

PEDRO ANTONIO DA ROCHA MIRANDA CARVALHO DE ARAUJO

Otimização topológica de um braço de suspensão para um veículo Mini Baja

Topology optimization of a Mini Baja suspension arm

PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
APRESENTADO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DA PUC-RIO, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE ENGENHEIRO MECÂNICO

Orientador: Ivan F. M. Menezes

Departamento de Engenharia Mecânica
Rio de Janeiro, 02 de julho de 2018.

Agradecimentos

Finalizando essa etapa tão enriquecedora quanto uma faculdade na vida de alguém, creio que eu só pude aproveitar todas as oportunidades que a universidade poderia oferecer porque tinha ao meu lado pessoas que me fizeram acreditar que até o impossível pode ser alcançado.

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Francisco e Claudia, que nunca deixaram de acreditar em mim e me mostraram que é sempre válido se esforçar para obter mais da vida.

Catharina e Thomaz, meus irmãos que sempre fizeram do ambiente familiar uma saudável interação de companheirismo.

Meus amigos de colégio, especialmente Paula Santos, por sempre me apoiar mesmo nos momentos que nem eu mesmo acreditei em mim.

Aos meus eternos companheiros de equipe, Marcelo Tristão e Matheus Hoffman, que lutaram até a última gota de suor junto a mim para fazer do sonho de estar nas melhores equipes do Brasil uma realidade.

A todos os meus amigos no intercâmbio, que me fizeram realizar que é sempre possível fazer mais pela nossa sociedade e por me mostrar novas perspectivas de vida.

Ao meu professor orientador, Ivan, que durante o semestre sempre se mostrou solícito e me ajudou nesse trabalho.

Resumo

A equipe Reptiles é o time de competição da PUC-Rio de carros tipo Mini-Baja. Fundada em 2008, a equipe foi alcançando resultados espetaculares ao longo do tempo. Na sua história recente se tornou referência como a melhor equipe do estado do Rio de Janeiro e possui metas de chegar a um nível que lhe permita participar de competições mundiais. Contudo, a competição de Mini-Baja, realizada pela SAE Brasil, é a mais competitiva do meio estudantil sendo necessário muito estudo e muita aplicação dos conceitos de engenharia para se sobressair diante dos demais competidores. Para isso, um fator de extrema importância é o peso do carro.

O presente trabalho tem como objetivo aplicar técnicas de otimização topológica em um braço de suspensão de forma a minimizar seu peso, garantindo que a peça terá rigidez suficiente para suportar e transmitir os esforços impostos durante a competição. A premissa básica deste trabalho é que o código MATLAB, utilizado aqui para fazer a otimização topológica, possa ser customizado para se tornar mais simples e intuitivo facilitando assim o trabalho das futuras gerações da equipe Reptiles.

Palavras-chave: otimização, suspensão, topológica e mini-baja.

Abstract

Reptiles is the Baja SAE Racing car team of PUC-Rio. Founded in 2008, the team has reached outstanding results over the years. In your recent history it became the reference as it is considered the best team from Rio de Janeiro State and its goal is to reach the world league. However, the Baja SAE competition, organized by SAE Brazil, is the most competitive of its kind in Brazil, therefore it is needed lots of engineering studies and its application to stand out among the competitors. Thus, the weight of the car plays a big role.

This study aims to apply topology optimization techniques in the suspension link in order to minimize its weight, ensuring its stiffness. The basic premiss is that the MATLAB, used here to do the topology optimization, can be customized to be simple and intuitive so it can be easy to manipulate as future generation of the team will be able to use.

Keywords: optimization, suspension, topology e Mini Baja.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. MOTIVAÇÕES & OBJETIVOS | 1 |
| 2. MINI BAJA | 2 |
| 3. CONDIÇÕES DE SUPORTE | 5 |
| 4. FORÇAS EXTERNAS APLICADAS | 8 |
| 5. TOMADA DE DECISÃO SOBRE O MATERIAL | 11 |
| 6. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA | 14 |
| 7. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO | 17 |
| 8. MANUFATURA DA PEÇA | 19 |
| 10. RECOMENDAÇÕES | 29 |
| 11. CONCLUSÃO | 33 |
| 11. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 34 |

Lista de Figuras

Figura 1 – Caiman na sua primeira competição Nacional (2015)

Figura 2 – Mussurana em sua ultima competição (2018)

Figura 3 – Projeto em Solidworks do Naja

Figura 4 – Exemplo de obstáculo na competição

Figura 5 – Análise estática dos esforços no braço de suspensão traseiro do Naja

Figura 6 – Vista isométrica da montagem da suspensão traseira no projeto do Naja

Figura 7 – Vista frontal da montagem da suspensão traseira no projeto do Naja

Figura 8 – Gráfico da força do amortecedor pelo curso

Figura 9 – Gráfico da força axial na junta analisada

Figura 10 – Gráfico da força radial na junta analisada

Figura 11 – Análise estática críticas dos esforços no braço de suspensão traseiro do Naja

Figura 12 – Diagrama de Módulo de Elasticidade por densidade

Figura 13 -Exemplo de processo de otimização topológica

Figura 14 -Peça inicial a ser otimizada

Figura 15 – Análise estática inicial na peça a ser otimizada

Figura 16 – Malha de Elementos finitos

Figura 16 – Geometria Final do algoritmo

Figura 17 – Peça final no SolidWorks

Figura 18 – Análise estática da peça final

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo principal contextualizar a importância da redução de peso para o desempenho de um veículo fora de estrada. Para tanto, serão aplicadas técnicas de otimização topológica, a partir de um código MATLAB disponível na literatura, para se obter uma melhor distribuição de material no braço de suspensão de um veículo Mini Baja, de forma a reduzir o peso da peça e, ao mesmo tempo, aumentar a sua rigidez. O desafio será modelar de forma que seja o mais confiável a realidade possível com 3 pontos de apoio e 1 pontos de atuação de força com a angulação correta. As forças serão representações do *input* do solo no pneu. As reações de apoio serão o ponto de ancoragem inferior do amortecedor no braço de suspensão, além das ancoragens do braço de suspensão na gaiola do carro. Um dos objetivos deste trabalho é customizar o código MATLAB utilizado para torná-lo mais simples e intuitivo visando facilitar os futuros projetos da equipe de Baja da PUC-Rio. O presente trabalho servirá como uma referência sobre como fazer a otimização topológica em outras peças do veículo, visando reduzir o seu peso total. Por fim, após a obtenção da topologia final da peça, será estudada a viabilidade de manufatura da mesma utilizando-se impressoras 3D.

2. MOTIVAÇÕES & OBJETIVOS

A principal motivação deste trabalho está na possibilidade de evolução do projeto de Mini Baja da equipe de competição da PUC-Rio. Durante 2 anos da minha graduação fiz parte dessa equipe cuja evolução surpreende até mesmo experts do assunto. A constante superação aconteceu por meio de muito esforço dos seus antigos e atuais membros para tornar o carro cada vez mais competitivo. De agosto de 2014, quando a equipe participou de sua primeira competição, até março de 2018, última competição realizada até o momento, a equipe saltou da posição de 73° no ranking nacional para 15°, sendo a melhor colocada do estado do Rio de Janeiro.

Contudo, quanto melhor sua colocação mais seu projeto tem que ser otimizado para que se alcance melhores colocações. No cenário atual, a equipe sofre com alguns déficits de projeto que a impede de ascender no ranking nacional como: financeiro – existem equipes com mais de 20 vezes o nosso orçamento atual; experiência – equipes com mais que 5 vezes o nosso número de competições e projeto – e otimizações pautadas em premissas de projeto de

engenharia que vise a melhoria do desempenho do carro em competições. Dessa forma, este trabalho está focado na última categoria desses déficits.

