

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**RODOLPHO VICENTE TEZA**

**ANÁLISE DA PROPOSTA DE MODELO DE BANDEJA DE SUSPENSÃO  
TRASEIRA EM FIBRA DE CARBONO PARA VEÍCULO BAJA**

**PATO BRANCO**

**2022**

**RODOLPHO VICENTE TEZA**

**ANÁLISE DA PROPOSTA DE MODELO DE BANDEJA DE SUSPENSÃO  
TRASEIRA EM FIBRA DE CARBONO PARA VEÍCULO BAJA**

***Analysis of rear suspension tray proposal model in carbon fiber for baja  
vehicle***

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto.

**PATO BRANCO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**RODOLPHO VICENTE TEZA**

**ANÁLISE DA PROPOSTA DE MODELO DE BANDEJA DE SUSPENSÃO  
TRASEIRA EM FIBRA DE CARBONO PARA VEÍCULO BAJA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto.

Data de aprovação: 30/novembro/2022

---

Diego Rizzotto Rossetto  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Fabio Rodrigo Mandello Rodrigues  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

---

Adelino Carlos Maccarini  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

**PATO BRANCO**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus familiares, pelo apoio incondicional durante os longos anos para realizar o curso de Engenharia Mecânica. Cada conselho e cada motivação, foi suporte para alcançar todos os meus objetivos, e almejar mais. Sem vocês, nada disso seria possível.

Agradeço a cada um de meus amigos e colegas, por estarem na mesma caminhada, e desejo-os todo o sucesso na profissão.

Agradeço a Equipe Pato BAJA e a todos os membros por acreditar e confiar em meu trabalho, por poder integrar este maravilhoso time por quatro anos.

Agradecimento especial a meus professores e a UTFPR por toda experiência e conhecimento recebido, por sua valiosa contribuição na minha formação profissional.

“Podem ser encontrados aspectos positivos até nas situações negativas e é possível utilizar tudo isso como experiência para o futuro, seja como piloto, seja como homem.”  
(SENNA. Ayrton, 1989).

## RESUMO

Os materiais compósitos apresentam em sua constituição duas fases, matriz e fase dispersa. Para compósitos reforçados com fibra, tem-se a fibra de carbono como fase dispersa e a resina epóxi como matriz. A fibra de carbono é um compósito comumente conhecido por suas elevadas propriedades mecânicas e seu baixo peso. O trabalho tem como objetivo realizar a análise de substituição do Aço SAE 4130 pela Fibra de Carbono na bandeja de suspensão traseira do tipo *three-link* do protótipo da equipe Pato BAJA. Com a escolha do material, desenvolveu-se a geometria do componente, analisando a facilidade de fabricação e a redução de massa total do sistema e após, foi realizado a simulação de deformação e tensão máxima por MEF em uma análise estática. Com isso, o resultado de tensão e deformação foram inferiores ao do aço SAE 4130 e apresentou 26% de redução de massa. A adversidade está na necessidade de 500% mais investimento para obter essa evolução técnica.

Palavras chave: fibra de carbono; compósitos; baja; suspensão.

## **ABSTRACT**

Composite materials present in their constitution two phases, matrix and dispersed phase. For fiber-reinforced composites, carbon fiber is used as the dispersed phase and epoxy resin is used as the matrix. Carbon fiber is a composite commonly known for its high mechanical properties and low weight. The objective of this work is to carry out the analysis of the replacement of SAE 4130 Steel by Carbon Fiber in the three-link rear suspension tray of the Pato BAJA team prototype. With the choice of material, the geometry of the component was developed, analyzing the ease of fabrication and the reduction of the total mass of the system and after, the simulation of deformation and maximum stress by FEM was carried out in a static analysis. As a result, the stress and strain results were lower than those of the SAE 4130 steel and showed a 26% reduction in mass. The adversity lies in the need for 500% more investment to obtain this technical evolution.

*Keywords: carbon fiber; composites; baja; suspension.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de suspensão traseira <i>three-link</i> .....	18
Figura 2 – Forças atuantes na suspensão traseira.....	19
Figura 3 – Representações esquemáticas de características geométricas e espaciais da fase dispersa; (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.....	20
Figura 4 – Classificação dos materiais compósitos.....	21
Figura 5 – Padrão de deformação compósito reforçado em fibra submetido à aplicação de uma carga de tração.....	22
Figura 6 – Perfis tensão-posição quanto ao comprimento de fibra $l$ é (a) igual ao comprimento $l_c$ , (b) maior do que o comprimento crítico e (c) menor do que o comprimento crítico, para um compósito reforçado com fibras que está submetido a uma tensão de tração igual ao limite de resistência a tração da fibra $\sigma_f^*$ .....	23
Figura 7 – Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas, (b) descontínuas e (c) descontínuas e aleatórias.....	24
Figura 8 – (a) Curvas tensão-deformação esquemáticas para fibra frágil e matriz dúctil (b) Curva tensão-deformação esquemática para um compósito reforçado com fibras alinhadas, sob tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento.....	25
Figura 9 – Diferentes malhas de elementos finitos aplicados a corpos sólidos. Elementos sólidos tetraédricos e elementos sólidos hexaédricos, respectivamente.....	29
Figura 10 – Planos de simetria para materiais ortotrópicos.....	30
Figura 11 – Fluxograma das etapas.....	32
Figura 12 – Drop Test 1m altura.....	33
Figura 13 – Forças atuantes na Bandeja de Suspensão.....	34
Figura 14 – Rampa com 1m altura e simulação no software Adams Car.....	36
Figura 15 – Força Máxima Vertical exercida na Traseira de um protótipo BAJA.....	36
Figura 16 – Placa de Fibra de Carbono T700G – Rockwest Composites.....	38
Figura 17 – Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em tubos de aço SAE 4130.....	39
Figura 18 – Vista lateral da Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em tubos de aço SAE 4130.....	40
Figura 19 – Vista da relação externa da Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em tubos de aço SAE 4130.....	40
Figura 20 – Primeira proposta de modelo e geometria para Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em Fibra de Carbono.....	41
Figura 21 – Vista lateral da Primeira proposta de modelo e geometria para Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em Fibra de Carbono.....	42
Figura 22 – Segunda proposta de modelo e geometria para Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em Fibra de Carbono.....	42
Figura 23 – Proposta final de modelo e geometria para Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em Fibra de Carbono.....	43
Figura 24 – Vista lateral da Proposta final de modelo e geometria para Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em Fibra de Carbono.....	44



