

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO DE UM *PEDALBOX* PARA FORMULA SAE

por

Gustavo Luiz Zeidler

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Zeidler, Gustavo Luiz
PROJETO DE UM PEDALBOX PARA FORMULA SAE / Gustavo
Luiz Zeidler. -- 2021.
27 f.
Orientador: Felipe Tempel Stumpf.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Formula SAE. 2. Veículo. 3. Simulação
computacional. 4. Pedalbox. I. Tempel Stumpf, Felipe,
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gustavo Luiz Zeidler

PROJETO DE UM *PEDALBOX* PARA FORMULA SAE

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, novembro de 2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais que sempre me apoiaram e fazem parte desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Aos colegas de aula, pelo apoio e troca de conhecimento ao longo do curso.

À equipe RS Racing UFRGS e seus membros, por me ensinarem a importância do trabalho em grupo e por me proporcionarem conhecimento de engenharia e automobilismo.

Aos colegas da Expert Racing Parts, pelo profissionalismo e dedicação.

À Priscila, em especial, por me apoiar em todos os momentos.

ΕΠΙΓΡΑΦΕ

*All models are wrong
but some models
are useful.*

George E. P. Box

Zeidler, Gustavo Luiz. **Projeto de um *pedalbox* para Formula SAE**. 2021. 27 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

Este trabalho visa documentar as etapas de projeto e melhoria de um *pedalbox* voltado para a aplicação em um protótipo monoposto da equipe de Formula SAE da universidade. A partir de um estudo prévio do sistema já construído e utilizado no veículo, constata-se um deslocamento excessivo do pedal de freio. Consequente estabelece-se novas diretrizes e uma metodologia para um novo sistema. Através de uma nova proposta a geometria foi desenhada e simulada computacionalmente a fim de comparar o deslocamento total da estrutura, que foi um inconsistência no sistema anterior. As condições de operação do *pedalbox* partem de um regulamento internacional que coordena a competição de Formula SAE, objetivando a construção deste projeto em conjunto com o restante do veículo. As simulações acontecem a partir da comparação do deslocamento da nova geometria e o sistema. A nova geometria permite ainda a avaliação de tensões, redução de massa e de custos.

PALAVRAS-CHAVE: veículo, Formula SAE, simulação computacional, *pedalbox*.

Zeidler, Gustavo Luiz. **Design of a pedalbox for Formula SAE**. 2021. 27 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

This work aims to document the design and improvement steps of a pedalbox aimed at application in a single-seat prototype from the university's Formula SAE team. From a previous study of the system already built and used in the vehicle, an excessive displacement of the brake pedal can be seen. Consequently, new guidelines and a methodology for a new system are established. Through a new proposal, the geometry was designed and computationally simulated in order to compare the total displacement of the structure, which was an inconsistency in the previous system. The pedalbox operating conditions are based on an international regulation that coordinates the Formula SAE competition, aiming to build this project together with the rest of the vehicle. The simulations take place by comparing the displacement of the new geometry and the system. The new geometry also allows the evaluation of stresses, mass and cost reduction.

KEYWORDS: vehicle, Formula SAE, computer simulation, pedalbox.

NOMENCLATURA

Símbolos

a	Comprimento de aresta	[mm]
C	Constante numérica	[Adimensional]
dcm	Distância entre os cilindros mestre	[m]
$dcmd$	Distância entre o cilindro mestre dianteiro e a rótula	[m]
$dcmt$	Distância entre o cilindro mestre traseiro e a rótula	[m]
$Fcmd$	Força de reação do cilindro mestre dianteiro	[N]
$Fcmt$	Força de reação do cilindro mestre traseiro	[N]
Fp	Força aplicada pelo piloto	[N]
$Fp lp$	Força resultante da alavanca do pedal de freio	[N]
hb	Dist. entre o eixo de pivotamento e o ponto de fixação do <i>brake balance bar</i>	[m]
hp	Dist. entre o eixo de pivotamento e o ponto de aplicação da força pelo piloto	[m]
lp	Razão de alavanca do pedal de freio	[Adimensional]
q	Qualidade	[Adimensional]
V	Volume	[mm ³]

Símbolos gregos

σ	Tensão equivalente de von Mises	[MPa]
----------	---------------------------------	-------

Abreviaturas e acrônimos

3D	Três dimensões
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al	Alumínio
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
MEF	Método dos elementos finitos
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

SUMÁRIO

NOMENCLATURA.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
3.1 Dispositivo de acionamento.....	3
3.2 Estruturas do <i>pedalbox</i>	3
3.3 Método dos elementos finitos.....	4
3.4 Análise de viabilidade.....	5
4. ESTUDO DE CASO.....	5
4.1 Matriz de decisão.....	5
4.2 Novo projeto.....	6
4.3 Forças de atuação	7
4.4 Simulação computacional.....	8
4.4.1 Propriedades dos materiais.....	8
4.4.2 Geração de malha.....	8
4.4.3 Condições de contorno e simplificações.....	9
5. RESULTADOS.....	9
5.1 Tensão.....	9
5.2 Deslocamento.....	14
6. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
APÊNDICE A.....	17

1. INTRODUÇÃO

Dentro do panorama das competições automobilísticas, a Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade (SAE, na sigla em inglês de *Society of Automotive Engineers*) desenvolve uma competição de engenharia. O Brasil conta com uma etapa nacional e envolve acadêmicos de diversas universidades. A competição consiste no desenvolvimento de um veículo monoposto do tipo Formula, onde é avaliado o projeto, execução e o desempenho em pista, desta maneira dividindo a competição em provas estáticas e dinâmicas. As premissas da competição demandam um veículo de lazer de baixo custo, baixo peso e também de baixo consumo de combustível. Assim, essa competição de engenharia expõe os estudantes a condições reais de planejamento e trabalho, exigindo a aplicação de conhecimento obtido afim de que possam melhorar o seu entendimento sobre a engenharia e suas aplicações.

Um veículo é composto de diversos sistemas de funcionalidades distintas que lhe permite cumprir sua função de forma eficiente e segura. Alguns desses sistemas tem interação direta ou indireta com o piloto, que podem ser classificados como ativos ou passivos. Os sistemas ativos atuam na prevenção e redução de acidentes. Os passivos são acionados apenas caso estes ocorram e buscam amenizar danos à integridade física do condutor, passageiros e pedestres (GARRETT; NEWTON; STEEDS, 2001, p. 924). O sistema de freios é um sistema ativo e de acordo com tal característica sua utilização depende exclusivamente do condutor.

Em veículos de competição é comum a utilização de uma estrutura chamada de *pedalbox* e é encontrada fixada ao chassi. Consiste de uma montagem de diversos componentes contendo pedais de aceleração, frenagem e embreagem – este último pode ser omitido dependendo da intenção de projeto. Esta estrutura pode ser construída de tal forma que permita o ajuste de posição dando maior liberdade de instalação. O *pedalbox* pode vir ainda com um ajuste de *bias* de freio, permitindo o balanço de força aplicada no pedal de freio transmitida para o sistema de freios dianteiro e traseiro. O modelo utilizado pela equipe RS Racing UFRGS encontra-se na Figura 1. É possível observar o pedal de aceleração e o de frenagem. As duas tiras laterais são soldadas ao chassi e o sistema desliza por entre essas tiras.

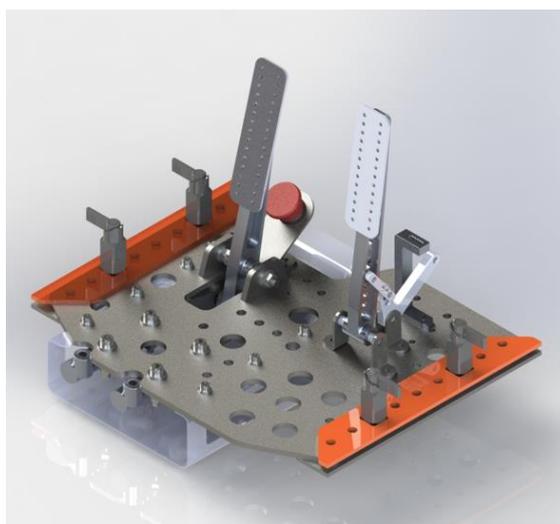


Figura 1 – Desenho 3D do *pedalbox* com pedais de aceleração e frenagem.

A própria equipe projetou e construiu o sistema, bem como a escolha de diversos componentes indexados à estrutura. Motivados pela liberdade de se conseguir um ajuste de pedais na posição longitudinal do veículo, o sistema foi fixado ao chassi de forma que deslizasse

por dois pares de tiras de aço – em laranja na figura. Adaptado da NR 17 – Ergonomia (2018, p. 6), onde está exposto que “o posto de trabalho deve atender às características antropométricas de 90% dos trabalhadores”, esse ajuste de posição objetiva atender esta porção de população, melhorando o projeto no quesito ergonomia. Demais componentes foram fixados ao *pedalbox* como os cilindros mestre de forma articulada com o pedal de freio. Dessa forma a estrutura como um todo deve suportar um carregamento durante a frenagem. Este carregamento decorre quando o piloto pisa no pedal de freio.