Divide-se esse tópico de otimizações em dois grandes pilares: (i) otimização dinâmica e (ii) otimização do volume (peso). O primeiro é feito através de modelagem dinâmica do veículo e visa a otimização de medidas como por exemplo o tamanho entre os eixos do carro. O segundo é determinado por um balanço entre esforço e peso. Existem 3 diferentes tipos de otimização que visa reduzir o peso. A primeira é otimizar a área de seção da peça, a segunda consiste em diminuir o peso das peças por meio de modificação de suas formas (geometrias dos contornos) e, por fim, a otimização topológica que parte de uma peça original e vai retirando material (fazendo furos) até se obter uma peça com peso reduzido e rigidez maximizada. Atualmente, a necessidade mais urgente da equipe está na redução de peso do veículo. Sendo assim, como o presente trabalho visa evoluir o patamar da equipe, o mesmo irá focar na otimização topológica.

A otimização topológica se mostra importante quando analisamos o potencial que a redução de peso pode acarretar na performance do veículo. Para citar alguns exemplos: provoca um aumento de velocidade final, mantendo a aceleração do seu veículo, melhora a superação de obstáculos devido a diminuição de pressão necessária no amortecedor e reduz o esforço gerado pelo impacto em obstáculos. Essas são características cruciais para a melhoria do projeto de engenharia do carro e performance do carro na competição e ambos contabilizam pontos na competição.

Para isso, será testado um algoritmo de otimização topológica para o braço de suspensão traseiro do veículo devido à sua complexidade e alto potencial de redução de peso. O objetivo é convergir para uma geometria “ótima” que minimize o peso e maximize a capacidade de suportar os esforços, além de definir qual será o material utilizado e como a peça será manufaturada. Além disso, outro objetivo é customizar o código utilizado (em MATLAB) para que as próximas gerações da equipe Reptiles possam utilizá-lo com mais facilidade e simplicidade nos novos projetos.

3. MINI BAJA

I. CARROS

O veículo Mini-Baja consiste em um carro monoposto de rali. Suas especificações são pautadas em um regulamento feito pela SAE Brasil de forma a garantir a segurança do piloto durante testes e competição. O desafio proposto pela SAE nessa categoria é de levar o carro a situações extremas em que nenhum carro comum seria capaz de suportar. Hoje, no Brasil, cerca de 90 equipes de diferentes universidades projetam e manufaturam o carro para competir tanto a competição de sua região, quanto o campeonato nacional.



Figura 1 – Caiman na sua primeira competição Nacional (2015)

A Equipe Reptiles da PUC-Rio já competiu com dois carros, intitulados Caiman e Mussurana. Os carros mostrados nas figura 1 e 2 foram frutos de 6 meses de projeto e 6 meses de fabricação. Vale ressaltar que cada carro tem prazo de 2 anos, uma regra que a SAE estabeleceu para forçar as equipes a estarem sempre melhorando os seus projetos.



Figura 2 – Mussurana em sua última competição (2018)

O primeiro carro da nossa equipe a competir (ver figura 1), obteve uma colocação média de 36° no ranking nacional. O Caiman pesava 230 kgs. Já o segundo (ver Figura 2), obteve uma colocação média de 15° no ranking nacional. O Mussurana pesava 190 kgs. Atualmente, a equipe está em fase final de projeto de um carro novo, que visa chegar a 160 kgs e conseguir uma colocação entre os 3 primeiros, o que permitiria a nossa classificação para a etapa mundial. O novo projeto, Naja, está ilustrado na figura 3.

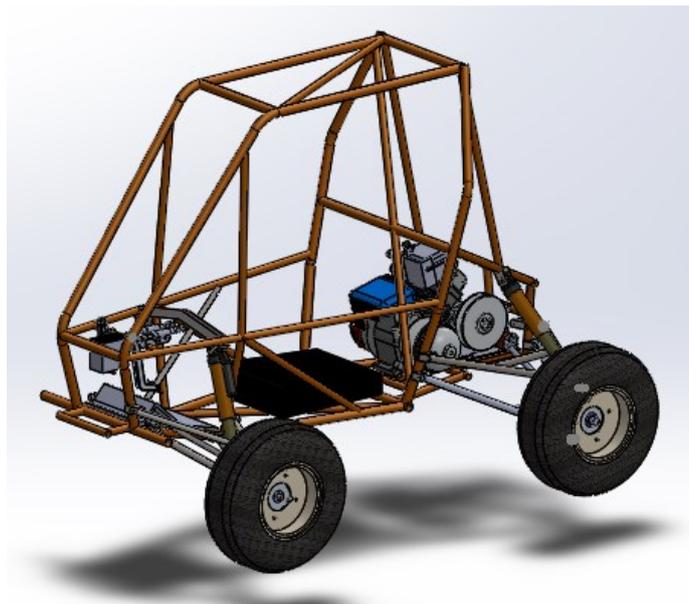


Figura 3 – Projeto em Solidworks do Naja

II. COMPETIÇÃO

A competição é dividida em 3 grandes partes: (i) Projeto – em que se faz um relatório do projeto e apresentações de cada sistema do projeto; (ii) Dinâmicas – provas de aceleração, velocidade final, Tração, Suspensão e Manobrabilidade; (iii) Enduro – Corrida de 4 horas com obstáculos.

Durante a competição a suspensão sofre com esforços nas provas dinâmicas de suspensão e no Enduro. Alguns obstáculos são mostrados (ver figura 4, por exemplo) para exemplificar como o braço de suspensão recebe esforços. Nesta figura podemos ver o carro passando por uma vala alternada, este degrau tem profundidade suficiente para o carro atolar de forma a forçar o piloto a passar com uma velocidade maior no obstáculo.



Figura 4 – Exemplo de obstáculo na competição

A suspensão de um veículo tem como sua principal função manter o contato entre o pneu e solo para o carro conseguir esterçar e tracionar. Além disso é de suma importância para a dirigibilidade do carro, que, após a fabricação e uso, seus pontos sejam iguais aos projetados inicialmente. Dessa forma, uma condição de projeto é que a suspensão não sofra esforços acima do limite elástico do material nos seus extremos. Na figura 5, pode-se averiguar o cálculo estrutural feito para o braço de suspensão atual no SolidWorks. Vale ressaltar que nesse estudo

foram utilizadas as condições de apoio que serão explicadas mais a frente, contudo foi utilizado um esforço padrão de competição.

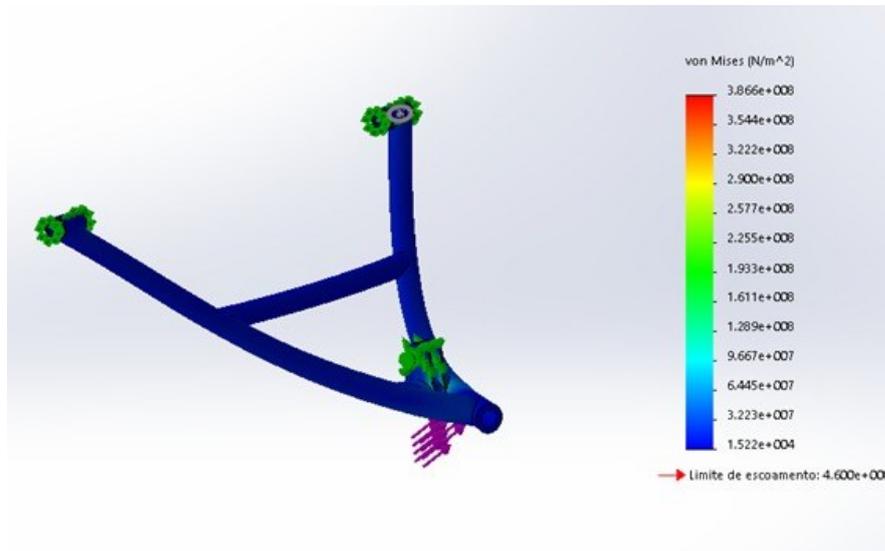


Figura 5 – Análise estática dos esforços no braço de suspensão traseiro do Naja

Neste estudo, infere-se que a tensão máxima é 20% menor do que a de escoamento e seu principal ponto de tensão ocorre em um ponto crítico para a dinâmica, o ponto de ancoragem do amortecedor. Este ponto é de suma importância para a performance dinâmica do carro. Primeiramente, caso esse ponto sofra fratura frágil, o carro irá perder o controle da roda traseira, e, dessa forma, prejudicar outras peças e impossibilitar o carro de andar. Dinamicamente, mesmo que esse ponto não sofra uma fratura frágil, mas ultrapasse o limite de escoamento, ou seja, que seu ponto inicial não esteja igual ao projetado no início isso acarretará em mudanças dos ângulos de contato que o pneu faz com o solo, o ângulo que o amortecedor recebe os esforços e o curso total da suspensão.