<b>Figura 25 – Proposta final de modelo e geometria para Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em Fibra de Carbono com todos os suportes adicionados.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 26 – Vista lateral da Proposta final de modelo e geometria para Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em Fibra de Carbono com todos os suportes adicionados.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 27 – Proposta final de modelo e geometria para Bandeja de Suspensão Traseira Direita do tipo Three-link em Fibra de Carbono com todos os suportes adicionados sob diferente perspectiva.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 28 – Visualização lateral da malha da Bandeja de suspensão traseira do tipo Three-link.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 29 – Gráfico de qualidade de malha para a bandeja de aço SAE 4130.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 30 – Análise estrutural Ansys Workbench e seus passos a passos.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 31 – Plano central da peça com área interna e externa.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 32 – Plano médio com as características externas e internas.....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 33 – Visualização 3D da malha Tetraédrica Parabólica.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 34 – Configurações do ACP.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 35 – Configurações dentro do Static Structural do Ansys Workbench.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 36 – Pontos de Fixação em Azul e Força vertical aplicada em Vermelho..</b>	<b>54</b>
<b>Figura 37 – Tensão equivalente em MPa para a Bandeja de Suspensão em Aço SAE 4130.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 378 – Tensão equivalente em MPa para a Bandeja de Suspensão em Fibra de Carbono.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 39 – Deformação máxima em mm da Bandeja de Suspensão em aço SAE 4130.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 40 – Deformação máxima em mm da Bandeja de Suspensão em Fibra de Carbono.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 41 – Suporte para Uniball – Fixação ao chassi do protótipo.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 42 – Suporte para Amortecedor.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 43 – Suporte para Buchas – Fixação a manga de eixo do Protótipo.....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Limites de resistência a tração para três materiais compósitos reforçados com fibras unidirecionais, com teor de fibra de 50%v.....</b>	<b>26</b>
<b>Tabela 2 - Classificação dos tipos de fibras de carbono.....</b>	<b>28</b>
<b>Tabela 3 - Propriedades do Aço SAE 4130.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabela 4 – Propriedades da Placa de Fibra de Carbono T700G.....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 5 – Impacto massa para os componentes da Bandeja de Suspensão traseira em Fibra de Carbono.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 6 – Impacto massa para os componentes da Bandeja de Suspensão traseira em Fibra.....</b>	<b>59</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP	<i>Ansys Composite PrepPost</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador
CNC	Controle Numérico Computadorizado
EUA	Estados Unidos da América
MEF	Método de Elementos Finitos
PAN	Poliacrilonitrila
SAE	Sociedade Internacional dos Engenheiros Automotivos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>14</b>
1.2.1	Objetivos gerais.....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Competições BAJA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Equipe Pato BAJA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Sistema de suspensão traseira</b> .....	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>Forças atuantes no sistema de suspensão traseira</b> .....	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>Materiais Compósitos e suas propriedades</b> .....	<b>20</b>
<b>2.6</b>	<b>Compósitos reforçados em fibra</b> .....	<b>21</b>
<b>2.7</b>	<b>Propriedades direcionais das fibras</b> .....	<b>21</b>
<b>2.8</b>	<b>Influência do comprimento da fibra</b> .....	<b>22</b>
<b>2.9</b>	<b>Orientação e concentração das fibras</b> .....	<b>23</b>
<b>2.10</b>	<b>Compósitos com fibras contínuas e alinhadas</b> .....	<b>24</b>
2.10.1	Comportamento tensão-deformação em tração – carregamento longitudinal .....	24
2.10.2	Comportamento elástico – carregamento longitudinal.....	25
2.10.3	Limite de resistência à tração longitudinal.....	26
2.10.4	Limite de resistência à tração transversal .....	26
<b>2.11</b>	<b>Matriz polimérica</b> .....	<b>27</b>
<b>2.12</b>	<b>Fibra de carbono</b> .....	<b>27</b>
<b>2.13</b>	<b>Tipos de fibra de carbono</b> .....	<b>28</b>
<b>2.14</b>	<b>Método de elementos finitos</b> .....	<b>28</b>
<b>2.15</b>	<b>Simulação para materiais compósitos</b> .....	<b>30</b>
<b>2.16</b>	<b>Elementos de malha</b> .....	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Análise de esforços atuantes na suspensão traseira de um protótipo BAJA</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Fibra de carbono</b> .....	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Softwares para desenho 3D e simulação</b> .....	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>55</b>

<b>4.1</b>	<b>Simulações .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>Impacto da massa .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3</b>	<b>Impacto do custo.....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A Competição BAJA SAE foi desenvolvida pela Sociedade Internacional dos Engenheiros Automotivos (SAE) e sua primeira edição foi no ano de 1976. A competição foi sediada na Universidade da Carolina do Sul nos Estados Unidos da América e contava com aproximadamente 10 carros. Ao longo dos anos, a competição foi tomando grandes proporções, chegando a 110 carros por evento. Atualmente, ocorrem no Brasil, México e África do Sul. Nos EUA são realizadas as competições regionais e a mais importante das etapas, a Competição Mundial. O acesso a competição Mundial ocorre quando os três primeiros protótipos do país, finalizam a Competição Nacional, em nosso caso, a Competição BAJA SAE Brasil.

O protótipo BAJA é um veículo monoposto com estrutura de gaiola e segue um rígido regimento de normas desenvolvidas pela SAE. O motor tem seu uso e modelo padronizado para todas as competições mundiais, desenvolvido pela companhia *Briggs and Stratton*, conta com 10hp e 305cc. O principal intuito da competição é instigar jovens estudantes de diversas áreas a desenvolver suas habilidades em um amplo projeto para modernização e evolução constante do protótipo. As áreas de gestão, suspensão, direção e *powertrain*, são as mais conhecidas e trabalhadas nas equipes em todo o mundo.

As normas da SAE contam com diversas instruções que permitem a criação de protótipos seguros, amplos e competitivos em todas as suas formas. O principal objetivo dos protótipos BAJA são transpor obstáculos como rampas, troncos, valetas e resistir a uma prova de enduro de quatro horas. As normas SAE exigem também que carro e piloto disponham de aptidão e segurança para competir em seu melhor estado.

Durante esses 10 anos de existência, a equipe Pato BAJA realizou uma série de evoluções no protótipo, com o objetivo de redução de massa total do veículo e da melhoria dinâmica para as provas, através da aquisição de novos amortecedores, a substituição dos materiais do chassi e o redimensionamento de componentes de suspensão e *powertrain*, utilizando novos materiais, mais modernos e mais leves. Para isso, a equipe investiu em simulações MEF para assegurar a durabilidade e resistência de peças, otimizando sua geometria e assim, trazendo significantes reduções de massa dos seus subsistemas. As modificações promovidas

recentemente, reduziram o peso do veículo de 204kg em 2020 para 172kg de massa total em 2022. Essa redução de 15,6 % na massa total do veículo, resultado do pacote de evoluções promovidos em 2022, tornaram o veículo extremamente competitivo.

Dessa forma, gerindo o conhecimento de anos de boas práticas de engenharia no desenvolvimento do protótipo, a equipe necessita de novas soluções para assegurar a evolução e a competitividade do veículo, proporcionando cada vez mais *performance*. Determinando-se que a utilização do motor é padronizada para todos os carros, as soluções para aumento de performance passam a ser reduzidas e novas possibilidades devem ser criadas. Como o propósito a ser alcançado é a constante redução de massa, resistência dos componentes, melhoria na performance e na velocidade final, concluímos que a utilização de materiais mais modernos e tecnológicos, deverá ser a solução para o desenvolvimento e a evolução ao qual equipe Pato BAJA deverá concentrar seus esforços.

Desta forma, o presente trabalho busca desenvolver uma análise da substituição de materiais, utilizando-se de produtos comerciais facilmente encontrados no mercado. Posteriormente, realizar o desenvolvimento de projeto e simulação através de software CAD 3D, projetando e propondo uma nova geometria que atenda aos pontos de fixação do modelo anterior de suspensão da Equipe Pato BAJA, e que, por meio de simulações numéricas de análise estática, poderá ser verificada a deformação e tensão máxima aplicada ao componente.

Como conclusão, será apresentada as oportunidades de redução de massa dos componentes e do veículo, a análise comparativa de ambos os materiais utilizados nos componentes, e principalmente, o impacto do custo da substituição do material.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos gerais**

Desenvolver uma nova bandeja de suspensão do tipo *Three-link* do protótipo da Equipe Pato BAJA, para a substituição do material aço SAE 4130 para Fibra de Carbono, e analisar as características da deformação e tensão máxima entre o modelo atual e do modelo proposto, por meio da utilização de simulações numéricas, para que as propriedades de resistência mecânica se assemelhem. Ao final, apresentar o impacto da redução da massa e custo do novo componente.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar e comparar as propriedades mecânicas do Aço SAE 4130 e da fibra de carbono comercial;
- Analisar a topologia de suspensão traseira utilizada pelo veículo, para definir a geometria de modelo do novo componente, que se adeque ao protótipo, e seja de fácil manufatura;
- Realizar a simulação numérica no *software ANSYS*, bem como a definição dos parâmetros necessários e metodologias adequadas para a solução;
- Validar se a proposta de mudança através dos resultados das simulações numéricas, possui a resistência desejada, semelhante ao modelo atual em aço SAE 4130;
- Verificar o custo da mudança do material e do componente, relacionando com a massa e resistência mecânica obtida.