De acordo com o regulamento da competição “o projeto do pedal de freio e seu sistema de componentes associados deve suportar um carregamento de 2000N sem nenhuma falha do sistema de freio ou *pedalbox*” (SAE Internacional, 2021). Dessa forma os projetos podem partir de uma condição inicial estabelecida. Entretanto, o regulamento também diz que este carregamento não é um critério de projeto, ou seja, não será exigido nenhum documento que comprove o projeto para esta carga específica, mas o sistema de freio deve ser testado por um membro oficial SAE durante a competição com a máxima força quando na posição de pilotagem. Este teste acontece durante a inspeção técnica.

A equipe reportou certa flexibilidade no sistema atual através de um teste prático feito na oficina. O teste foi feito com um dos integrantes sentado na posição de pilotagem dentro do protótipo aplicando a máxima carga possível no pedal de freio. A avaliação do deslocamento do pedal foi feita de maneira visual. Tal comportamento não é desejado, pois o pedal de freio não deve ser rotacionado além do seu curso estipulado. Essa flexibilidade poderia ser em decorrência do material e projeto utilizado.

2. OBJETIVO

O trabalho realizado apresenta métodos de engenharia para avaliar a rigidez da atual estrutura. Esta análise será feita via *software* de elementos finitos, Ansys Mechanical, onde, a partir das condições de contorno e propriedades dos materiais, é possível avaliar deslocamento e tensão. A análise de custos e massa também deve ser feita levando em conta que o veículo terá maior aceleração, e por consequência melhor desempenho em pista, mas sem extrapolar a viabilidade do projeto. Dessa forma temos que:

- **Objetivo geral:** redução de massa do conjunto sem comprometer o deslocamento do pedal de freio e o custo do projeto.

- **Objetivo específico:** aplicar método de elementos finitos para avaliar deslocamentos e tensões na estrutura atual, definição do novo projeto através de uma matriz de decisão e avaliar tensões e deslocamentos na estrutura proposta.

3. FUNDAMENTAÇÃO

O objeto de estudo para avaliação é o *pedalbox*, e este é fragmentado em diversos componentes. A Figura 2 mostra o sistema em fase de construção.

Observa-se o encaixe da chapa base nos dois pares de tiras soldadas ao chassi. Esta função é essencial para garantir ergonomia ao piloto pois dessa forma é possível ajustar o posicionamento conforme necessidade. O sistema de freio possui ainda o *brake over travel*, que trata-se de um botão do tipo cogumelo funcionando como chave geral para a elétrica do carro. Dessa forma, caso o pedal de freio falhe, o carro tem o consumo de combustível interrompido pelo desligamento da bomba de combustível. Este último componente pode ser acionado caso o pedal avance demais, ocasionando o desligamento do veículo.

O entendimento do funcionamento dos componentes e a interação entre eles é essencial para elencar as decisões de projeto. A seguir serão apresentados os principais componentes.

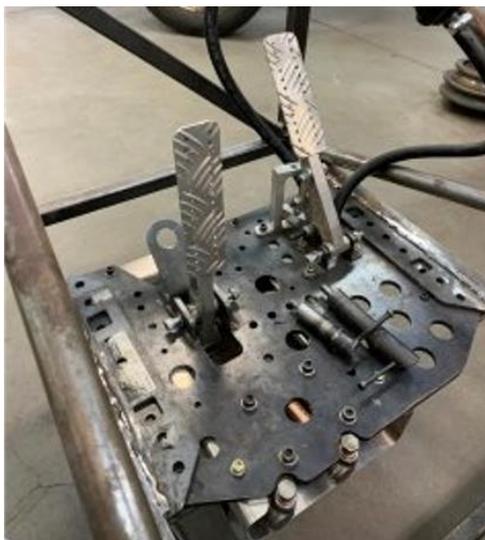


Figura 2 – Projeto semiacabado e instalado no protótipo da equipe.

3.1 Dispositivo de acionamento

O dispositivo de acionamento é composto por 3 itens principais: o pedal de freio, o *brake balance bar* e os cilindros mestre. O pedal de freio conta com uma geometria que permite um giro em torno do ponto de pivotamento e transmita a força aplicada pelo piloto no ponto de fixação dos cilindros mestre e funciona como uma alavanca geradora de ganho mecânico.

Os veículos com sistemas de freio hidráulico manual devem possuir dois circuitos independentes, para o caso de um deles falhar. Isso é uma questão de regulamentação legal (BOSCH, 2004, p. 805). Dessa forma é necessário ajustar a distribuição de força de entrada entre os circuitos. Um método para estes sistemas de freio é utilizar dois cilindros mestre – um para a dianteira e outro para a traseira, e um *brake balance bar*. Este método é ajustável e permite modificar a condição de equilíbrio e, por consequência, a porção de força desejada para cada cilindro mestre. Os parâmetros geométricos envolvidos no ganho mecânico do pedal de freio, bem como os parâmetros geométricos e forças principais do *brake balance bar* são mostrados na Figura 3.

3.2 Estruturas do *pedalbox*

A montagem do *pedalbox* foi planejada para ser feita de forma independente do restante do protótipo. Este conceito está presente na engenharia modular. Dessa forma, um componente estrutural foi elaborado e nele as demais partes devem ser indexadas para posteriormente ser montado no veículo.

O *pedalbox* é composto por diversos componentes e estes são fixados a uma estrutura que cumpre funções de comportar estes componentes de forma segura. Ainda, o sistema deve transladar no interior do chassi para ajuste de posicionamento sem colidir quaisquer itens no interior do veículo.

Diversos modelos são possíveis para esta estrutura, desde chapas cortadas a *laser*, ou usinadas, até estruturas fundidas em alumínio, por exemplo. Cabe um estudo detalhado para considerar qual modelo é mais viável em termos de custos, facilidade de obtenção e fabricação, massa final e rigidez estrutural.

h_p – distância entre o eixo de pivotamento e o ponto de aplicação da força pelo piloto (m)

h_b – distância entre o eixo de pivotamento e o ponto de fixação do brake balance bar (m)

l_p – razão de alavanca do pedal de freio

F_p – força aplicada pelo piloto (N)

$F_p l_p$ – força resultante da alavanca do pedal de freio (N)

d_{cm} – distância entre os cilindros mestre (m)

d_{cmd} – distância entre o cilindro mestre dianteiro e a rótula (m)

d_{cmt} – distância entre o cilindro mestre traseiro e a rótula (m)

F_{cmd} – força de reação do cilindro mestre dianteiro (N)

F_{cmt} – força de reação do cilindro mestre traseiro (N)

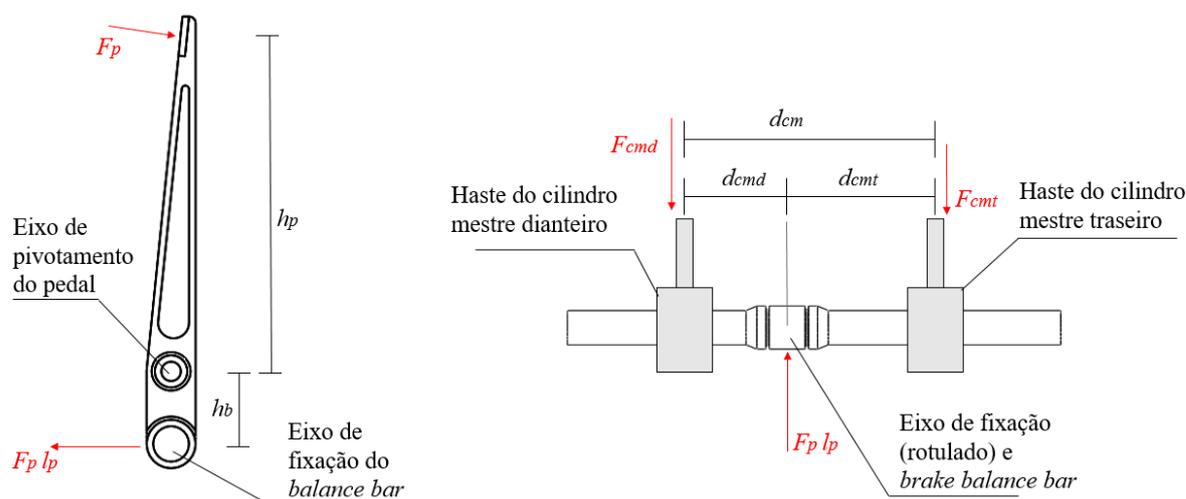


Figura 3 – Forças e geometria do pedal de freio juntamente com parâmetros geométricos e forças do brake balance bar

3.3 Método dos elementos finitos

Atualmente diversos *softwares* de método dos elementos finitos (MEF), estão disponíveis no mercado e nesses *softwares* é possível criar ou montar um programa de elementos finitos. Trata-se de um código computacional, projetado para ser usado na solução de certa classe de problemas e que contém uma estrutura mínima. Todo programa de elementos finitos deve ter pelo menos cinco etapas, quais sejam: a entrada de dados, a superposição de matrizes e vetores do elemento, a imposição das condições de contorno, a solução do sistema de equações e a saída de dados (FONSECA, 2002, p. 26).