III. CONDIÇÕES DE SUPORTE

Para modelar o projeto de forma consistente com a realidade deve-se primeiro entender como a mesma se comporta quando acontecem esforços no sistema. Sendo assim, foi projetado no SolidWorks todas as peças que compõem a montagem da suspensão e está exibida na figura 6:

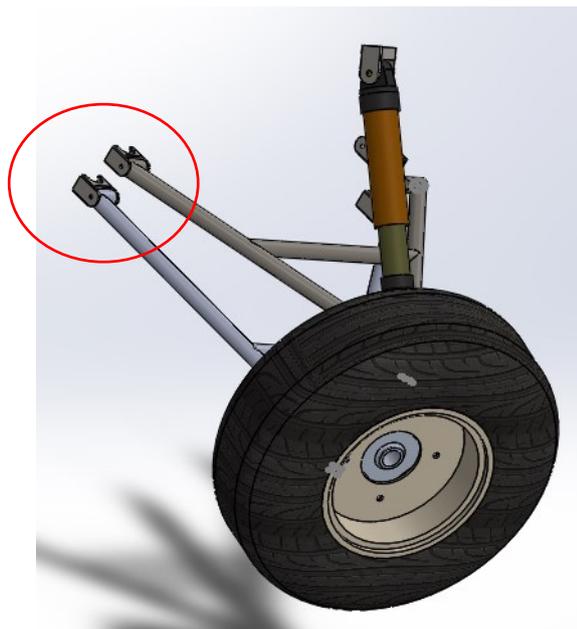


Figura 6 – Vista isométrica da montagem da suspensão traseira no projeto do Naja

Nas figuras 6 e 7 podemos ver alguns pontos de interface com a peça a ser otimizada. Primeiramente, nota-se que existem dois pontos de contato entre o braço de suspensão e a estrutura da gaiola. Estes devem estar alinhados de forma a produzir um eixo em torno do qual o corpo gira. Estes dois pontos de contato com a gaiola consistem em uma bucha de nylon com camisa de aço e um parafuso. Sendo assim, podemos assumir que a condição de suporte para esses pontos de contato como pino que permite rotação.

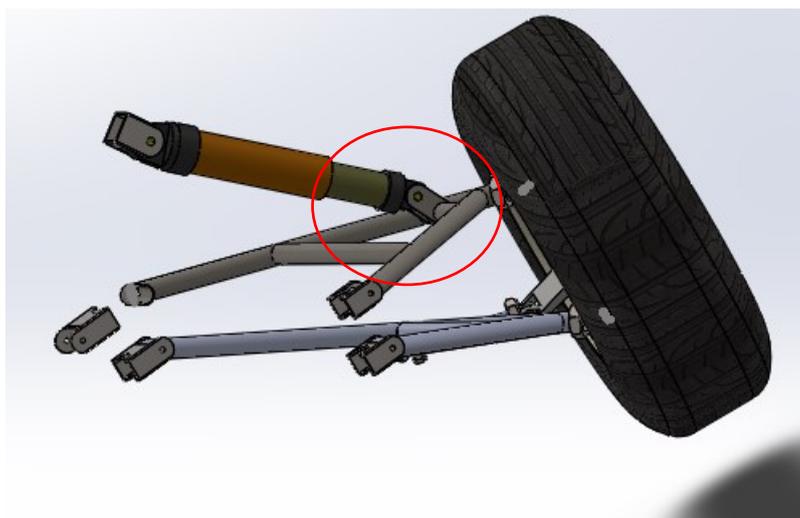


Figura 7 – Vista frontal da montagem da suspensão traseira no projeto do Naja

Outro ponto de apoio é a ancoragem inferior do amortecedor. Sendo assim, foi testado o amortecedor da equipe. O amortecedor FOX Float é pneumático e foi submetido a testes com diferentes pressões. Dessa forma, foi possível obter o valor da força que o amortecedor aplica de acordo com seu curso.

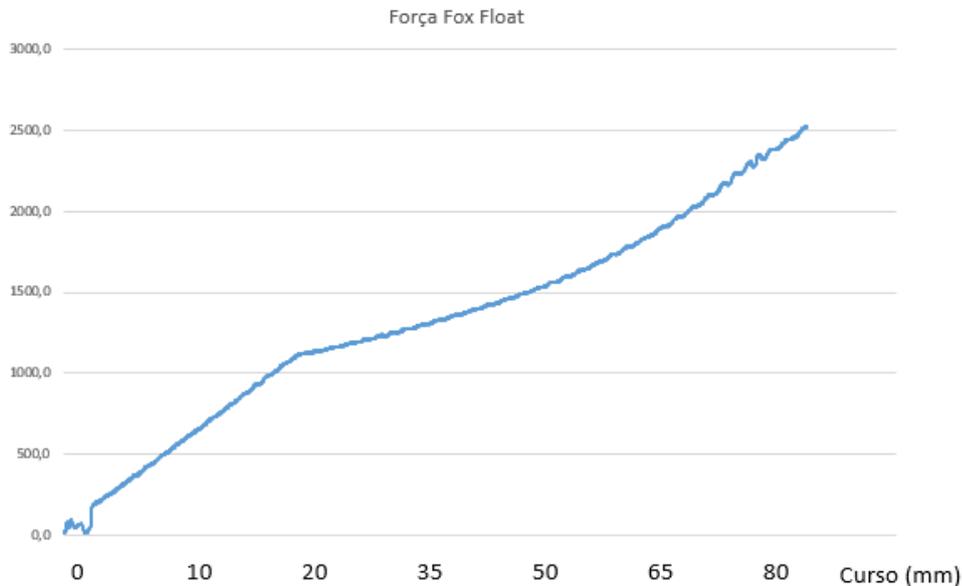


Figura 8 – Gráfico da força do amortecedor pelo curso

Foi utilizada uma hipótese simplificadora para modelar o amortecedor no *software* como uma reação de apoio de mola linear. Como o estudo tem como objetivo otimizar o peso do braço de suspensão na situação crítica, e em todas as competições foi observado um máximo de 98mm de compressão no amortecedor foram retirados os pontos de equilíbrio e o valor da força no curso de 98 mm. Sendo assim, foi calculada uma constante elástica da mola que simula esses dois pontos. Dessa forma, foi utilizada uma mola de $K= 36.100 \text{ N/mm}$ como suporte no ponto de ancoragem inferior traseiro.

O outro ponto de contato é o terminal rotular que liga o braço de suspensão a manga de eixo, que por sua vez está conectada ao pneu. Dessa forma, nesse ponto não é colocada nenhuma condição de suporte, mas a força transmitida pelos obstáculos selecionados.

4. FORÇA EXTERNAS APLICADAS

Para se fazer o estudo é necessário estimar as forças críticas nas quais a peça estará submetida. A análise de situações críticas é documentada pelos membros da equipe de acordo

com resultados empíricos feitos pela mesma em competições da SAE Brasil. Utilizando uma simulação da dinâmica do veículo Baja SAE modelado por diagrama de blocos via Matlab (Tristão,2016) foram simuladas condições extremas para a suspensão do veículo.

Essa simulação possibilita transportar a força de onde ela foi aplicada, a qualquer junta de um veículo Mini Baja. Dessa forma, podemos transportar a força aplicada no pneu para a junta da suspensão a ser analisada. A simulação leva em consideração tanto a perda de energia em peças e pneu como as distâncias que alavancam as forças.

Foram feitas simulações em situações extremas para se obter um histórico de forças na junta da suspensão. Contudo o programa fornece forças axiais e radiais, onde as forças axiais são transversais ao carro (F_y) e as forças radiais (F_r) são uma composição do plano longitudinal e vertical (F_x e F_z)..