### 1.3 Justificativa

O presente trabalho busca realizar um estudo acerca da substituição do material da bandeja de suspensão traseira do tipo *Three-link* de um protótipo BAJA, de aço SAE 4130 por Fibra de Carbono, e assim quantificar a perda de massa, mantendo a resistência mecânica semelhante ao modelo anterior.

As análises serão realizadas por meio de simulações computacionais e têm por objetivo contribuir com a Equipe Pato BAJA, sediada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, no desenvolvimento do protótipo de competição do tipo BAJA, mantendo as projeções futuras da equipe relacionadas a aplicação de novos materiais e desenvolvimento de novos projetos para melhoria de desempenho, principalmente com relação a redução de massa.

Além disso, tem-se a intenção de estimular a Equipe Pato BAJA quanto ao desenvolvimento de novos projetos com materiais compósitos para as diferentes partes do veículo em que as mudanças sejam viáveis e aplicáveis, e que resultarão numa constante evolução do protótipo.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Competições BAJA

As competições no Brasil iniciaram a partir do ano de 1995 e teve a sua primeira etapa realizada em São Paulo. Em 1997, a SAE BRASIL passou também a apoiar as competições regionais, dessa forma, as competições ocorrem em dois formatos, sendo eles: Etapa Regional e Etapa Nacional (SAE BRASIL, 2021).

Nas competições, os veículos passam pela fase de inspeção técnica para assegurar que a norma foi seguida em todos os elementos do protótipo, também conhecida como prova de segurança estática. Após algumas horas de análise pela equipe de inspeção técnica, se o protótipo estiver completamente em concordância com as normas SAE BRASIL, receberá a aprovação e o selo que será afixado ao protótipo, e que lhe dará o direito de prosseguir com as provas dinâmicas; caso contrário, o protótipo é desaprovado e retirado da competição por desacordo as Normas de Engenharia (SAE BRASIL, 2021).

Nas provas dinâmicas, o veículo passa por testes de conforto e suspensão, e rígido teste de funcionamento dos sistemas de frenagem. Aprovados na segurança dinâmica, os juízes colam um selo e garantem que o carro está apto tanto estaticamente, quanto dinamicamente, para que prossiga nas provas da competição. Os protótipos desaprovados na prova dinâmica, são retirados da competição (SAE BRASIL, 2021).

Os membros da equipe também são avaliados e passam pelas apresentações de projeto, os quais exibem *banners* sobre a evolução do desenvolvimento do projeto e propostas de evolução e melhorias técnicas entre uma temporada para outra. É concedido o tempo de cinco minutos para explicar aos juízes e mais cinco minutos de *feedbacks*, para que possam demonstrar como o protótipo foi construído e das evoluções implementadas aos projetos, componentes e ao protótipo (SAE BRASIL, 2021).

Em seguida, o veículo passa por provas de *Suspension and Traction* (ST), Manobrabilidade, Tração, Aceleração, Retomada e Velocidade Final. Neste mesmo dia, após todos os veículos passarem pelas provas dinâmicas da competição, são direcionados à prova de Super Prime, conhecida mundialmente no mundo dos *rallys* como "*Head to Head*". Na pista de corrida, a prova conta com um caminho mais longo e outro mais curto, duas equipes alinhadas de cada vez. Cada equipe utiliza uma das

pistas, aos quais os protótipos deverão passar por ambos de forma concomitante, uma vez realizada a volta na sua atual pista de largada deve-se realizar a volta na outra pista, de forma que ambas as equipes intercalem a utilização de ambas as pistas. Vence quem passar pela linha de chegada em primeiro dentre os dois competidores, e o chaveamento faz com que os perdedores sejam automaticamente eliminados, sem repescagem. A competição segue com o sorteio dos cruzamentos, até que se chegue ao final com um vencedor (SAE BRASIL, 2021).

Para todas as competições é atribuída pontuação distinta ao vencedor, com redução progressiva da pontuação aos demais colocados. Ao final, vencerá a equipe que apresentar a maior pontuação de todas as provas avaliadas (SAE BRASIL, 2021).

Chegando ao último dia de competição, é realizada a prova de Enduro, que coloca à prova todo o protótipo, a sua engenharia e projeto. O enduro é realizado ao longo de quatro horas de duração, e somará mais pontos quem der mais voltas na pista, ao qual conta com valetas, rampas, troncos, escadas e obstáculos que apenas veículos conhecidos como fora de estrada (*off road*) ousariam atravessá-los. Neste teste final do protótipo, há paradas para reabastecimento e hidratação de pilotos. Normalmente é a prova que mais exige fisicamente dos pilotos e da qualidade técnica e construtiva dos protótipos, que muitas vezes desistem ou são eliminados da competição justamente pela dureza e nível de exigência (SAE BRASIL, 2021).

## **2.2 Equipe Pato BAJA**

Fundada em 2012 sob o nome de SAE de BAJA, teve seu primeiro protótipo construído e participando de uma competição no ano de 2013. Por questões institucionais, seu nome foi alterado para Pato BAJA a partir de 2015. Nesses 10 anos de existência, a equipe realizou relevantes avanços e conquistas, tanto para seus integrantes de equipe, alunos, professores, para a UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, quanto para a cidade de Pato Branco – PR. A equipe Pato BAJA participou de oito competições Regionais Sul e cinco participações em etapas Nacionais, e em sua melhor colocação, conquistou o 1º lugar no Regional Sul de 2022 (EQUIPE PATO BAJA, 2019).

### 2.3 Sistema de suspensão traseira

O modelo de suspensão traseira escolhido para o desenvolvimento é o sistema independente. Esse sistema permite que as rodas trabalhem verticalmente independentes, sem que o outro lado seja acionado da mesma maneira. Esse sistema garante uma maior rigidez de rolagem para o veículo, maior deflexão da suspensão, permite a escolha da geometria de suspensão adequada para controle do centro de rolagem, e com isso, obter um melhor controle em relação à mudança de terreno (GILLESPIE, 1992).

A geometria de suspensão escolhida para atender o tipo de suspensão independente será o *Three-link semi-trailing arm*, como podemos analisar na Figura 1. Conhecido como *Three-link*, apresenta um *Trailing arm* ou braço arrastado e dois *Control Arms* ou braços laterais (GILLESPIE, 1992).