A saída de resultados pode ser feita apenas pela impressão de números, que devem ser interpretados pelo usuário. No entanto, cada vez mais os *softwares* trazem uma interface amigável ao usuário, possibilitando a entrada de dados de forma facilitada e saídas gráficas, que facilitam e aceleram o uso e interpretação dos resultados. Deve-se aqui citar o uso intensivo de programas de elementos finitos no campo de CAE/CAD/CAM, tornando-se a saída gráfica um imperativo.

Em simulações computacionais geralmente são realizadas algumas simplificações que são comuns aos *softwares*. As forças de corpo podem ser desconsideradas – como por exemplo a força gravitacional ou eletromagnética, visto que estas podem apresentar magnitudes muito inferiores ao caso de estudo. Na área de mecânica dos sólidos pode-se considerar o modelo constitutivo elástico linear, onde as cargas não causam qualquer deformação permanente nos componentes. O modelo elástico linear também considera que a resposta induzida é proporcional às cargas aplicadas – princípio da superposição. Também pode-se considerar

modelos de placas – estado plano de tensão, onde uma dimensão é muito menor que as outras duas. Ainda é possível considerar grandes deformações.

A *software* utilizado para as simulações é o Ansys Mechanical versão R18.1. A geração de malha é feita de forma automática através de uma varredura do volume do componente ou montagem e por padrão utiliza o elemento hexaédrico. Em corpos onde a varredura é dificultada, ou quando a malha de elementos hexaédricos está mal resolvida, utiliza-se o elemento tetraédrico.

Para a construção da malha é possível escolher elementos de ordem linear ou superiores. Elementos de ordem linear podem fornecer resultados precisos dependendo da malha utilizada, e tem um custo computacional razoável. Contudo, deve-se evitar o seu uso em regiões críticas, que podem causar a sua distorção, como em regiões curvas e por esse motivo é indicado para solução de placas na maioria das vezes. Já elementos quadráticos se comportam melhor em regiões curvas, onde elementos lineares ficariam distorcidos.

Um parâmetro fundamental diz respeito à qualidade da malha obtida. O Ansys utiliza a Equação 1 para o cálculo da qualidade q [adm] de elementos tridimensionais.

$$q = C \left[\frac{V}{\sqrt{(\sum a^2)^3}} \right] \quad (1)$$

onde V é o volume do elemento [mm], a é o comprimento das arestas [mm] e C é uma constante [adm] que depende do tipo de elemento. Para elemento tetraédrico C vale 124,70765802 e para elemento hexaédrico tem-se o valor de 41,56921938. Dessa forma o valor da qualidade varia entre 0 e 1. O valor 0 indica uma qualidade ruim. O valor 1 indica um cubo perfeito, significando uma qualidade ótima de elemento.

É importante salientar que o quanto mais de considerações, maior o custo computacional. Este custo também está relacionado a geração de malha e, principalmente, na geração de regiões de contato. Os parâmetros deste capítulo são avaliados para a configuração da simulação.

3.4 Análise de viabilidade

Um projeto é executado com segurança quando uma série de considerações são feitas. A análise de viabilidade pode ajudar a decidir quais passos seguir na execução de um projeto. Uma das maneiras de se chegar a uma solução é por uma matriz de decisões. Esta matriz elenca parâmetros de comparação para diferentes soluções. Através da soma de importâncias é possível decidir sobre um projeto ou método com mais segurança.

A proposta deste trabalho é projetar uma nova estrutura para o *pedalbox*. Os parâmetros de comparação são fornecidos de acordo com a realidade da equipe e as opções disponíveis no mercado.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Matriz de decisão

A Tabela 1 mostra os parâmetros de projeto considerados e as opções disponíveis levando em conta diferentes materiais e processos de fabricação. As notas são dadas de 1 a 5 onde 1 significa indesejável e 5 significa desejável.

Tabela 1 – matriz de decisão para a solução da estrutura do *pedalbox*

	Al 7075-T6 usinado	Fundição em alumínio	Placa de aço AISI 1020	Tubos de aço AISI 1020
Custo	2	1	4	5
Facilidade de obtenção	3	1	5	5
Facilidade de fabricação	2	1	5	3
Massa final	5	5	2	5
Rigidez à flexão	5	4	3	5
Total	17	12	19	23

Foram consideradas 4 soluções para a nova estrutura baseado nas possibilidades de atender aos requisitos do projeto. O primeiro material é uma liga de alumínio 7075-T6 é um material utilizado na aeronáutica e alia excelentes propriedades de resistência mecânica e baixo peso. Entretanto seu custo se torna elevado por conta da liga em si. O seu processo de fabricação por usinagem dificulta por conta da disponibilidade de máquinas operatrizes para a equipe. A fundição em alumínio foi considerada pela possibilidade de se obter uma estrutura leve e uma liberdade na geometria, porém se torna inviável pela necessidade de um molde e pela dificuldade de controle no processo de fabricação por fundição. A placa de aço foi considerada novamente e obteve uma pontuação razoável, entretanto sua massa final não condiz com os requisitos de um projeto mais leve. Por fim os tubos de aço receberam a maior pontuação. A união dos tubos pode ser realizada através de soldagem.

A decisão final é pelos tubos de aço e serão de perfis comerciais. Dois perfis serão utilizados, um perfil de tubo redondo de 31,75mm (medida comercial de 1.1/4”) e 3mm de espessura e tubo com perfil retangular de 30x20mm e 2mm de espessura de parede. Também serão utilizadas chapas de aço cortadas a *laser* de forma a suprir as condições geométricas de fixação dos elementos e posicionamento no interior do chassi.

4.2 Novo projeto

Atualmente a estrutura é composta por uma chapa de aço AISI 1020 cortada a *laser* e 4,75mm de espessura e tem aproximadamente 4,1kg. Foi escolhida por conta da facilidade de obtenção e pelo seu baixo custo, além da liberdade de desenho da sua geometria, pois diversos componentes devem fixados e/ou passar por ela sem colisão durante a montagem e seu uso. Essa estrutura ainda deve fornecer rigidez suficiente para suportar o carregamento no pedal de freio em condições extremas.

Em uma versão anterior à atual, utilizava-se uma chapa mais fina e com recorte ligeiramente diferente do atual. Em um dos testes feitos pela equipe, o pedal de freio acabou por atingir um curso além do esperado. Esta anomalia poderia estar relacionada com a falta de rigidez da estrutura, indicando que uma placa não seria um conceito estrutural adequado, afinal placas não são indicadas para trabalhar com flexão. Por conta desse problema, o recorte foi alterado e a sua espessura ficou maior. Contudo, a sua massa ficou maior, porém o problema da rigidez foi sanado. A Figura 5(a) mostra a estrutura atual e a Figura 5(b) mostra a nova proposta redesenhada com tubos de perfil redondo e retangular.

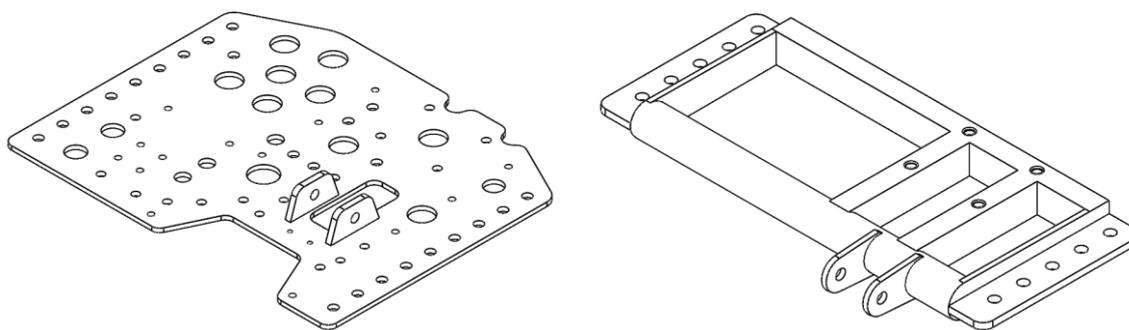


Figura 5 – (a) Chapa base atual; (b) Nova proposta de estrutura

Uma nova proposta de estrutura foi estabelecida. Com a premissa de simplesmente ser uma substituição da estrutura atual, alguns parâmetros geométricos se mantiveram para que não houvesse modificação nos demais itens do protótipo. O novo modelo possui uma massa estimada de 2,5kg.