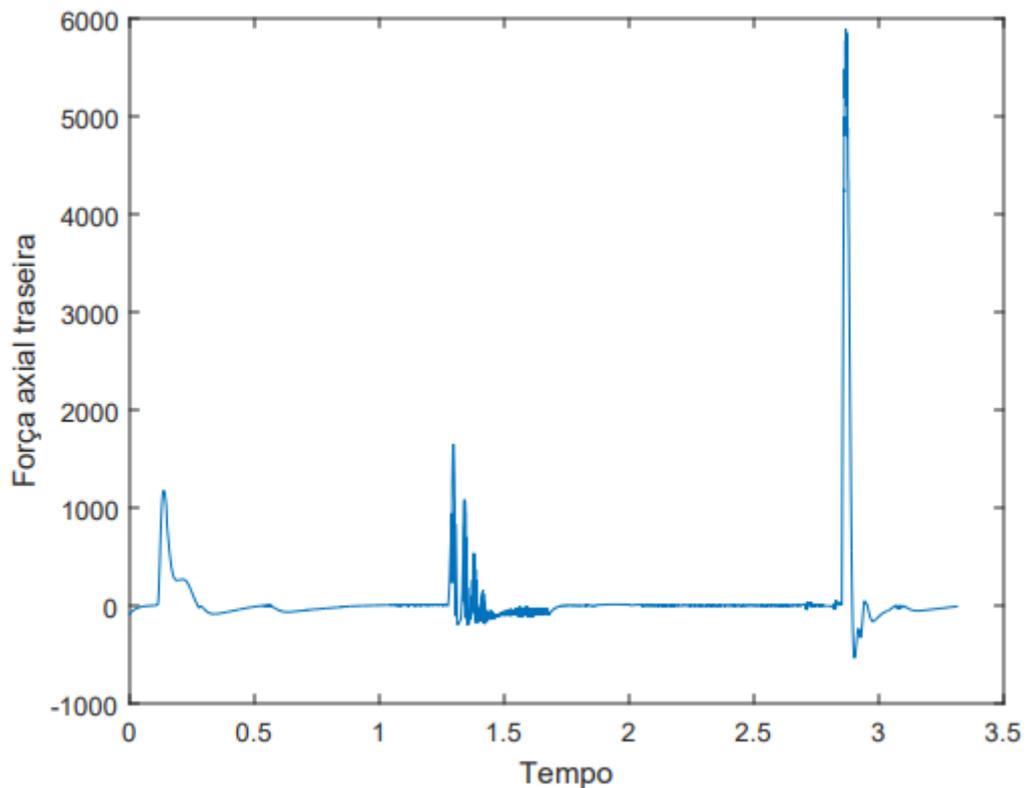


Figura 9 – Gráfico da força axial na junta analisada

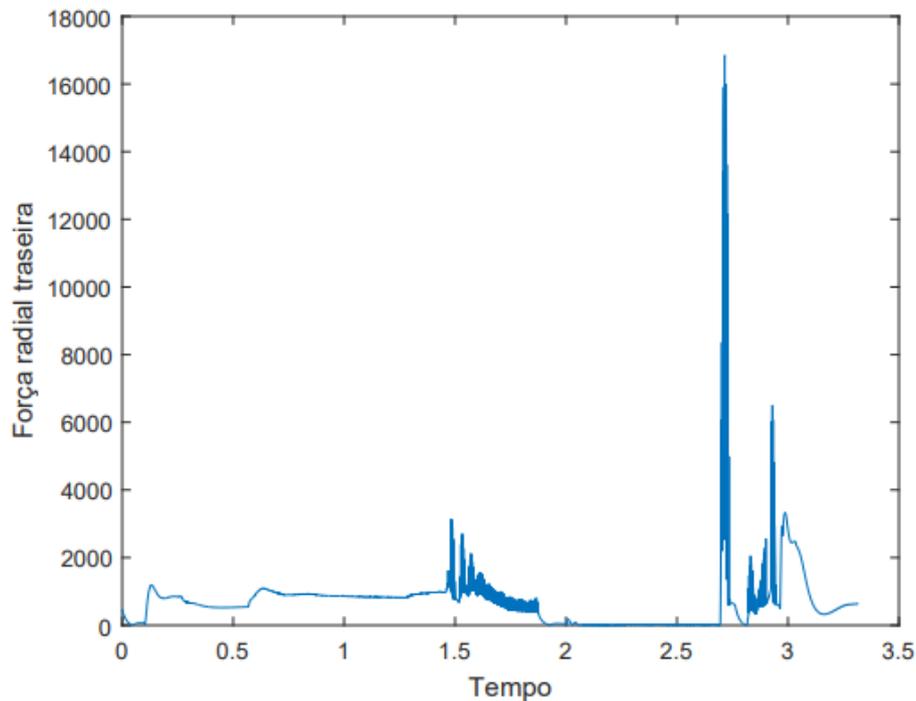


Figura 10 – Gráfico da força radial na junta analisada

Sendo assim, foram retirados os valores máximos de cada gráfico como sendo a situação crítica que a peça deverá suportar. Logo,

$$F_{\text{y}} = 5.950 \text{ N}$$

$$F_{\text{r}} = 16.800 \text{ N}$$

Para utilizar o *software* de otimização, foi necessário transferir os valores para o sistema de coordenadas da SAE. Para calcular as forças críticas em cada direção segundo os eixos de coordenadas da SAE foi calculada a relação entre F_{x} e F_{z} . Para isso, foram utilizadas situações conhecidas na literatura. Para o eixo longitudinal do carro foi calculado o impacto na roda de uma batida em um tronco na velocidade máxima que o carro pode atingir, ou seja:

$$F_{\text{x}} = I = \Delta Q \Delta t \tag{1}$$

$$\Delta Q = m. (v_{\text{f}} - v_{\text{i}}) \tag{2}$$

onde a massa total é igual a 240 kgs, a velocidade final é zero, a velocidade inicial é 55 km/h e o tempo de impacto é 0,25 segundos. Tem-se que o impacto é igual a 7.200 N. Contudo, como o carro é simétrico e recebe o esforço em duas rodas esse valor é igual a 3.600 N.

Para o eixo vertical do carro, assume-se a situação crítica como sendo aquela que o carro tomba em uma roda. Dessa forma, o esforço imposto à suspensão se equivale a todo o peso do carro:

$$F_{z\text{p}} = m \cdot g \quad (3)$$

onde m é a massa total do carro, e g é a gravidade. Portanto, o esforço vale 2.354 N. Dessa forma, temos que a força radial é uma soma vetorial entre $F_{x\text{p}}$ e $F_{z\text{p}}$. Logo,

$$F_{x\text{p}}^2 + F_{z\text{p}}^2 = F_{x\text{p}}^2 + F_{z\text{p}}^2 = 1.53 \quad (4)$$

$$F_{r\text{p}}^2 = F_{x\text{p}}^2 + F_{z\text{p}}^2 \quad (5)$$

Dessa forma, tem-se que os valores críticos para a simulação são:

$$F_{y\text{p}} = 5950 \text{ N}$$

$$F_{x\text{p}} = 14\,063 \text{ N}$$

$$F_{z\text{p}} = 9\,192 \text{ N}$$

Finalmente, foi feita uma nova análise estrutural da peça atual com as forças críticas para se ter como parâmetro comparativo da otimização topológica.