Figura 1 – Sistema de suspensão traseira *three-link*



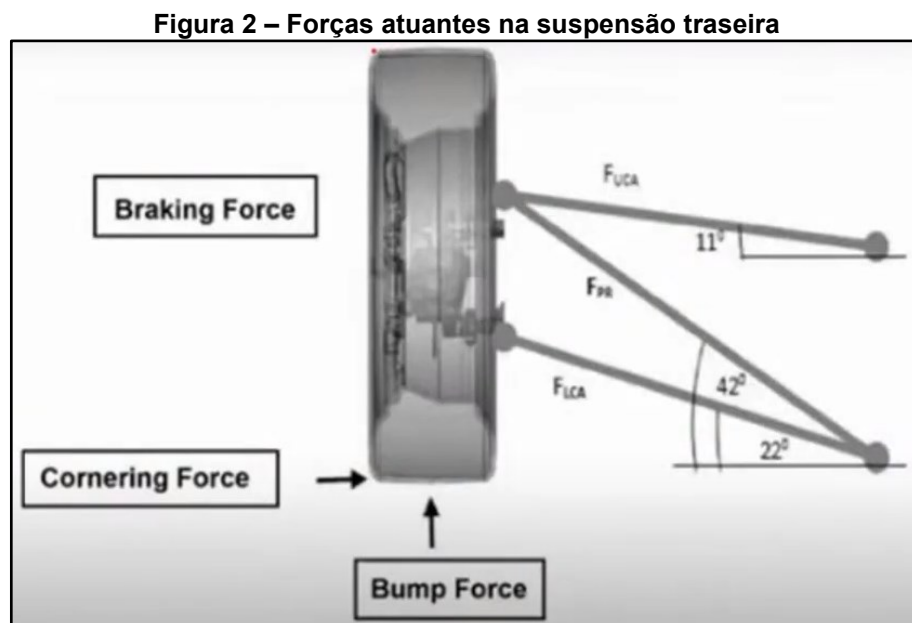
Fonte: Autoria própria (2022)

A escolha feita pela Equipe Pato BAJA se deve à boa controlabilidade de *roll center*, *camber* e convergência, maior eficiência em acelerações longitudinais, indução do comportamento sobreesterçante, além de possuir uma menor massa quando comparado ao modelo duplo “A”, modelo esse utilizado na dianteira e na traseira em protótipos anteriores.

## 2.4 Forças atuantes no sistema de suspensão traseira

Para a análise de forças atuantes, consideraremos a verificação por meio de *Drop test*. O método consiste na soltura do veículo em queda livre, de uma altura calculada, a fim de simular alguns obstáculos que são encontrados nas competições, como rampas. Por meio do *Drop test*, conseguimos determinar as forças atuantes entre solo/pneu e dessa forma, encontrar as forças atuantes na bandeja de suspensão do veículo (LIMA, 2011).

Para execução teórica do *Drop test* será necessário a determinação da energia potencial quando o protótipo está na altura determinada, bem como, o cálculo da energia cinética no instante antes do impacto por conservação de energia, e o cálculo da força máxima de impacto durante a colisão via conservação de momento linear. A força resultante é perpendicular ao solo, como podemos ver na Figura 2. (LIMA, 2011).



Fonte: ASSAD (2020)

Considerando que o protótipo salte de uma rampa com um metro de altura e caia exatamente com as quatro rodas no chão, e considerando-se toda sua energia potencial e seu deslocamento do amortecedor, para assim calcular a força de reação pneu/solo (REFATTI, 2015).

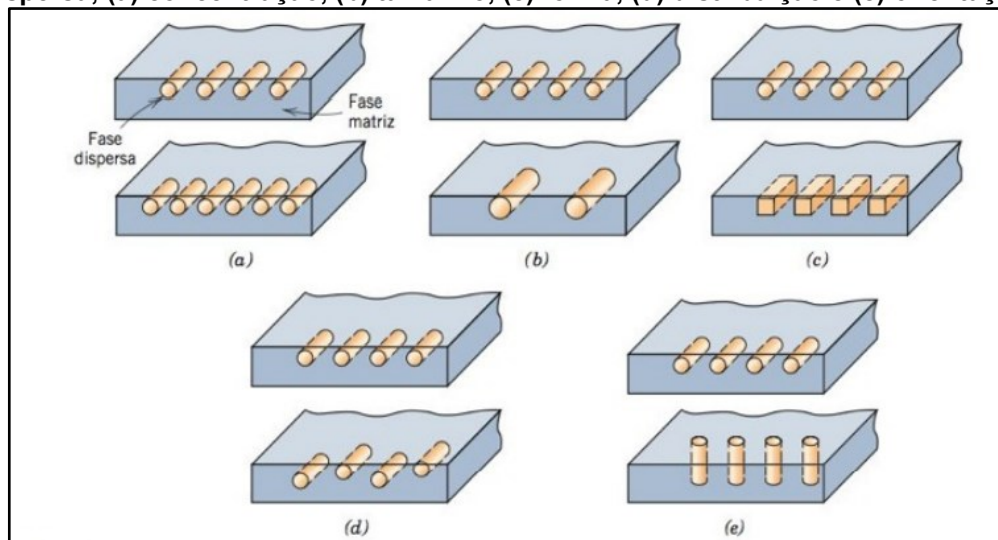
Para o *Drop test*, será necessário informações como o deslocamento do sistema amortecedor-mola, tempo do impacto, altura da queda, distribuição de massa e massa total do veículo (REFATTI, 2015).

## 2.5 Materiais Compósitos e suas propriedades

A definição de materiais compósitos se deu na metade do século XX, tornando-o distinto de materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos. Os compósitos são materiais que em sua essência, apresentam características de material multifásico e artificialmente produzido. Suas fases são constituídas quimicamente diferentes e apresentam uma interface distinta. A principal ideia por trás dos materiais compósitos, refere-se à apresentação do aprimoramento das características mecânicas em relação aos outros materiais (CALLISTER, 2012).

Além disso, os compósitos apresentam duas fases distintas, conhecidas como Matriz e Fase Dispersa. A matriz é contínua e normalmente envolve a segunda fase, conhecida por fase dispersa, que por sua vez, pode ser definida pela geometria da forma, pelo tamanho, pela orientação ou pela distribuição, conforme a Figura 3 (CALLISTER, 2012).

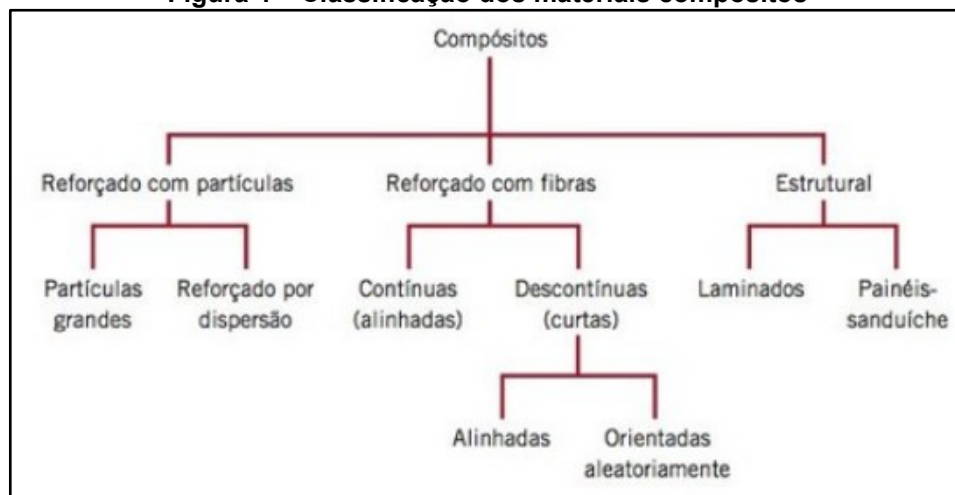
**Figura 3 – Representações esquemáticas de características geométricas e espaciais da fase dispersa; (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e (e) orientação.**



Fonte: CALLISTER (2012)

Os materiais compósitos também podem ser classificados em três divisões e suas subsequentes subdivisões: Materiais reforçados por partícula, materiais reforçados por fibra ou materiais estruturais, conforme Figura 4.

**Figura 4 – Classificação dos materiais compósitos**



Fonte: CALLISTER (2012)

Seguindo a proposta do trabalho, serão apresentadas as características e propriedades de compósitos, abordando principalmente a fibra de carbono, que será o material escolhido para composição do componente proposto.