Ainda cabe nessa seção uma análise sobre possíveis reforços que podem ser feitos na chapa de aço. A utilização de tiras soldadas a 90° na chapa, bem como a criação de vincos no processo de dobra podem conferir uma maior rigidez mesmo com uma espessura menor. Entretanto devido a necessidade de facilidade de fabricação – e também a adaptabilidade do projeto, os perfis tubulares prevaleceram. É imperativo a redução de massa neste projeto.

4.3 Forças de atuação

O sistema de freios hidráulicos compõem o veículo em questão e consiste na utilização da força do piloto como suprimento de energia e fluido como meio de transmissão. A Figura 6(a) mostra a vista inferior, ilustrando o mecanismo de acionamento dos cilindros mestre e a Figura 6(b) a estrutura na vista lateral.

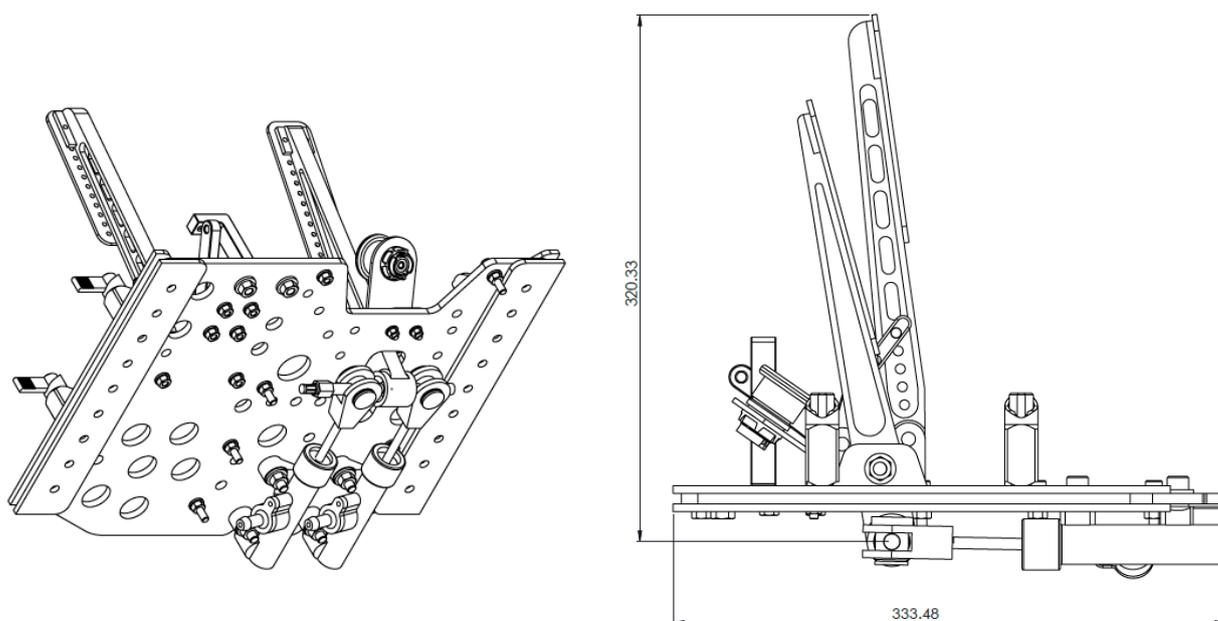


Figura 6 – (a) vista auxiliar mostrando o mecanismo de acionamento dos cilindros mestre;
(b) vista lateral do pedalbox

Para fins de padronização, o presente projeto é desenvolvido para o carregamento de 2000N em uma das faces do pedal de freio. Esta carga é recomendada pelo regulamento da competição. O autor conclui que esta força está condizente com a capacidade de aplicação por um ser humano com certa margem de segurança em uma situação de uso extremo – acidente ou perda de controle do veículo.

4.4 Simulação computacional

As simulações computacionais envolvem dois sistemas submetidos às mesmas condições de contorno. Dessa forma é possível aferir as melhorias no novo projeto. Fazem parte da montagem o pedal de freio e o pino fixo do pedal de freio – mencionados anteriormente no item 3.1 – dispositivos de acionamento. Duas possíveis estruturas serão simuladas, o Projeto atual, que encontra-se instalado no protótipo e o Novo projeto, com um novo modelo sugerido de geometria.

4.4.1 Propriedades dos materiais

A Tabela 2 resume o material de cada componente, bem como os valores do módulo de elasticidade, tensão de escoamento e coeficiente de Poisson.

Tabela 2 – Materiais utilizados nos componentes

	Material	Módulo de elasticidade	Tensão de escoamento	Coefficiente de Poisson
Pedal de freio	Al 7075-T6	71,7GPa	503MPa	0,33
Pino	AISI 4340 normalizado	200GPa	972MPa	0,29
Chapa base/ Novo projeto	AISI 1020	186GPa	250MPa	0,29

4.4.2 Geração de malha

O elemento escolhido foi o hexaédrico de ordem quadrática por conta da geometria presente no sistema. Foi realizado um refinamento da malha com tamanho entre 1,5mm e 1,8mm em todos os componentes. Na Figura 6 é possível ter uma ideia da dimensão dos componentes. A Tabela 3 mostra de forma resumida o estado final da malha.

Tabela 3 – Comparativo de malha gerada nos dois sistemas

	Projeto atual	Novo projeto
Elementos	201380	156528
Número de nós	758734	690188
Qualidade da malha	0,74 [adm]	0,79 [adm]
Tamanho	1,5mm - 1,8mm	1,5mm - 1,8mm
Massa do sistema	4,1kg	2,5kg

A qualidade da malha é um parâmetro visto na seção 3.3 – Método dos elementos finitos. Dessa forma é feito uma média da qualidade de todas as métricas de elementos presentes na malha.

4.4.3 Condições de contorno e simplificações

Por motivos de simplificação, apenas 3 elementos estruturais compõem a simulação, o pedal de freio, o pino fixo do pedal e a estrutura a ser avaliada. A Figura 7 mostra as condições de contorno aplicadas em ambos os sistemas.

É possível observar os suportes fixos nas laterais, bem como a força de 2000N aplicada na face superior do pedal. Nesta posição o pedal encontra-se no fim de curso livre e a partir daí a pressão é imprimida nas linhas de freio

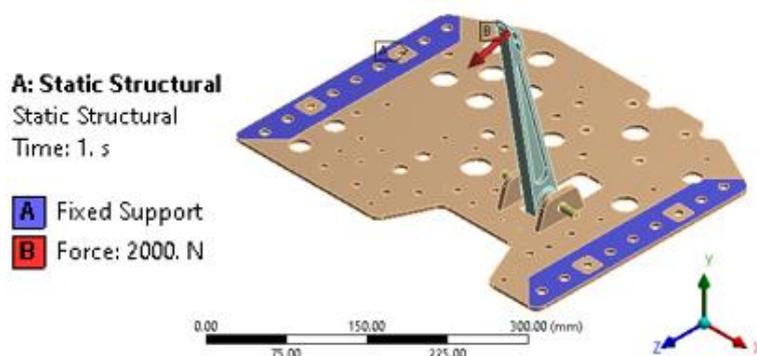


Figura 7 – Condições de contorno

. Na Figura 8 observa-se a região de contato por revolução, onde o pedal de freio fica livre para rotacionar em torno do eixo do pino de fixação. O restante dos componentes de acionamento do freio deram espaço à simplificação mostrada na mesma figura. Foi feito o contato da região cilíndrica do *brake balance bar* com os 4 pontos de fixação dos cilindros mestre. Ali foi criado um elemento rígido, ou seja, não apresenta deformação alguma sob qualquer carregamento. A título de referência é o elemento MPC184 do Ansys Mechanical. Foi utilizado para criar uma restrição rígida entre os dois corpos. Este elemento pode ser configurado, mas por padrão permite 3 graus de liberdade. Nas simulações foi utilizado 6 graus de liberdade.

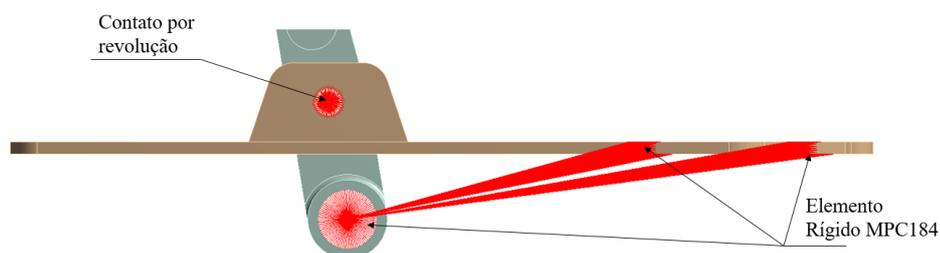


Figura 8 – Simplificações adotadas, regiões de contato e elemento rígido.