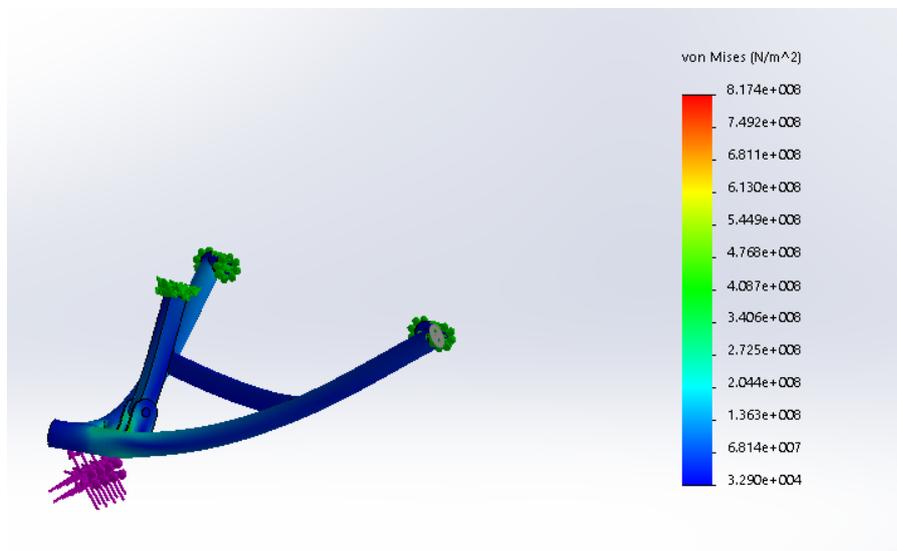


Figura 11 – Análise estática crítica dos esforços no braço de suspensão traseiro do Naja

Vale ressaltar que os resultados acima mostram que a tensão crítica é quase 2 vezes maior do que a tensão de escoamento do material. Todavia, a peça nunca sofreu uma deformação plástica em 4 competições que fora utilizada. Dessa forma, podemos concluir que

o estudo de otimização está sendo conservador na suposição de forças visto que apesar de elas serem as máximas forças, muito provavelmente não são concomitantes.

5. TOMADA DE DECISÃO SOBRE O MATERIAL

Para a seleção de materiais será feita uma análise sobre qual o melhor material a ser utilizado a partir tensões atuantes no corpo. Como já mencionado anteriormente, a peça está majoritariamente sob flexão. Dessa forma, precisamos maximizar sua rigidez e resistência (Castro e Meggiolaro, 2009). Primeiramente, precisamos saber o que significa cada uma dessas características, ou seja:

$$\text{rigidez} = E \rho \quad (6)$$

$$\text{resistência} = \sigma \rho \quad (7)$$

A partir daí, precisamos listar materiais que possam ser possíveis candidatos a serem utilizados. Sendo assim, podemos utilizar o diagrama de seleção de materiais para nos auxiliar nesta escolha.

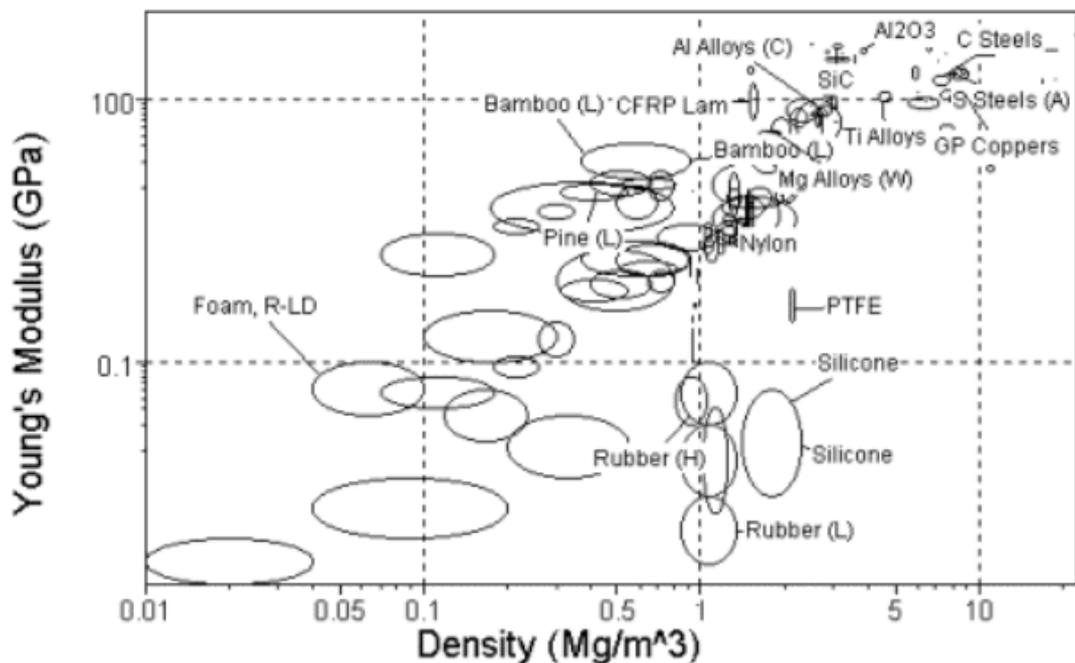


Figura 12 – Diagrama de Módulo de Elasticidade por densidade

Como a peça será levada a condições extremas, materiais com Módulo de Elasticidade menores que 20 GPa foram retirados da lista. Dessa forma, iremos analisar as grandes famílias de que parecem ser bons candidatos. Segundo o Diagrama da figura 12, podemos escolher os seguintes materiais: Fibra de carbono, Liga de Titânio, Ligas de Alumínio e Ligas de Aço.

Tabela 1 – Matriz de decisão de qual material utilizar

| | Modulo de Elasticidade (Gpa) | Densidade (g/cc) | Rigidez | Resistência | Custo/ kg | Total |
|------------------|------------------------------|------------------|---------|-------------|-----------|--------|
| Fibra de Carbono | 242 | 1,81 | 8,59 | 21,46 | \$ 66,67 | -13,13 |
| Liga de Titânio | 116 | 4,5 | 2,39 | 5,29 | \$ 4,90 | 20,92 |
| Liga de Alumínio | 68,9 | 2,7 | 3,07 | 6,22 | \$ 2,21 | 32,79 |
| Liga de Aço | 186 | 7,87 | 1,73 | 4,14 | \$ 0,25 | 22,99 |
| Pesos | - | - | 4 | 4 | -2 | |

Utilizando as Métricas descritas na tabela 1 foi possível escolher a liga de alumínio como a mais indicada para se fazer o projeto de otimização, não só pelo fato de ter características mecânicas que servem bem ao que é solicitada da peça de suspensão, como também pelo fato de ser acessível tanto no preço quanto no mercado do Rio de Janeiro. Vale ressaltar que, caso o custo não fosse levado em consideração, o material escolhido para essa otimização seria a fibra de carbono.

Após definir o tipo de metal a ser utilizado devemos escolher a melhor liga para o que a peça é solicitada. Dessa forma, foram selecionadas as ligas mais nobres de Alumínio no mercado. Essas ligas são denominadas aeronáuticas pela sua alta rigidez e baixa densidade cujas siglas são 7075, 6061 e 2024. Em uma comparação entre os 3 tipos de liga, nota-se que o Alumínio da série 2000 tem um preço muito mais elevado que os demais. Como o preço é um fator impeditivo esta liga foi descartada. Sendo assim, comparando a Liga 7075 com a 6061, notamos que a 7075 tem um módulo de elasticidade maior, o que possibilita que receba esforços maiores, porém, a 6061 tem uma tenacidade maior, o que acarreta em uma menor propagação de trinca.

6. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Nesta seção será apresentada a formulação básica do problema da maximização da rigidez, ou seja, de minimização da flexibilidade da estrutura. Para esta classe de problemas, o objetivo é encontrar a distribuição de material no interior do domínio do problema tal que

maximize a rigidez da estrutura, submetida a condições de contorno em deslocamentos e forças, satisfazendo a restrição imposta no volume final da estrutura. Matematicamente, a forma discreta do problema pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} \min \quad & \rho^T c^T T f \\ \text{s.t.} \quad & Kq = f \\ & \int_{\Omega} \rho \, dV \leq V_s \end{aligned} \quad (8)$$

onde c representa a *compliance* da estrutura (ou a sua flexibilidade); f e u são, respectivamente, os vetores de forças e deslocamentos globais; K representa a matriz de rigidez global, a qual é dependente das variáveis de projeto, ρ (densidades); e V_s é um limite superior para o volume de material no domínio Ω . Normalmente, escolhe-se a “densidade” (ρ) do material como sendo a variável de projeto: por convenção, “ $\rho = 1$ ” em um dado ponto significa a presença de material, enquanto que “ $\rho = 0$ ” significa a ausência de material, ou seja, um furo. Valores intermediários de densidade são penalizados de acordo com a seguinte expressão:

$$E(\rho) = \rho^p E^0, \quad \rho > 0 \quad (9)$$

onde p é o parâmetro de penalização; $E(\rho)$ é a rigidez do material em um dado ponto com densidade ρ ; E^0 representa o valor da rigidez do material na fase sólida, ou seja, correspondendo à “ $\rho = 1$ ”. Para valores de p maiores do que 1 (normalmente são utilizados valores $1 \leq p \leq 3$), a rigidez correspondente a valores intermediários de densidade é penalizada segundo uma lei de potência. Como consequência, espera-se que o resultado final do projeto consista em uma estrutura composta apenas por regiões sólidas ($\rho = 1$) ou furos ($\rho = 0$). Esta técnica é conhecida como SIMP (do inglês, Solid Isotropic Material with Penalization).