## 2.6 Compósitos reforçados em fibra

Os compósitos reforçados em fibra apresentam em sua fase dispersa a composição de fibra. Seu principal objetivo é unir o baixo peso com a elevada resistência mecânica, ou seja, suas características são expressas em razões de limite de resistência à tração e peso específico, e entre módulo de elasticidade e peso específico. Dessa forma, esses materiais buscam um baixo peso específico para ambas as fases, seja ela matriz ou dispersa (CALLISTER, 2012).

## 2.7 Propriedades direcionais das fibras

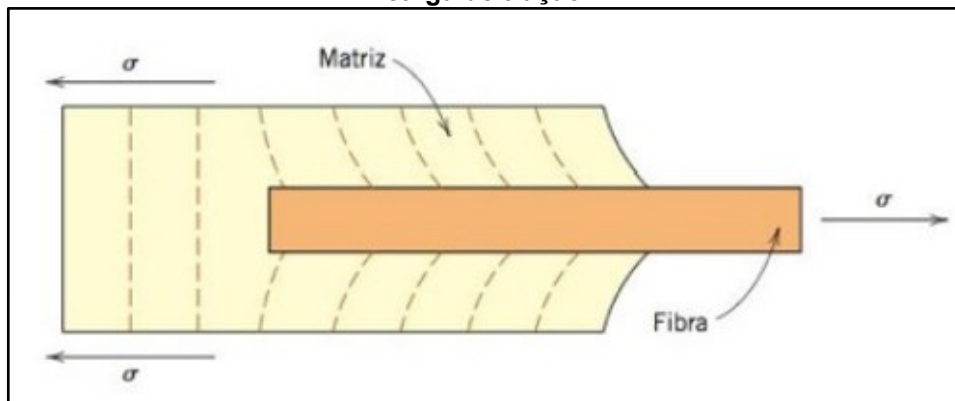
Conhecido por ser um material ortotrópico, ou seja, que apresenta uma dependência da direção para obter as propriedades mecânicas, as fibras se diferenciam de materiais como os metais, que apresentam comportamentos isotrópicos. Essa propriedade permite que o projetista adeque a direção particular para absorção das tensões e tornando-o mais eficiente estruturalmente. Essas informações são disponibilizadas por fabricantes para comportamentos longitudinais, e até mesmo para comportamentos transversais, de modo a avaliar a performance da resina e adesão da fibra na matriz (NASSEH, 2007).

As fibras na forma de manta e fios apresentam reforços na direção longitudinal do fio em que estão dispostos. Porém, outra opção são os tecidos ortogonais que possuem reforços em duas direções e podem fornecer um arranjo em mais direções. Esse fator é técnico e fundamental e deve ser escolhido conforme os esforços que atuam no componente a fim de obter as melhores propriedades mecânicas (RUIZ; VERISSIMO, 2021).

## 2.8 Influência do comprimento da fibra

Os materiais compósitos reforçados em fibra, quando submetidos a uma carga, sua transmissão ocorre pelas fibras até a matriz. Esse fenômeno é conhecido como grau segundo, e compõe parte da resistência mecânica de um compósito. Quando aplicado tensão, a ligação fibra matriz cessa nas extremidades da fibra, logo, não há transmissão de carga pela matriz nas extremidades da fibra, conforme Figura 5. Dessa forma, há necessidade de um comprimento crítico para que haja um aumento efetivo da resistência e rigidez de um compósito (CALLISTER, 2012).

**Figura 5 – Padrão de deformação compósito reforçado em fibra submetido à aplicação de uma carga de tração.**



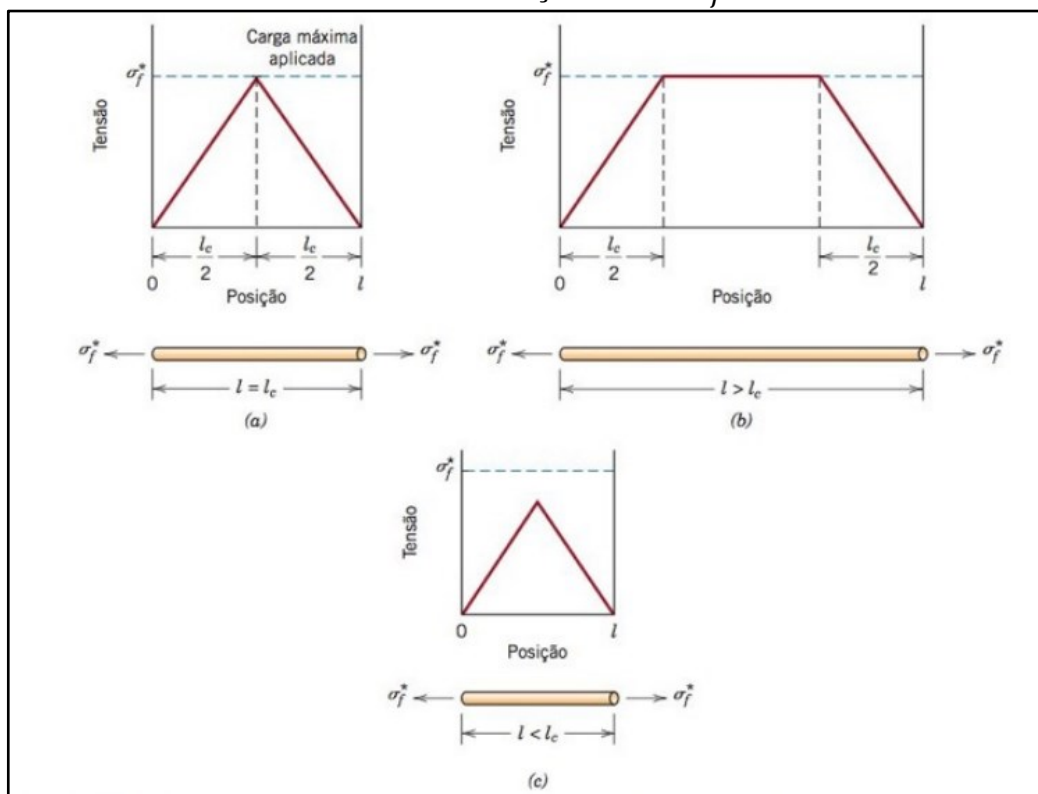
Fonte: CALLISTER (2012)

O comprimento crítico ou  $l_c$  é a relação da resistência com o diâmetro da fibra pela resistência da ligação entre a fibra-matriz com o limite de escoamento em cisalhamento da matriz.

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}$$

Pode-se perceber que a carga máxima na fibra atinge apenas o ponto médio da fibra. Logo, com o comprimento da fibra  $l$  maior, torna-se mais efetivo o reforço que a fibra proporciona, e isso pode ser percebido na Figura 6 em que  $l > l_c$ . Para essas fibras em que temos  $l > l_c$ , são chamadas de contínuas. Já as descontínuas ou curtas têm o comprimento inferior a  $l_c$ . Quando temos um comprimento muito inferior, a deformação ocorre ao redor da fibra que por sua vez, tem um papel pequeno no reforço e recebendo pouca transferência de tensão. Logo, para que haja uma melhora significativa na resistência de um material compósito, o ideal é que as fibras sejam contínuas (CALLISTER, 2012).