5. RESULTADOS

5.1 Tensão

As análises de tensão equivalente de von Mises são importantes para verificar se não haverá nenhuma inconformidade levando em conta as propriedades dos materiais usados. A Figura 9 mostra a simulação do sistema atual, com a chapa. Por definição o *software* não permite alterar

os valores máximos e mínimos na escala de cores. Porém as cores dentro deste intervalo são ajustáveis. Com escala de tensão ajustada para 250MPa é possível ver apenas alguns pontos acima deste valor (região vermelha).

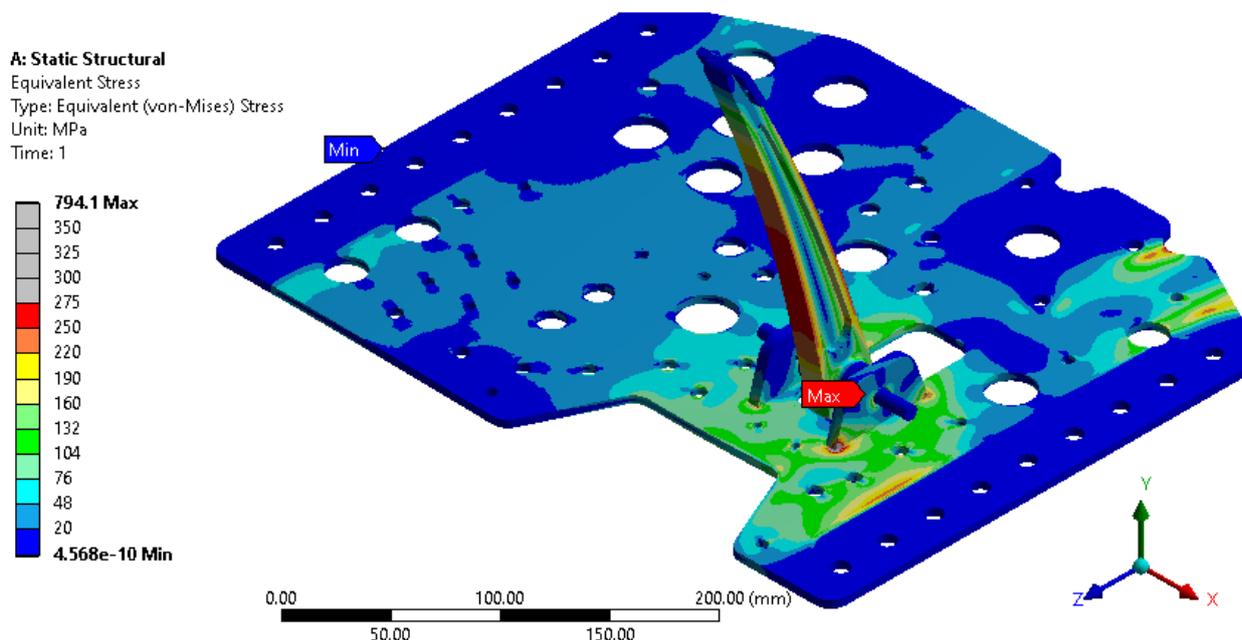


Figura 9 – Resultados de tensão do sistema com a chapa.

A Figura 10 mostra a parte posterior do sistema com medidas de tensões mostradas em regiões de concentração de tensão. Os valores seguem plotados de forma que valores acima da tensão de escoamento da chapa de aço, 250MPa, fiquem em cinza. A partir daí é possível perceber a distribuição de tensões em torno das regiões com concentradores de tensão. Demais componentes estão igualmente plotados e podem ser comparados de acordo com a Tabela 2 – Materiais utilizados nos componentes. Vale ressaltar que as regiões em cinza podem apresentar valores muito acima da tensão de escoamento do material.

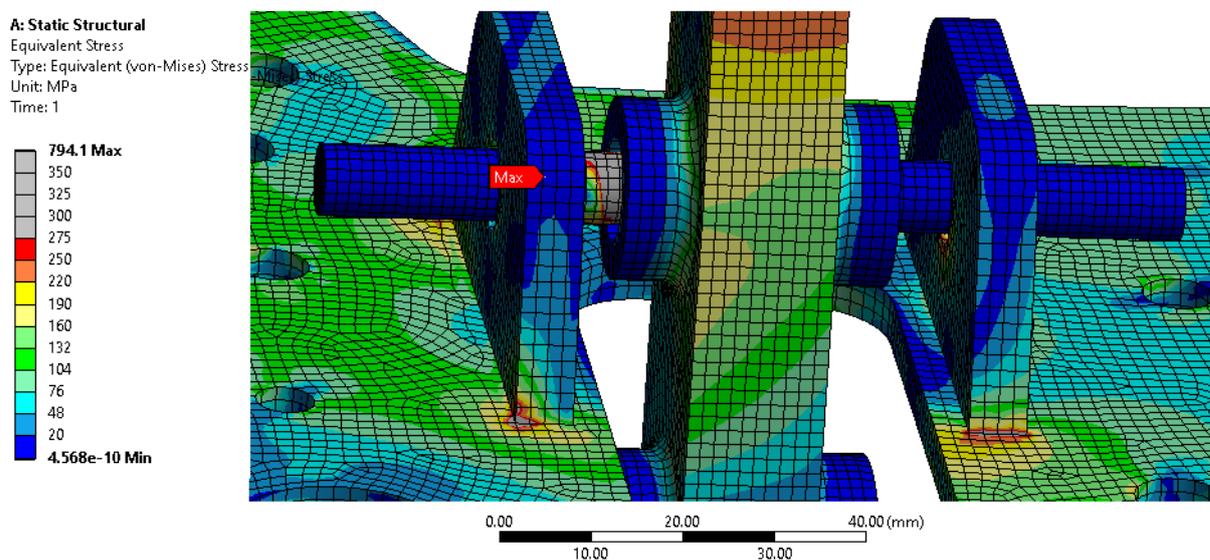


Figura 10 – Valores de tensão em regiões com concentradores de tensão.

Olhando com mais detalhe, e ajustando os valores na escala de cores automática no *software*, é possível observar regiões de concentração de tensão com mais detalhe. A Figura 11 traz o ponto de concentração de tensão no pino do eixo fixo do pedal com 794MPa. Este valor de tensão pode ser negligenciado por conta do decréscimo observado nas regiões adjacentes. É comum este tipo de resultado em regiões de transição de geometria.

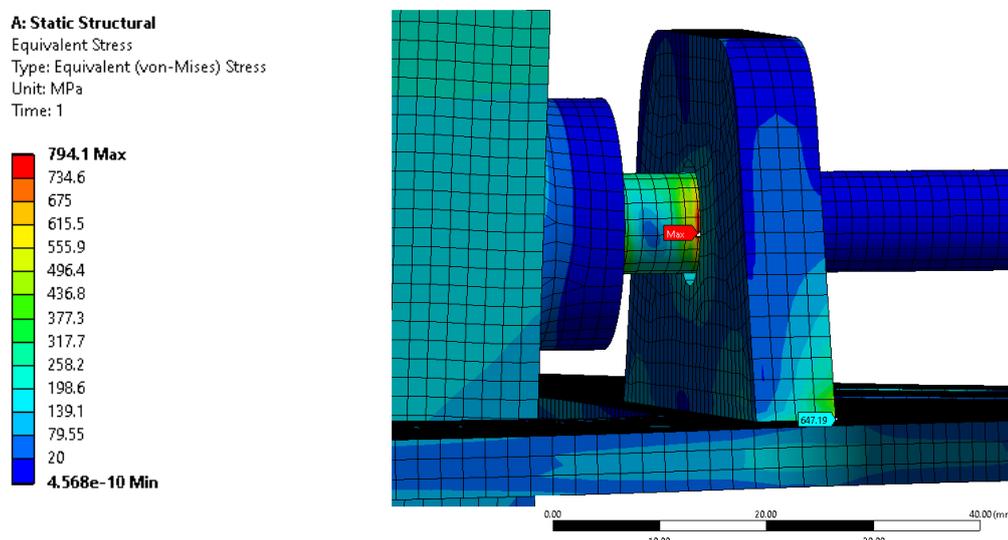


Figura 11 – Ponto de máxima tensão na simulação com o projeto atual, 794,1MPa.

É observado também um valor de tensão de 647MPa no ponto de união soldada, na base do olhal de fixação com a chapa, ainda na Figura 11. Este valor merece certa atenção por conta de ser um canto vivo. Uniãoes soldadas oferecem valores de resistência maiores do que o metal base, quando se trata de aço, mas vale a indicação de se tomar as devidas precauções de acabamento durante a fabricação.

