atender e desempenhar a função para a qual foi projetado, podendo ser colocado como a perda da habilidade de executar a função requerida (ROSA, 2002, p. 22).

Para realização do dimensionamento do pedal, deve-se analisar a quantidade de deformação permanente e, posteriormente, realizar análises não lineares, verificando-se o empenamento do componente. Deformações de até 0,2 % não são caracterizadas como falha (JUVINALL; MARSHEK, 2012), portanto incapazes de comprometer o funcionamento do sistema.

A etapa mais importante é ter acesso a informações realistas da força que se está sendo imposta. Sendo assim, testes de bancadas são de extrema importância. Para isso, foi realizado teste de bancada que simula o *cockpit* do veículo e foi realizada a medição através de 20 ensaios com 20 pilotos diferentes, a fim de se buscar a média e a máxima aplicação de força que é transmitida ao pedal. Para o dimensionamento, conexões devem ser feitas, de forma que garanta o real funcionamento. Assim, junções que permitem apenas rotações devem ser colocadas onde seriam os parafusos de fixação do pedal na pedaleira e também no local onde será fixado na estrutura. Além disso, uma junção que simula o funcionamento da *pivot leve* também deve ser colocada.

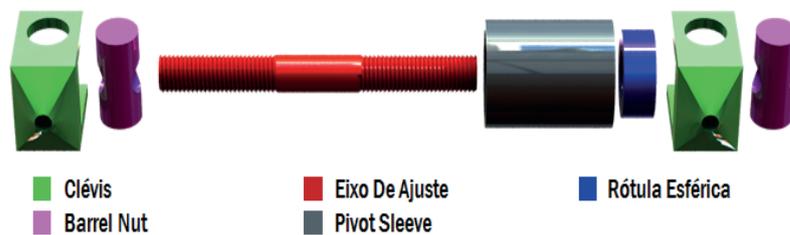
A aplicação da força deve ser realizada de forma que simule a pior condição possível. Sendo assim, o local de aplicação deve ser na parte inferior lateral da pedaleira, tendo nela também uma

componente lateral. Dessa forma, simula-se que o piloto tenha colocado o pé de forma que empurre o pedal lateralmente.

### 2.3.2 Balance Bar

Segundo Wilwood Engineering® (2014), o *balance bar* é uma alavanca ajustável (normalmente uma barra roscada), que pivota em uma rótula esférica e usa dois cilindros-mestres separados para os freios dianteiro e traseiro. A maioria dos *balance bars* são partes de uma composição de pedal que também fornecem uma montagem para os cilindros-mestres. Ela é essencial para o desempenho dinâmico do carro, pois permite ao piloto regular o sistema para a melhor configuração de cada prova. Na Figura 3, é possível visualizar uma vista explodida do componente.

Figura 3 – Vista Explodida *Balance Bar*



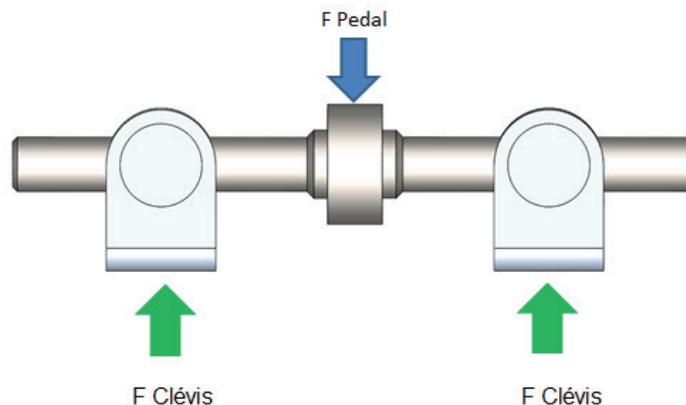
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

#### 2.3.2.1 Eixo de Ajuste

O eixo de ajuste é o componente que sofre a força vinda do pedal, sendo então, transmitida para as clévis. Atua como um regulador, permitindo ajustar a distribuição dos torques de frenagem dos eixos traseiro e dianteiro.

O ajuste é feito de acordo com as distâncias entre a rótula esférica e as duas clévis. Quanto mais próxima à rótula se encontra da clévis que está ligada ao cilindro-mestre do eixo dianteiro, mais força de frenagem terá nele. Isso se aplica também ao eixo traseiro, conforme Wilwood Engineering® (2014). Na Figura 4, é possível visualizar o eixo de ajuste e a forma como ele funciona.