**Figura 6 – Perfis tensão-posição quanto ao comprimento de fibra  $l$  é (a) igual ao comprimento  $l_c$ , (b) maior do que o comprimento crítico e (c) menor do que o comprimento crítico, para um compósito reforçado com fibras que está submetido a uma tensão de tração igual ao limite de resistência a tração da fibra  $\sigma_f^*$**



Fonte: CALLISTER (2012)

## 2.9 Orientação e concentração das fibras

Algumas propriedades de materiais compósitos reforçados com fibras, possuem influência significativa pela orientação e concentração. Em relação à orientação, podem variar entre alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em



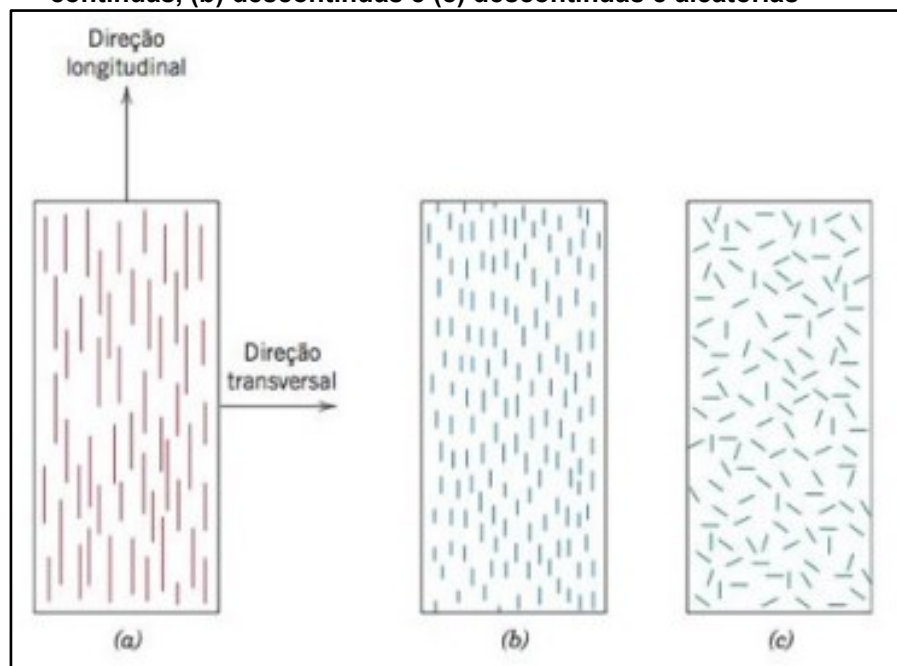
uma única direção ou um alinhamento completamente aleatório. Normalmente, as fibras contínuas são alinhadas, enquanto as descontínuas podem ser alinhadas, aleatórias ou parcialmente orientadas. Obtemos as melhores propriedades quando temos a distribuição uniforme das fibras (CALLISTER, 2012).

## 2.10 Compósitos com fibras contínuas e alinhadas

### 2.10.1 Comportamento tensão-deformação em tração – carregamento longitudinal

O comportamento tensão-deformação das fases fibra e matriz, frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada, influenciam nas respostas mecânicas do compósito. Com as fibras alinhadas, temos propriedades altamente anisotrópicas, ou seja, dependem da direção na qual são medidas, conforme Figura 7, podemos identificar o ordenamento e as direções dos materiais compósitos reforçados com fibras (CALLISTER, 2012).

**Figura 7 – Representações esquemáticas de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas, (b) descontínuas e (c) descontínuas e aleatórias**

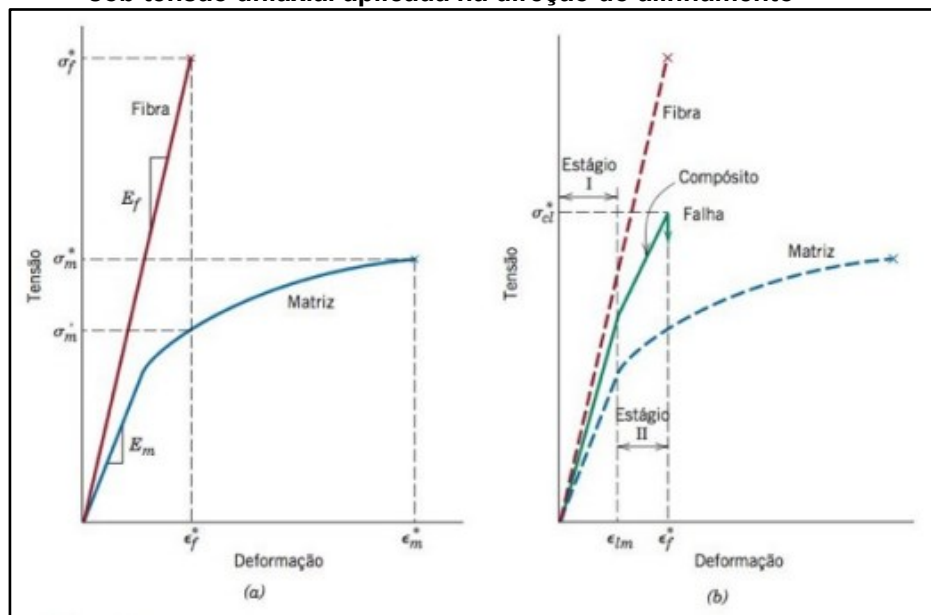


Fonte: CALLISTER (2012)

Considerando o comportamento tensão em função da deformação para as fases da matriz e fibra, e que a fibra seja totalmente frágil e a fase matriz razoavelmente dúctil, conforme Figura 8, a resposta para esse compósito em questão será a tensão-deformação uniaxial. Durante o estágio I, ambas as fases se deformam elasticamente e normalmente temos que é linear. Após, a matriz escoar e deforma-se

plasticamente enquanto as fibras continuam a se alongar elasticamente. Isso ocorre devido ao limite de resistência à tração das fibras serem superiores em relação ao limite de escoamento da matriz. Esse processo pode ser visto no estágio II, e ocorre muito próximo da linearidade. Além disso, passando-se do estágio I para II, a proporção da carga aplicada suportada pelas fibras aumenta (CALLISTER, 2012).

**Figura 8 – (a) Curvas tensão-deformação esquemáticas para fibra frágil e matriz dúctil (b) Curva tensão-deformação esquemática para um compósito reforçado com fibras alinhadas, sob tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento**



Fonte: CALLISTER (2012)

### 2.10.2 Comportamento elástico – carregamento longitudinal

Considerando o comportamento elástico de um compósito com fibras contínuas e orientadas, que é carregado na direção de alinhamento das fibras, e que sua ligação interfacial é muito boa, podemos considerar como isodeformação e há deformação no compósito (CALLISTER, 2012).

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \quad (1)$$

Em casos da deformação entre matriz e fibra serem elásticas, temos a seguinte expressão para o módulo de elasticidade de um compósito com fibras contínuas e alinhadas na direção longitudinal  $E_{cl}$  (CALLISTER, 2012).

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad (2)$$

E a razão entre a carga suportada pelas fibras e a carga suportada pela matriz em um carregamento longitudinal (CALLISTER, 2012).

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (3)$$

### 2.10.3 Limite de resistência à tração longitudinal

A resistência deve ser tomada como a tensão máxima na curva tensão-deformação, e normalmente marca a fratura da fibra e o início da falha no compósito.

Os limites de resistência variam conforme as propriedades da fibra e da matriz, e de sua ligação interfacial. Se considerar que para o caso mais comum, a fibra falhará antes que a matriz, então temos que: (CALLISTER, 2012).

$$\epsilon_f^* < \epsilon_m^* \quad (4)$$

Temos que, a expressão para a resistência longitudinal do compósito  $\sigma_{cl}^*$  (CALLISTER, 2012).

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_m' (1 - V_f) + \sigma_f^* V_f \quad (5)$$

Na qual  $\sigma_m'$  é a tensão na matriz quando falha a fibra e  $\sigma_f^*$  é o limite de resistência à tração da fibra. (CALLISTER, 2012).