Valores de tensão presentes na parte inferior da placa de aço AISI 1020. É observado algumas regiões com valores de tensão mais elevados na região próxima a fixação no chassi e dos parafusos na Figura 12.

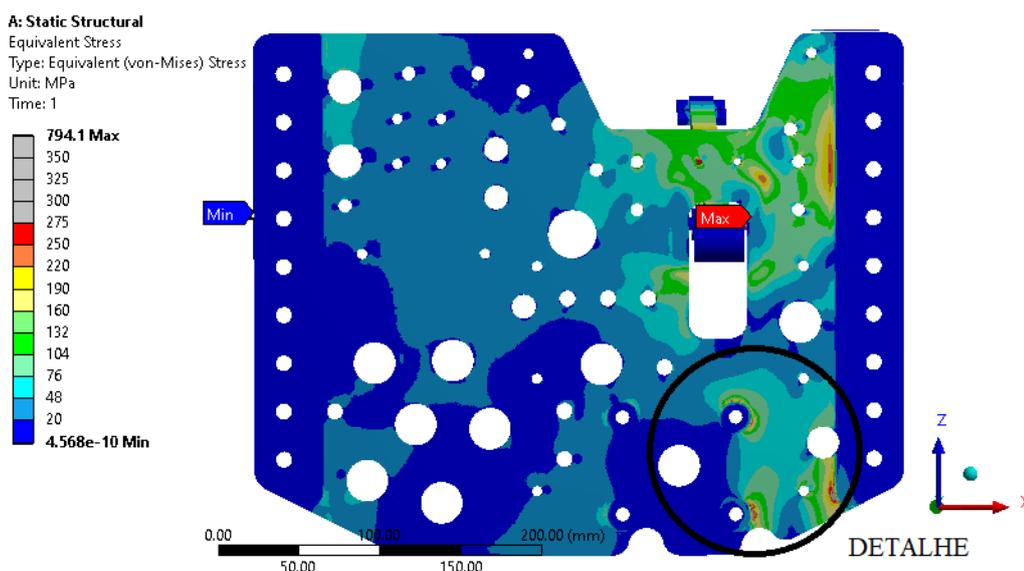


Figura 12 – Vista inferior da estrutura.

Em detalhe, acima, observa-se valores de tensão na parte de fixação dos parafusos e próximo a fixação no chassi. O valor mais elevados de tensão também ocorrem em uma região de transição, pois é o local onde as tiras de aço do chassi fixam o *pedalbox*. Abaixo a vista de detalhe, Figura 13.

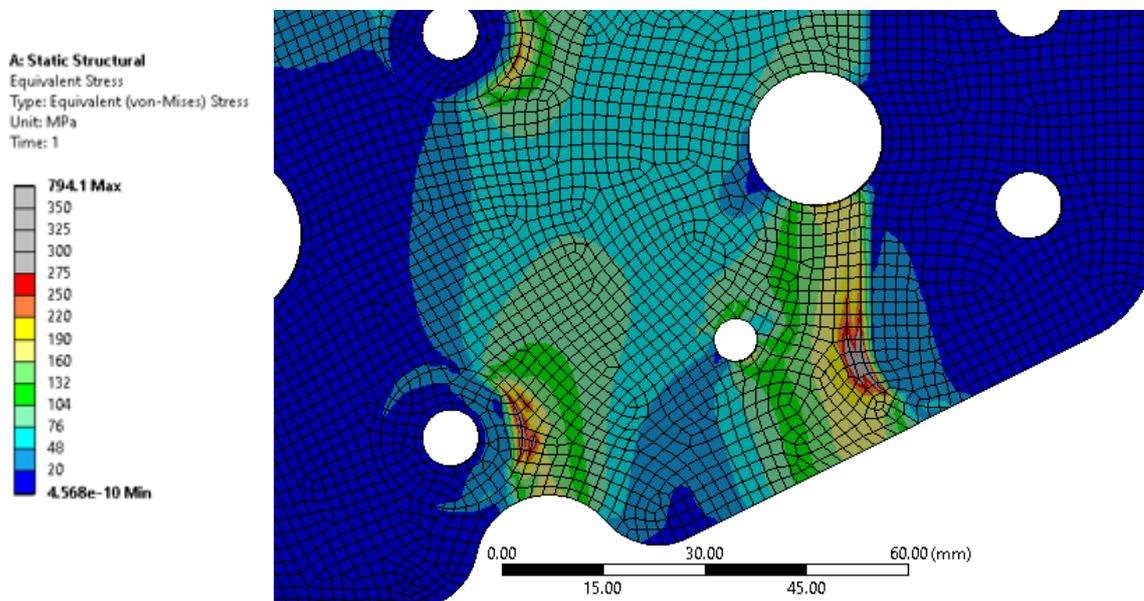


Figura 13 – Detalhe das tensões nas regiões de elementos de fixação.

A Figura 14 traz as tensões presentes na simulação do novo projeto. A escala foi ajustada da mesma forma que o modelo anterior, com 250MPa de limite. É perceptível a redução de valores de tensão em comparação ao modelo com a placa.

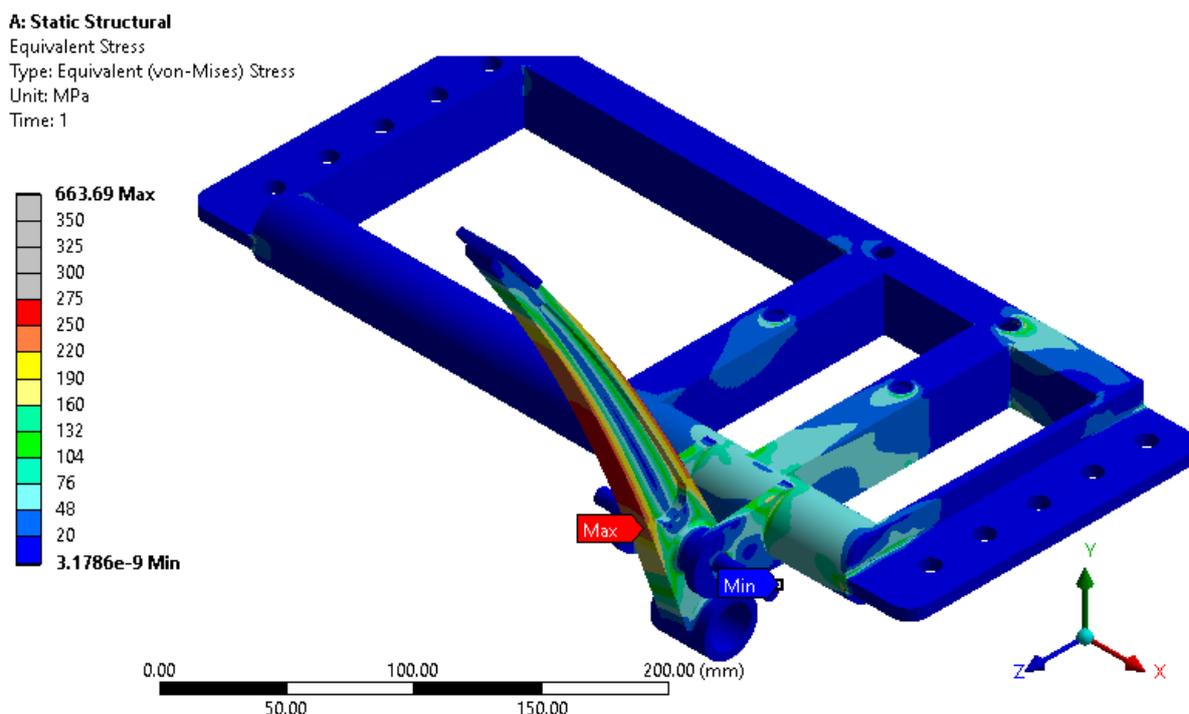


Figura 14 – Resultados de tensão do sistema com o novo projeto com escala ajustada.

Uma análise mais detalhada pela parte posterior da montagem é ilustrada na Figura 15. Nota-se, na escala utilizada, valores inferiores a tensão de escoamento do material AISI 1020.