A figura 13 ilustra o processo de otimização topológica: a partir de uma peça não otimizada (a), que recebe esforços e têm apoios, vai ser discretizada em uma malha de elementos finitos (b). Em seguida, é aplicada a técnica de otimização topológica, gerando uma nova estrutura com regiões preenchidas com material ($\rho = 1$) e outras sem material ($\rho = 0$) (c). Finalmente, é realizada uma suavização na topologia final para se obter uma peça manufaturável, como ilustrado na figura 13(d).

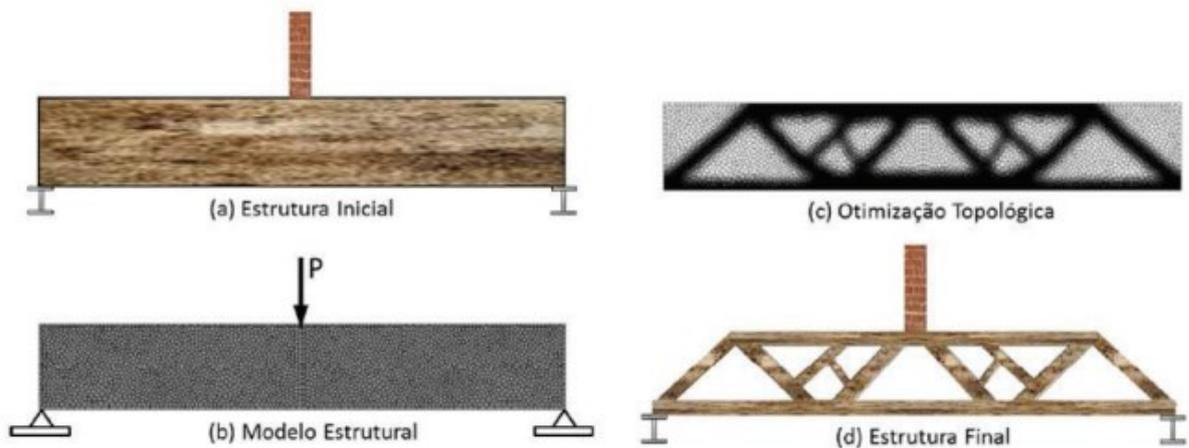


Figura 13 -Exemplo de processo de otimização topológica

Dessa forma, fica claro que o procedimento de otimização topológica se concentra no fato de reduzir o peso de uma estrutura pré-concebida maximizando-se a sua rigidez. As conclusões que podem ser inferidas são: deve se produzir um sólido maciço com as dimensões máximas para o programa utilizar; a rigidez desse sólido inicial deve ser passível de suportar os esforços críticos; e, ao ser finalizada a otimização, deve se fazer uma nova análise de tensão para garantir que o sólido não terá nenhuma tensão maior que a tensão de escoamento.

Sendo assim, foi feita em SolidWorks, uma peça que será tratada como peça inicial a ser otimizada, conforme ilustrado na figura 14. Logo para uma peça que sofre principalmente flexão e torção, essa medida se faz apropriada para a redução de peso. No algoritmo constará a malha dessa peça, as condições de contorno e as forças aplicadas, assim como o material que compõe a peça.

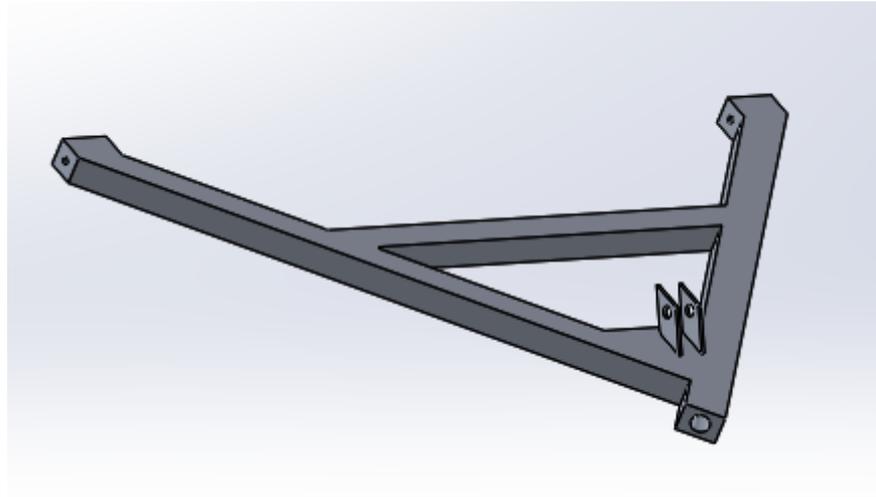


Figura 14 -Peça inicial a ser otimizada

A Figura 15 apresenta o resultado de uma análise de tensões realizada na peça original.

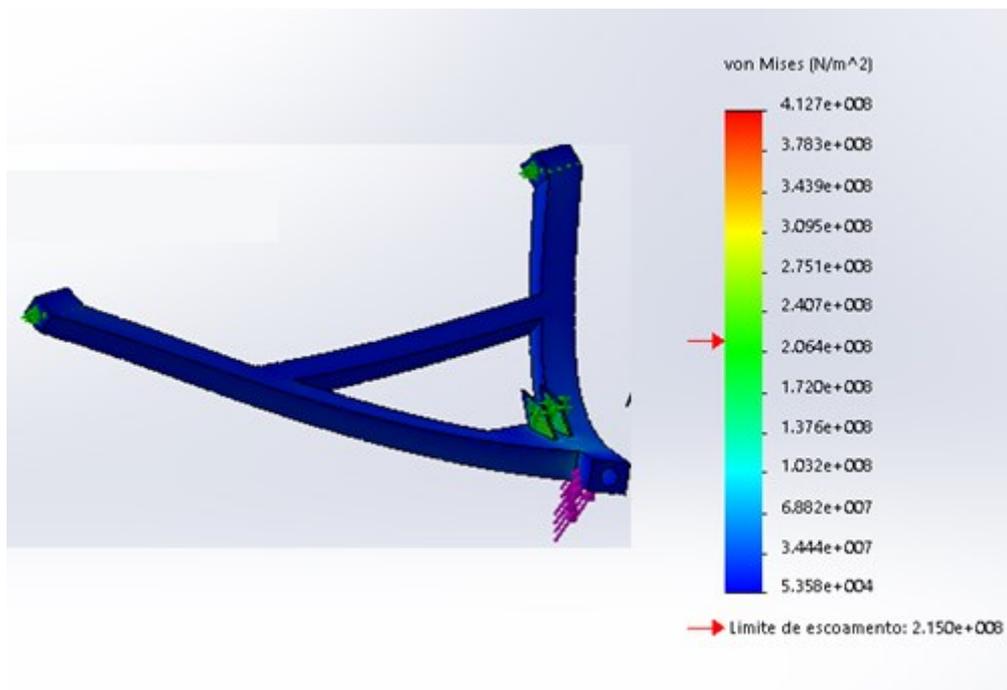


Figura 15 – Análise estática inicial na peça a ser otimizada

Para conseguir fazer o estudo foi utilizado, primeiramente, o software Ansys para se gerar a malha que será a entrada do algoritmo de otimização topológica. De forma a consumir menos tempo e menos esforço computacional foram geradas duas malhas, a primeira de 10.000

elementos finitos hexaédricos – para se fazer os primeiros ajustes paramétricos no algoritmo, a segunda malha de 500.000 elementos finitos hexaédricos – com o intuito de fazer os últimos ajustes finos e gerar o arquivo final.