**Tabela 1 – Limites de resistência a tração para três materiais compósitos reforçados com fibras unidirecionais, com teor de fibra de 50%v**

Material	Limite de Resistência à Tração Longitudinal (MPa)	Limite de Resistência à Tração Transversal (MPa)
Vidro-Poliéster	700	20
Carbono (Alto modulo) - Epóxi	1000	35
Kevlar - Epóxi	1200	20

Fonte: CALLISTER (2012)

### 2.10.4 Limite de resistência à tração transversal

A resistência de compósitos unidirecionais e contínuos são anisotrópicos, logo projetados para um carregamento na direção de alinhamento de suas fibras, para maior resistência. Em algumas exceções, as cargas de tração transversais podem

ocasionar falha prematura, conforme limite de resistência à tração transversal na Tabela 1. As propriedades que influenciam nos limites de resistência à tração transversal são propriedades da fibra e matriz, resistência da ligação e presença de vazios (CALLISTER, 2012).

### **2.11 Matriz polimérica**

As matrizes poliméricas sintéticas foram desenvolvidas nos últimos 60 anos. Possuem estrutura simples e sua molécula final, conhecida como monômero, pode ser formada de milhares de unidades repetidas. Sua parte reativa origina as resinas, que quando juntas a matriz dispersa, formam um material compósito. Quando apresentam ligações cruzadas fortes para serem rompidas por um aquecimento moderado, temos os termofixos. Os termofixos ou parte reativa então originam as resinas comuns no mercado, como poliéster, *epoxy*, fenólica, entre outras (NASSEH, 2007).

As resinas epóxi formam o grupo de maior importância quando falamos em matrizes poliméricas, devido à grande escala de propriedades, tornando-a flexível a diversas aplicações. São ótimas para resistência mecânica e química, além de ótimas quanto a seu tempo e temperatura de cura, por fim, a um preço adequado ao mercado (d'ALMEIDA; MONTEIRO, 1995).

### **2.12 Fibra de carbono**

São manufacturados pelo processo de pirólise controlada de precursores orgânicos em forma de fibras. O primeiro documento que reportou o uso de fibra de carbono é do ano de 1880 quando Thomas Edison obteve a patente para manufatura de filamentos de carbono para as lâmpadas elétricas. Já na década de 60, teve sua fabricação comercial iniciada para aplicação na indústria aeroespacial obtendo estruturas de baixo peso e alta resistência (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Os precursores mais comuns para a fabricação de fibra de carbono são a poliacrilonitrila (PAN), fibras de celulose (*rayon*, algodão), piche de petróleo e alcatrão de hulha. Após a pirólise, que é basicamente o tratamento térmico do precursor para a remoção de oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, obtém-se a fibra de carbono. Suas propriedades mecânicas elevadas são decorrentes do aumento de cristalinidade e orientação, e pela redução dos defeitos na fibra. Para que seja verídico, o precursor

altamente orientado deve se manter assim durante todo o processo de estabilização e carbonização sob estiramento (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Os compósitos de fibra de carbono são ideais para as aplicações na qual exigem resistência, rigidez e menor peso. Quando a comparação é feita com o aço, as fibras de carbono possuem altíssima resistência e também módulos específicos, e no geral, as fibras de carbono possuem uma excelente combinação de força. (BAJPAI, 2021).

### 2.13 Tipos de fibra de carbono

Para caracterizar a fibra de carbono, temos as principais variáveis: Módulo de elasticidade, resistência à tração e temperatura do tratamento térmico final. Na Tabela 2, podemos averiguar os dados (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

<b>Tabela 2 – Classificação dos tipos de fibras de carbono</b>	
<b>Classificações</b>	<b>Variáveis</b>
	<b>Referente ao Módulo de Elasticidade</b>
Ultra-Alto módulo	Módulo maior que 500 GPa
Alto módulo	Módulo entre 300/500 GPa, razão de resistência/módulo de $5 - 7 \cdot 10^{-3}$
Módulo intermediário	Módulo até 300 GPa, razão de resistência/módulo acima de $10^{-2}$
Baixo módulo	Módulo menor que 100 GPa, baixo valor de resistência a tração
	<b>Referente a Resistência a Tração</b>
Ultra-alta resistência	Maior que 5 GPa e razão de resistência/rigidez entre $2 - 3 \cdot 10^{-2}$
Alta resistência	Maior que 2,5 GPa e razão de resistência/rigidez entre $1,5 - 2 \cdot 10^{-2}$
	<b>Referente a Temperatura de Tratamento Térmico Final</b>
Tipo I	Acima de 2000°C (Associada com FC de alto módulo elástico)
Tipo II	Aproximadamente 1500°C (Associada com FC de alta resistência)
Tipo III	Menor que 1000°C (Fibras de baixo módulo e baixa resistência)

**Fonte: LEVY NETO; PARDINI (2006)**

A escolha do tipo de fibra de carbono, sua gramatura, seu ângulo de tecimento e suas propriedades, serão definidas de modo a buscar modelos comerciais e já usuais, para que o modelo simplificado possa ser aprimorado com o avanço da ideia, e se dará a partir do cálculo de esforços que uma bandeja de suspensão traseira para um protótipo BAJA SAE é submetida.

### 2.14 Método de elementos finitos

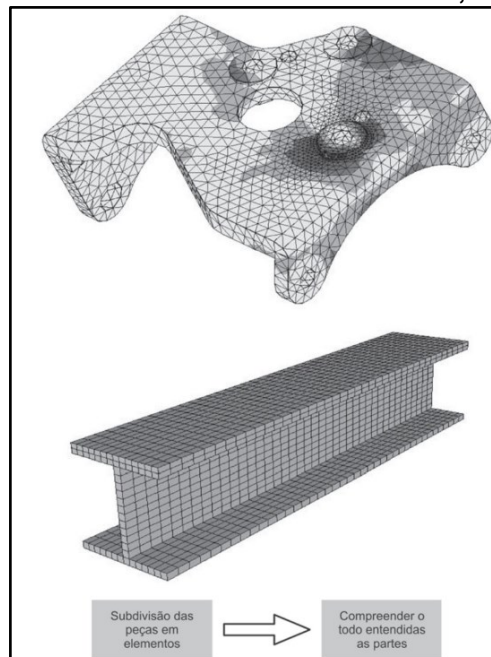
A análise por elementos finitos (MEF) é muito utilizada para análises de engenharia, com objetivo de resolução de problemas práticos e análises de pré-fabricação de componentes, garantindo assim seu pleno funcionamento, graças a seu método computacional avançado. Seus procedimentos podem avaliar desde sólidos

e estruturas, até as transferências de calor e fluídos. Sua concepção foi na era tecnológica e com foco em resoluções de equações algébricas, correlacionados com problemas de engenharia (BATHE, 2014).

O método de elementos finitos busca dividir o domínio dos problemas em sub-regiões com geometrias menores e mais simples. Cada subdivisão é ligada entre si por pontos nodais ou nós e quando juntos, os pontos nodais aos conjuntos de elementos finitos, temos então a malha. A malha é variável às diversas aplicações e principalmente à sua geometria. A precisão também é variável ao tamanho da malha. Quanto maior a quantidade de nós e conjuntos de elementos finitos, maior a malha e maior a precisão. Podemos ver exemplos de duas malhas distintas conforme Figura 9 (MAGALHÃES, 2003).