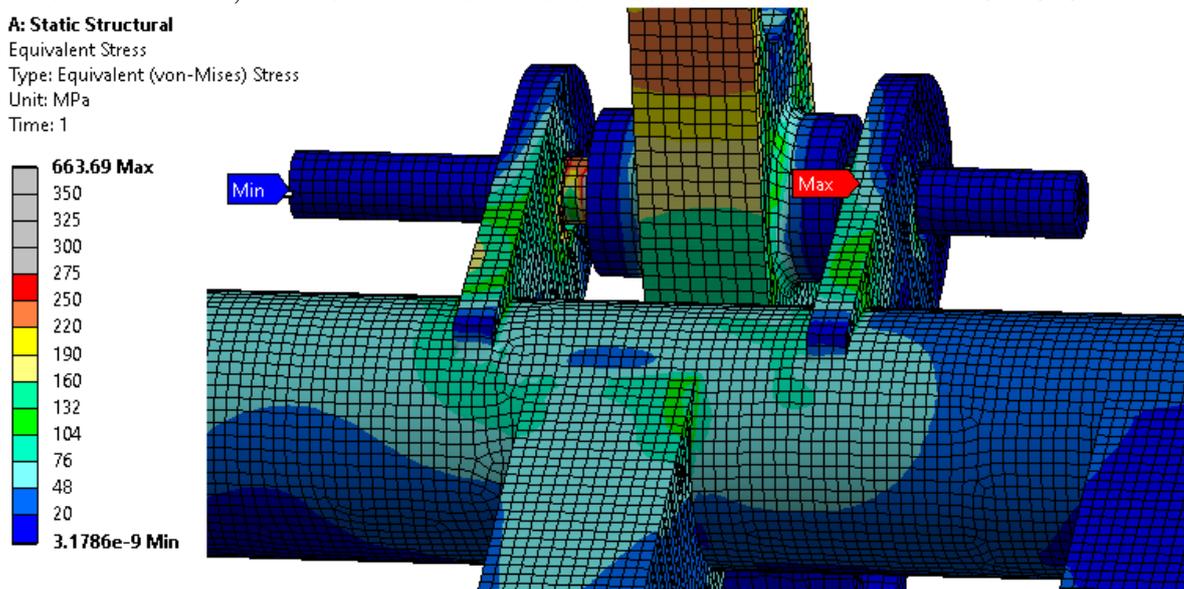


Figura 15 – Valores de tensão em algumas regiões da nova estrutura.

Uma análise nos valores de tensão máxima é feita e ilustrada na Figura 16. Da mesma forma a escala foi gerada automaticamente pelo *software* e o valor de 663MPa é observado numa região de transição de geometria.

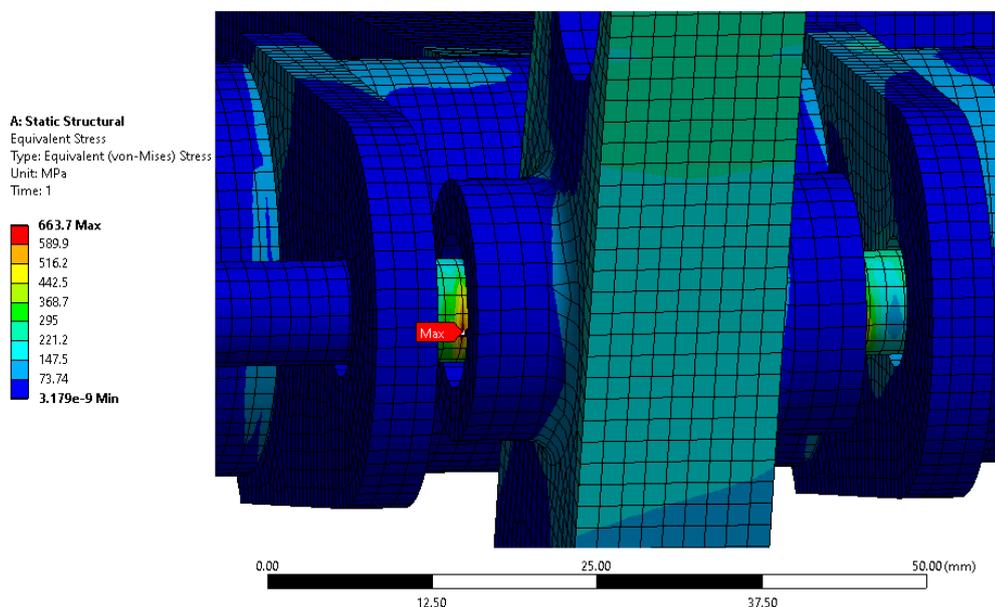


Figura 16 – Tensão máxima observada na estrutura de 663MPa.

Valores de tensão da parte inferior da nova estrutura são mostrados na Figura 17. Os valores ficaram abaixo da tensão de escoamento – 250MPa. As tensões ficaram mais altas na região de fixação dos parafusos. Neste caso não observa-se elevação de tensão na região de fixação ao chassi por conta de uma tira de aço de 4,75mm utilizada na lateral, de forma vertical e alinhada longitudinalmente com o *pedalbox*. Essa tira fica visível na Figura 5.

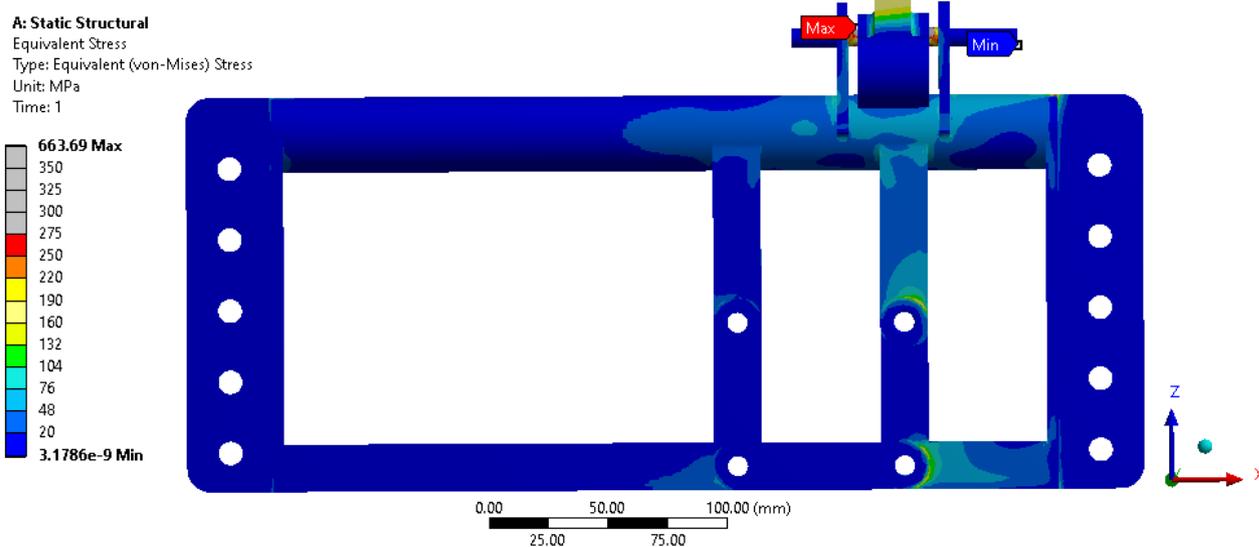


Figura 17 – Valores de tensão na parte inferior da nova estrutura.

5.2 Deslocamento

Os dados de deslocamento apresentados na Figura 18 correspondem ao projeto atual com a chapa de aço. O deslocamento é analisado no sentido longitudinal Z+, em direção a dianteira do veículo.

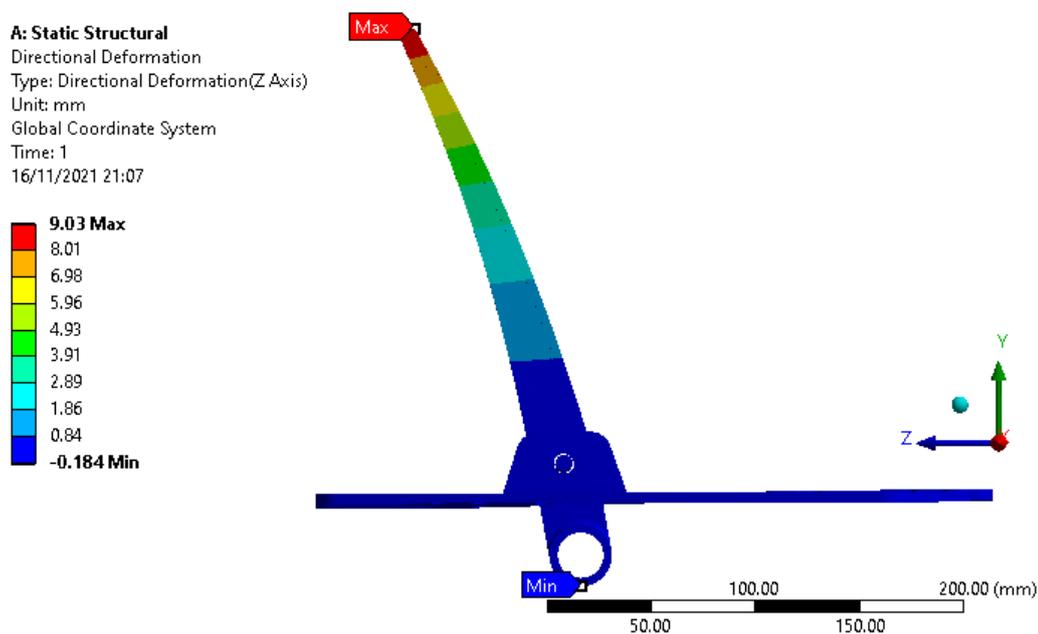


Figura 18 – Resultados de deslocamento do sistema com o projeto atual, em milímetros.