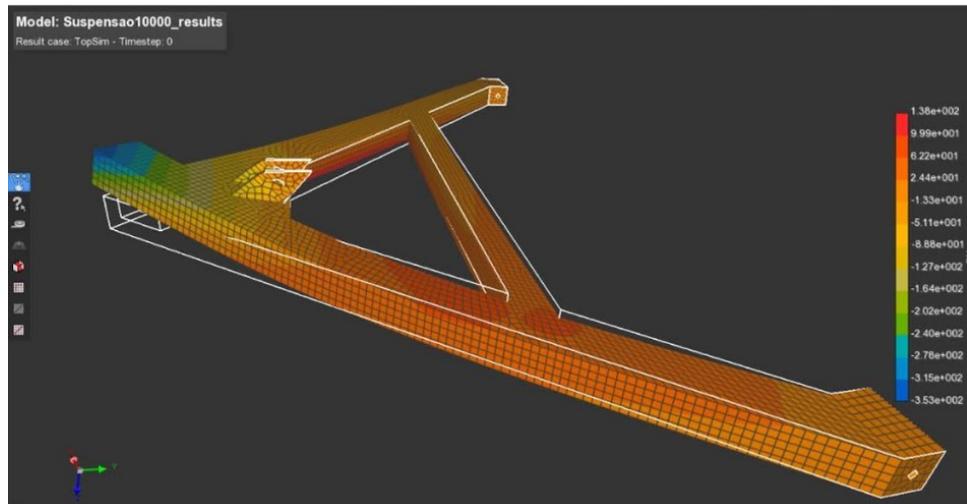


Figura 16 – Malha de Elementos finitos

O algoritmo utilizou como entradas a malha da peça, as condições de apoio e as cargas aplicadas já explicadas anteriormente. Além disso, deve-se colocar o limite de volume que sua peça deve ter de forma a satisfazer as equações (8) e (9). Neste trabalho foi utilizado um fator de redução de volume (limite superior na restrição de volume do problema de otimização) correspondente à 40% do volume original da peça.

Portanto, com o resultado do estudo, e comparando ele com o estudo feito anteriormente na peça atual dada as mesmas condições de contorno podemos dizer que a peça a ser otimizada é mais resistente do que a peça atual. Logo, quando fizermos a otimização teremos uma peça com uma resistência maior que a peça atual. Como a peça atual foi submetida a 4 competições, existe um histórico que comprova que a sua estrutura é rígida o suficiente para suportar os esforços.

Como a viabilidade da resistência da peça se mostrou suficiente, devemos otimizar o sólido para diminuir o peso por meio da retirada de material da peça inicial. A peça inicial pesa 3.5 kgs, como a peça atual se situa em torno de 1.9 kgs deve-se diminuir o volume com agressividade. Como foi utilizado 40% do volume inicial, a peça final gerada pelo algoritmo tem 1.4 kgs.

7. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

Com o algoritmo parametrizado corretamente, foi inserido nos nós da peça onde seria o ponto de ancoragem inferior do amortecedor um novo elemento finito que simularia a mola com constante elástica citada anteriormente. Dessa forma, foi possível convergir para uma geometria como a exposta abaixo.

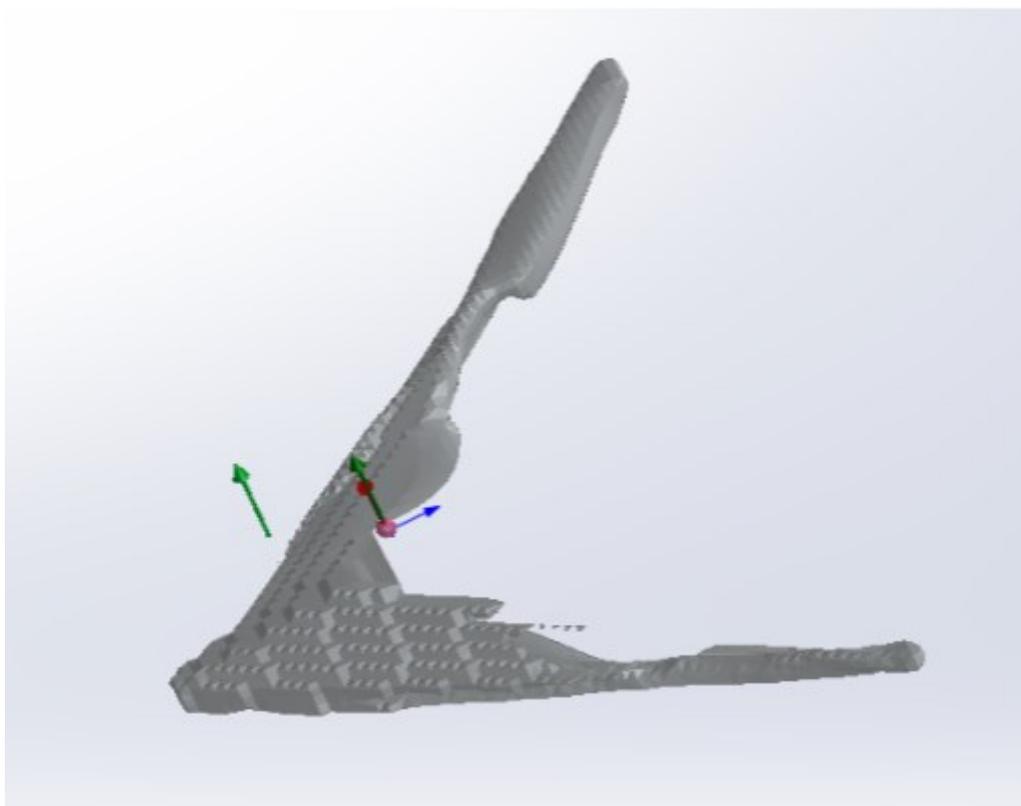


Figura 17 – Geometria Final do algoritmo

Para a otimização topológica foi utilizado um algoritmo no Matlab. A partir dele foi gerado um arquivo em STL (vide figura 17), para que pudesse se importar para o SolidWorks. Como o algoritmo do Matlab, não contempla entender que existem pontos da peça que são fisicamente necessários, se retira material de onde a peça não é muito requisitada, visto que se mantém a flexibilidade da peça. Dessa forma, é indispensável reproduzir a peça de forma similar no SolidWorks adicionando os suportes dos parafusos, do amortecedor e por fim deixar a peça manufaturável.

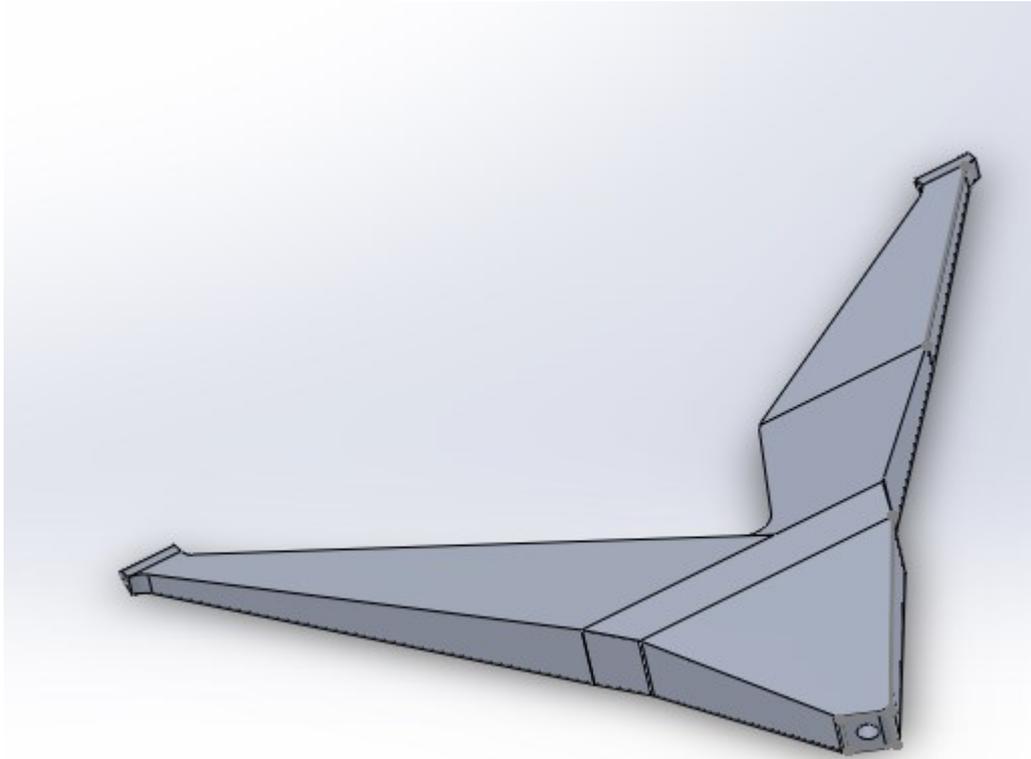


Figura 18 – Peça final no SolidWorks

Este novo sólido tem peso de 1.35 kgs, resultando em um decréscimo de peso de 86% da peça original e 29% da peça atual. Como foi falado anteriormente, deve se fazer uma análise de tensão nesse sólido novo para garantir sua integridade. Novamente, foram utilizadas as tensões máximas do estudo da peça atual para basear a análise de integridade estrutural da peça. Dessa forma foi gerado uma última versão da peça.