Figura 4 – Diagrama de corpo livre do *balance bar*

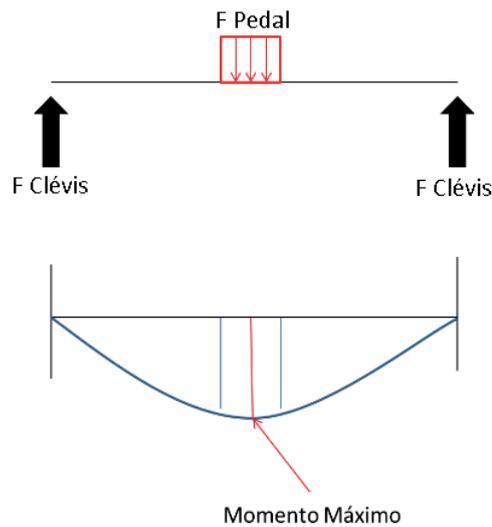


Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Devido à geometria simples do eixo de ajuste, é possível realizar o seu dimensionamento de forma analítica, considerando-o como uma viga bi apoiada que sofre uma força distribuída entre os apoios.

A primeira etapa é realizar o diagrama de força, que deve ser realizado para a regulação mais crítica do eixo. Nesse caso, é quando as clévis se encontram equidistantes do centro. Após isso, deve-se encontrar o momento fletor máximo. Este é o máximo esforço que tende a curvar uma viga. Para isso, o DMF (Diagrama Momento Fletor) é muito importante, conforme Figura 5.

Figura 5 – DMF do eixo de ajuste



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

O limite de escoamento, que é a maior tensão que o material suporta antes de deformar, deve ser maior que a atuante calculada. Para dimensionar a tensão normal máxima, utiliza-se a fórmula de flexão (HIBBELER, 2010, p. 205). Sendo assim, é possível dimensionar o eixo de ajuste, conforme equação (1).

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

Onde:

M = Momento fletor máximo,

c = Distância perpendicular do eixo neutro a um ponto mais afastado do eixo neutro onde a tensão máxima,

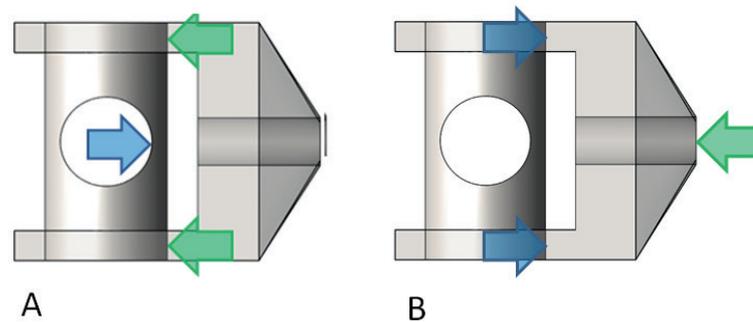
I = Momento de inércia.

### 2.3.2.2 **Barrel Nuts e Clévis**

A *barrel nuts* é o componente que está entre o eixo de ajustes e a clévis, tendo a função de receber a carga distribuída. A clévis é a peça que faz a ligação do sistema de *balance bar* com os cilindros-mestres.

A construção do diagrama de força da *barrel nuts* é semelhante ao eixo de ajuste, porém a força é aplicada no furo vazado, por onde o eixo passa. Os suportes são nas regiões de contato com a clévis. Na Figura 6, é possível visualizar uma exemplificação onde a força é apresentada em azul e os suportes, em verde.

Figura 6 – Diagrama de corpo livre da (A) *barrel nuts* e (B) clévis

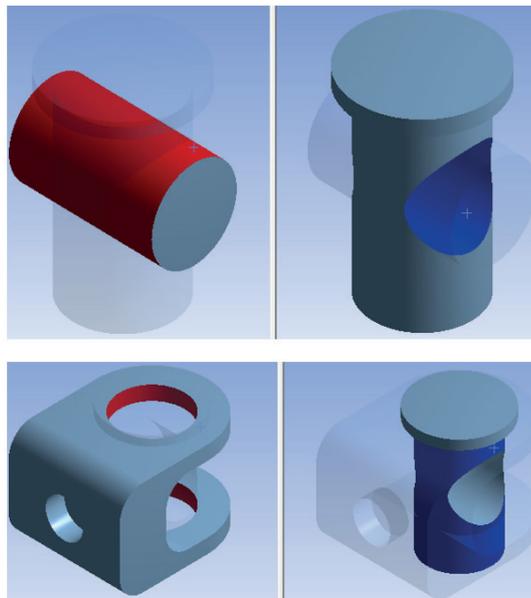


Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

O método utilizado para o dimensionamento da *barrel nuts* e da clévis deve ser o numérico, pois as condições de contorno não podem ser representadas pelo método analítico de maneira fidedigna, sendo a próxima etapa desse dimensionamento o uso do *software* Ansys®, que realiza análises estruturais através do método dos elementos finitos. Deve-se utilizar condições de contorno (força, suportes e contatos) com a maior proximidade da realidade. Para isso, considera-se a situação mais crítica de solicitação. Nesse caso, é quando 70% da força da rótula esférica vai para uma das clévis.