A Figura 19 mostra o deslocamento na direção longitudinal Z+ do pedal. Observa-se uma diferença de 1,5mm a menos em relação ao sistema anterior, cerca de 16%.

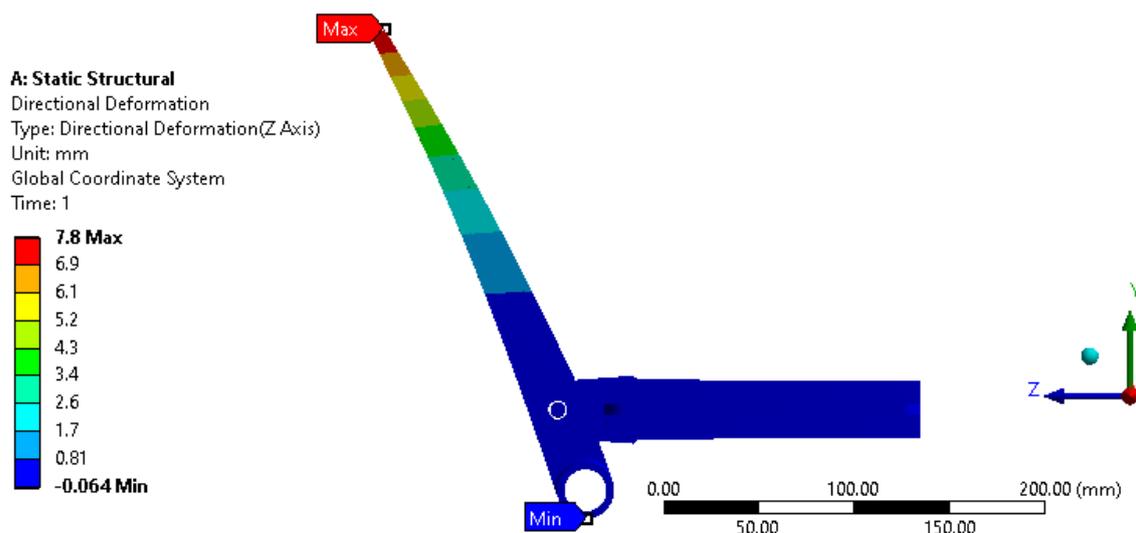


Figura 19 – Resultados de deslocamento na nova proposta de geometria, em milímetros.

6. CONCLUSÃO

Após as análises feitas, é possível avaliar uma maior rigidez para a nova proposta de projeto por conta do menor deslocamento final do pedal de freio. A nova geometria tem massa 40% menor em relação a atual. A escolha do material permanece com baixo custo em comparação as opções elencadas e a facilidade de obtenção e fabricação pela equipe confere com o proposto. Dado que agora o processo de fabricação será por soldagem, um gabarito de posicionamento se faz necessário.

As tensões foram analisadas e os materiais empregados, juntamente com as geometrias estabelecidas, estão de acordo com o carregamento proposto. Vale lembrar que é uma carga em condição extrema. É fundamental que durante o processo de fabricação minimize-se concentradores de tensão.

O deslocamento obtido na simulação para o projeto atual confere com o esperado para o projeto, diferentemente do que foi observado pela equipe nos testes experimentais no projeto antigo. Sendo assim se faz valer de algumas hipóteses a respeito da construção do projeto, como folgas em parafusos ou linhas de freio com bolhas de ar, o que ocasionaria um curso de pedal além do esperado. Ainda, o deslocamento avaliado na ponta do pedal difere 16% de um sistema para o outro, conferindo maior rigidez para o novo projeto, que é mais leve. Uma proposta de fabricação (Apêndice A) está presente ao final deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004. *Livro*.

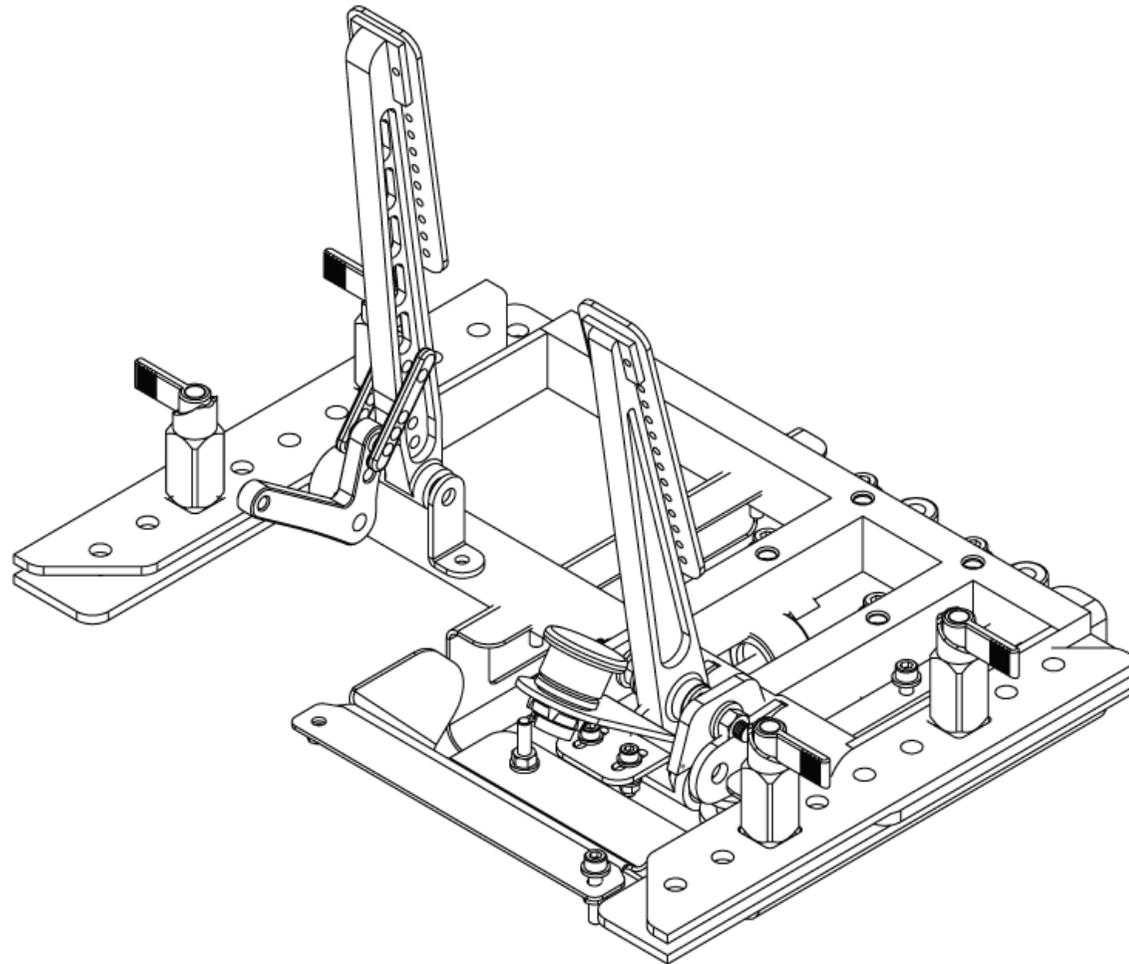
BRAKE & THROTTLE 850-SERIES 2-PEDAL, **Tilton Racing**. Disponível em: <https://tiltonracing.com/product/850-series-2-pedal-brake-throttle-underfoot-pedal-assembly-with-slider-system/>. Acesso em 9 nov. 2021.

FONSECA, J. S. O. **Ferramentas de Simulação em Mecânica: Elementos Finitos**. 2002. *Material compilado para a disciplina de Elementos Finitos*.

GARRETT, T. K.; NEWTON, K.; STEEDS, W. **The Motor Vehicle Thirteenth Edition**. 13. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. *Livro*.

MECHANICAL. **Ansys**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>. Acesso em 1 out. 2021.

NORMA REGULAMENTADORA. **NR 17 – Ergonomia**. 2018. *Informação e documentação: citações em documentos*.



Após a análise estrutural feita, ainda resta finalizar o projeto quanto a sua construção. A fixação dos demais componentes, assim como uma superfície adequada para o apoio dos membros inferiores do piloto devem ser estudadas em conjunto com a equipe. A imagem acima sugere uma ideia de como poderia ficar o *pedalbox* na sua configuração final.