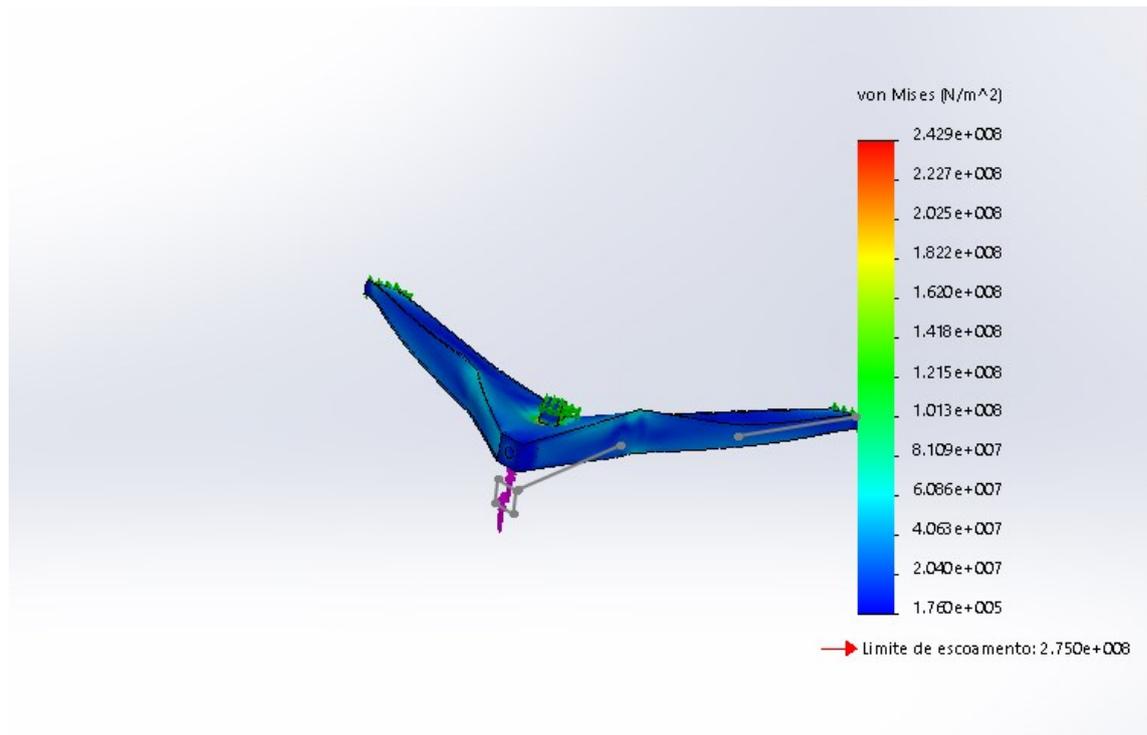


Figura 19 – Análise estática da peça final

Como pode ser visto acima, sob os mesmos esforços a peça otimizada não sofre tensões acima do escoamento, além disso a peça otimizada sofre tensões menores do que a peça atual o que significa que sua geometria é mais adequada para os esforços que a peça é submetida. Dessa forma, a peça pode ser manufaturada pela equipe já que além de ter todos os requisitos físicos preenchidos e ser mais leve, a peça se manterá íntegra durante os esforços da competição.

8. MANUFATURA DA PEÇA

Como a peça gerada no SolidWorks foi propositalmente feita com uma casca de parede igual a 2 milímetros, a equipe pode manufaturar a peça de duas formas: a primeira, e mais econômica, seria comprar chapas de 2 mm no mercado, cortá-las nas medidas corretas e soldá-las conforme a figura 18. Além disso deveria se usar duas peças, os apoios de ancoragem na gaiola e o apoio do terminal rotular.

Outra forma de se usar a peça seria mandar imprimir em 3D, apesar de mais caro, seria mais fácil fabricação e não estaria suscetível a falhas na solda.

9. RECOMENDAÇÕES

Existem algumas formas de continuarmos o trabalho proposto nesse documento. A primeira e mais evidente é a otimização, via o mesmo processo, dos outros braços de suspensão. Para cada carro que a equipe construir existem 4 braços de suspensão diferentes. Logo, podemos utilizar o conhecimento adquirido aqui como base para outros estudos.

A análise da peça como um todo se mostrou complicada para a otimização topológica. Dessa forma, pode ser feito um estudo por partes no braço onde cada parte seja analisada de forma separada, podendo-se chegar a uma estrutura final ainda mais leve.

O campo de otimização topológica para o Mini-Baja oferece muito espaço para redução de peso do veículo, sendo um possível próximo passo aplicar esta técnica em outras peças como engrenagens, cubo de roda e discos de freio.

Algumas melhorias podem ser feitas no estudo como conseguir reproduzir a mola do amortecedor como não-linear. Uma outra forma de melhorar a redução de peso é fazer uma otimização da área de seção do sólido inicial, como por exemplo aumentar a área de seção conforme se aproxima do ponto de ancoragem do amortecedor e de onde a força é aplicada com o intuito de aumentar seu momento de Inércia em áreas críticas.

Além disso, pode se melhorar na automatização do processo uma vez que o presente trabalho teve que criar a malha no Ansys, otimizar no Matlab e fazer a verificação na peça otimizada no SolidWorks. A exportação da malha para o Matlab não teve muitos problemas, contudo o arquivo gerado do Matlab para o SolidWorks foi de difícil utilização, dificultando uma forma que retratasse melhor a geometria utilizada. Sendo assim, uma melhoria seria exportar em um arquivo que seja editável para o SolidWorks.

10. CONCLUSÃO

A otimização topológica se mostrou competitiva no tocante de redução de peso para o braço de suspensão. Com a peça inicial projetada e o algoritmo implementado na peça como um todo foi possível ter uma confiabilidade em como a peça atuará com relação aos esforços solicitante durante a competição.

Devido ao fato da equipe já possuir uma peça que suportou os esforços durante 4 competições, a mesma foi utilizada para servir de balizador de resistência para a otimização topológica. Sendo assim, o presente trabalho conseguiu manter/aumentar a resistência estrutural da peça assim como reduzir o seu peso final, como era o objetivo.

Com isso, podemos manufaturar a peça com o processo de impressão 3D sendo a primeira equipe brasileira a ter um braço de suspensão de alumínio otimizado. Portanto, o trabalho cumpriu com o requisito de diminuir o peso do carro assim como possibilitar uma mudança de patamar da equipe de Mini-Baja da PUC-Rio.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Simulação da Dinâmica do Veículo Baja SAE Modelado por Diagrama de Blocos, Marcelo Tristão, 2016

[2] Seleção de materiais e projeto de um componente de suspensão para protótipo baja SAE, Frederico Oliveira, 2014

[3] Fadiga: Técnicas e Práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço.

[4] “Polytop: a Matlab implementation of a general topology optimization framework using unstructured polygonal finite element meshes”, Journal of Structural Multidisciplinary Optimization, C. Talischi, G. H. Paulino, A. Pereira e Ivan F. M. Menezes, 2012