No *software*, regiões de contatos por fricção devem ser adicionados nas áreas de contato das peças, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Regiões de contato entre as peças

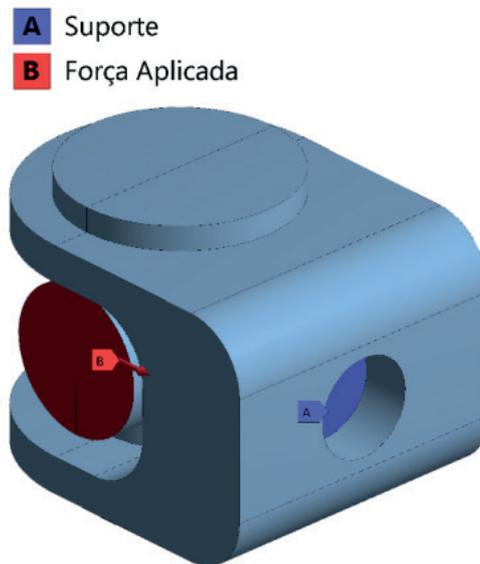


Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

A fim de se obter um bom resultado de tensão com boa precisão, adiciona-se um controle de tamanho de malha nos elementos das regiões de contato, em que essa é refinada até atingir a margem

de erro desejada. Além disso, incluiu-se a força aplicada ao eixo de ajuste e suportes, para restringir movimentos de corpo rígido do modelo. Na figura 8, é possível visualizar essas condições.

Figura 8 – Condições de contorno da *barrel nuts* e da clévis



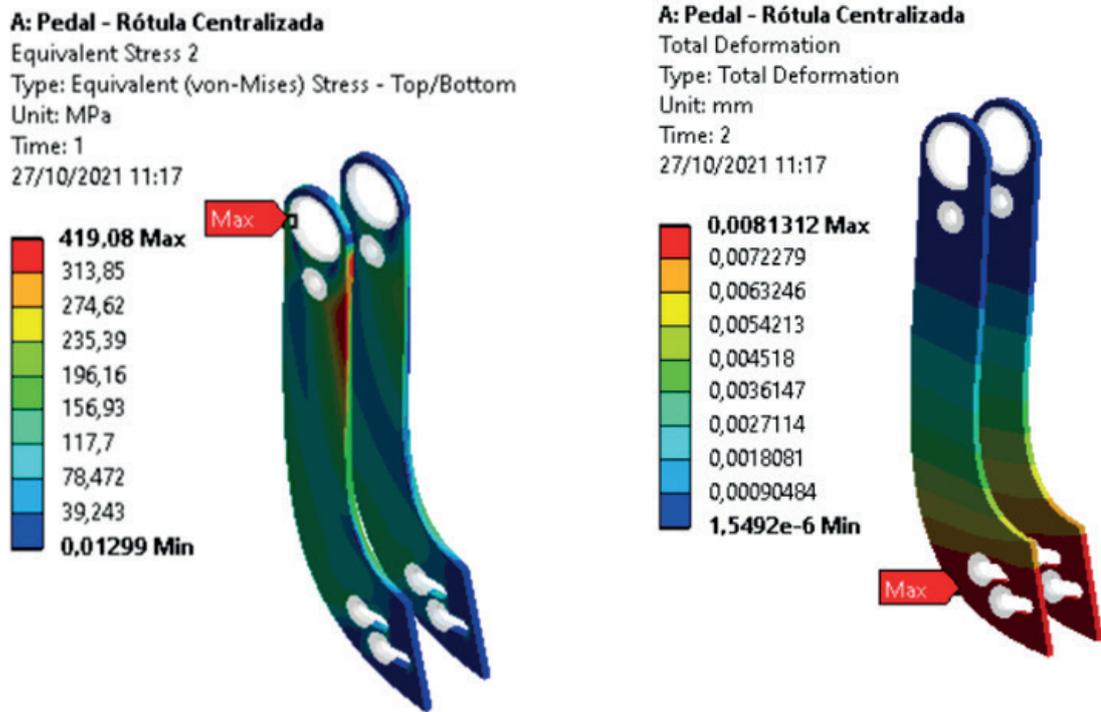
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Resultado Pedal de Freio

Definidos todos os pontos supramencionados na seção 2.3.1, duas soluções foram geradas, conforme Figura 9, com o intuito de se avaliar as tensões resultantes quanto às deformações que o pedal sofreu. Mesmo que a tensão máxima obtida tenha excedido a que o material suporta, a deformação derivada após a retirada da aplicação da força não excedeu o limite definido de 0,2 %.

Figura 9 – Análises Pedal de freio

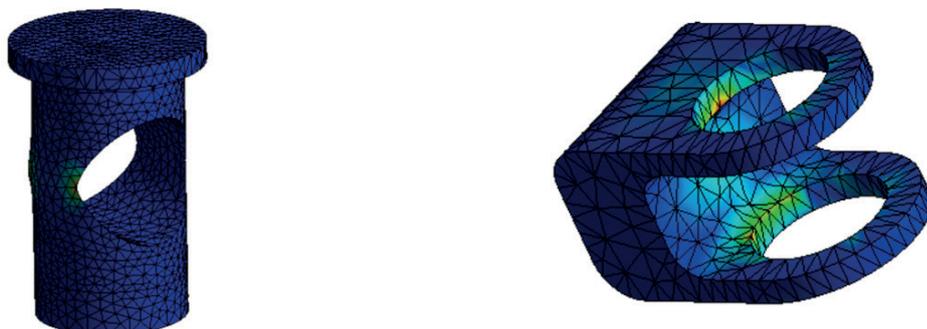


Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

### 3.2 Resultado *Barrel Nuts* e Clévis

Após resolver o modelo, os resultados de tensão equivalente de von-Mises foram interpretados, onde a maior leitura de tensão foi na superfície de contato da *Barrel Nuts* com o eixo de ajuste, Figura 10.

Figura 10 – Distribuição de tensões de von-Mises da (A) *barrel nuts* e da (B) clévis



Fonte: Elaborado pelos autores, 2020

### 3.3 Resultados conjunto

Com base nas análises mostradas neste artigo, podemos verificar os resultados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado dos dimensionamentos

Peça	Material	Fs	Massa [g]
Pedal	Aço 1045 normalizado	0,95	934
Eixo de ajuste	Aço SAE 8640 temperados e revenido	1,10	133
Conjunto <i>Barrel nuts</i> e <i>clévis</i>	Alumínio 7075-T651	1,70	134

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Ao verificarmos o dimensionamento, é possível visualizar que os componentes tiveram um resultado que satisfaz as condições para sua utilização. Assim, observa-se a importância de se seguir os critérios para o dimensionamento, buscando sempre que a peça satisfaça a pior condição de uso.

Observa-se que o conjunto ficou pesando, ao total, 1,13 kg, tendo fatores de segurança superiores a 1 para o eixo de ajuste, *barrel nuts* e *clévis*, caracterizadas como peças seguras. Para o pedal, a deformação que lhe irá ocorrer será inferior a um milímetro, o que significa que não irá interromper no funcionamento da peça, pois, mesmo que haja desconformidade no componente, este conseguirá cumprir a função de realizar a frenagem.

## 4 CONCLUSÃO

Observando-se as peças analisadas neste artigo, percebe-se que elas atingem o objetivo de serem seguras e confiáveis para o seu uso em competições com veículos *off-road* tipo baja, onde obtivemos um conjunto *Balance Bar* (Eixo de Ajuste, *Clévis* e *Barrel Nuts*) e Pedal de freio com resultados que não apresentaram falhas, porém melhoras podem ser buscadas através de alívios de massa que não comprometam a estrutura das peças. Esses alívios podem ser caracterizados nas áreas em que a solicitação é menor e devem ser realizados de forma a não gerarem grandes concentradores de tensão. Dessa forma, diminui-se a massa sem afetar a confiabilidade.

## REFERÊNCIAS

- HIBBELER, Russell C. **Resistência dos materiais**. 7.ed. São Paulo SP: PEARSON, 2010.
- LIMPERT, R. **Brake Design e Safety**, 2.ed. Warrendale, SAE International, 1999.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of machine component design**. 5th ed ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012.
- MEDINA, J. **Procedimento para Avaliação da Integridade Estrutural em Máquinas de Levantamento e Movimentação de Materiais**. Rio de Janeiro: Pontífica Universidade Católica, 2009.
- NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4.ed. Porto Alegre RS: Bookman, 2013.

PERINI, F. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2008.

ROSA, Edison. **Análise de Resistência Mecânica: Mecânica da Fratura e Fadiga**. Santa Catarina RS: Grante, 2002.

SILVA, Emílio Carlos Nelli. **Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas**. São Paulo: Escola Politécnica da USP. 2009.

WEHRMANN, T. **Dimensionamento de um mecanismo pantográfico utilizando método analítico e elementos finitos**. Panambi: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio grande do Sul, 2012.

WILWOOD ENGINEERING. **Brake Pedal and Balance Bar Instruction Guide**. Camarillo, 2014.