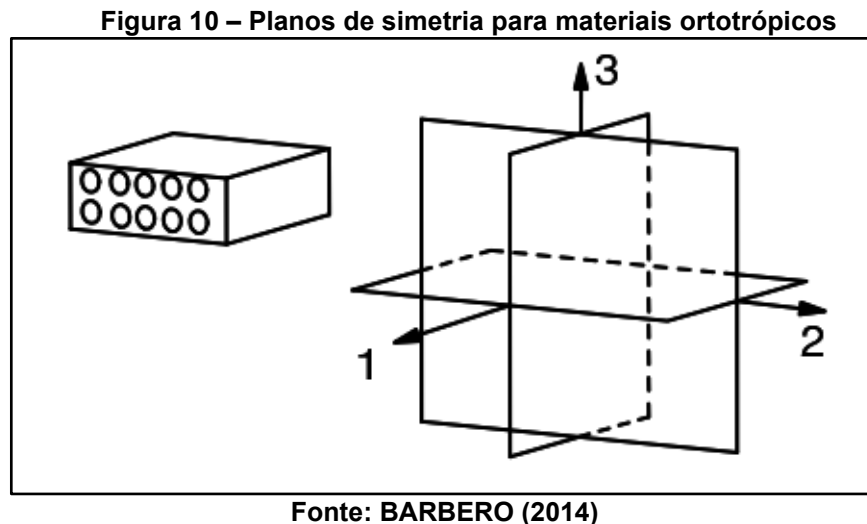
O método de elementos finitos possui contribuições matemáticas, físicas e de engenharia. Para todo problema apresentado, é escolhido um modelo matemático para um problema físico, e assim é resolvido. É importante ressaltar que o método resolve modelos matemáticos altamente complexos, mas apenas dará informações contidas nesse modelo escolhido. Para problemas de engenharia, sua utilidade é colaborativa com a modelagem CAD (BATHE,2014).

**Figura 9 – Diferentes malhas de elementos finitos aplicados a corpos sólidos. Elementos sólidos tetraédricos e elementos sólidos hexaédricos, respectivamente**



**Fonte: ALVES (2002)**

Um material ortotrópico pode ser definido pelos seus três planos de simetria e descrito com nove constantes. Em sua maioria, materiais práticos possuem ortotropia cartesiana e um compósito reforçado com fibra unidirecional pode ser considerado ortotrópico, pois seu plano de simetria é perpendicular à direção da fibra e os outros dois, paralelos a essa direção, como podemos ver na Figura 10 (BARBERO, 2014).



O ângulo das camadas busca otimizar a capacidade de carga em diferentes direções. O empilhamento em diferentes direções ou ângulos pode ser definido baseado na busca por propriedades específicas e pela escolha da geometria da peça, principalmente quanto as condições complexas de carregamento externo (BARBERO, 2014).

### 2.15 Simulação para materiais compósitos

A combinação de diferentes materiais com diferentes propriedades, proporciona configurações que tornam o produto leve e resistente, principalmente quando aplicado em geometrias complexas. A grande complexidade na simulação de compósitos está em sua quantidade de variáveis, como: quantidade de camadas, diferença de propriedade de materiais, espessura de cada camada, direção de alinhamento das fibras, entre outros. Para esta atividade, foi utilizado o *software ACP (Ansys Composite PrepPost)* da *Ansys*, que busca ofertar simulações complexas de análises, mesmo que em materiais com diferentes camadas (ANSYS, 2013).

O *ACP* é uma ferramenta de pré e pós-processamento. Durante o pré-processamento, os dados de entrada interferem no modelo da peça (Casca ou Sólido),

na quantidade de camadas, nas direções de laminação, na resistência de cada material que compõe o compósito, e todos os efeitos a serem considerados e estudados para uma laminação. Enquanto isso, no pós-processamento, permite uma análise completa com o uso das ferramentas do *Software Ansys*, como análises de falhas, segurança, resistência, deformação, entre outros. (ANSYS, 2013)

## **2.16 Elementos de malha**

Atualmente, o *software Ansys workbench* possui a funcionalidade de malhas automáticas, utilizando a geometria do componente como referência. Para geometrias complexas e com muitas curvas em ângulo, a malha tetraédrica pode ser utilizada, aumenta a quantidade de elementos quadráticos e mantém o tamanho da malha. Já para simulações de geometrias simplificadas e com poucas curvas e ranhuras, usa-se a malha hexagonal (MECHEAD, 2022).

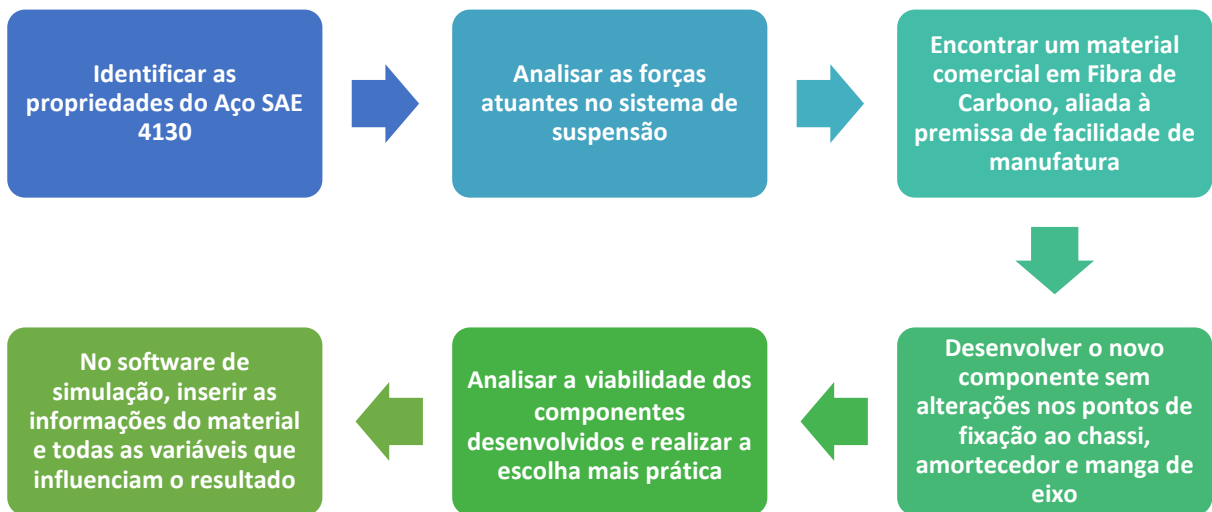
Outro fator determinante para as simulações, refere-se aos tamanhos de malha. Para linear ou de primeira ordem, possuem nós e ligações entre os nós. Sua simulação avalia apenas linearmente. Para as malhas de segunda ordem ou quadráticas, incluem nós entre as linhas de ligação de nós, enquanto sua análise quadrática fica mais precisa e reduz-se o tamanho de elementos, o que ocasiona no aumento do tamanho da malha e no tempo de processamento (MECHEAD, 2021).



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentadas as metodologias seguidas pelo trabalho para que os Objetivos Gerais e Específicos fossem alcançados. Para a realização das análises, conforme Figura 11, demonstra-se através do fluxograma apresentado, as etapas necessárias a serem seguidas até a apresentação dos resultados finais.

Figura 11 – Fluxograma das etapas



Fonte: Autoria própria (2022)

Inicialmente, a primeira etapa foi de execução da análise do material já utilizado pela equipe e suas propriedades de composição. Com os dados de composição e resistência do aço SAE 4130, juntamente com a equipe Pato BAJA, foi realizado o estudo para avaliação de todos os esforços atuantes e quais são os obstáculos durante as provas da competição, que proporcionam os piores casos de *stress* ao componente. O principal objetivo do primeiro passo, é assegurar que a resistência mecânica do material proposto de fibra de carbono seja semelhante ou superior às propriedades especificadas do aço. Conforme a Tabela 3, temos os dados de resistência para o aço SAE 4130:

Tabela 3 – Propriedades do Aço SAE 4130

Material	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Aço SAE 4130	560	190

Fonte: MATERIAIS GELSON LUZ (2012)

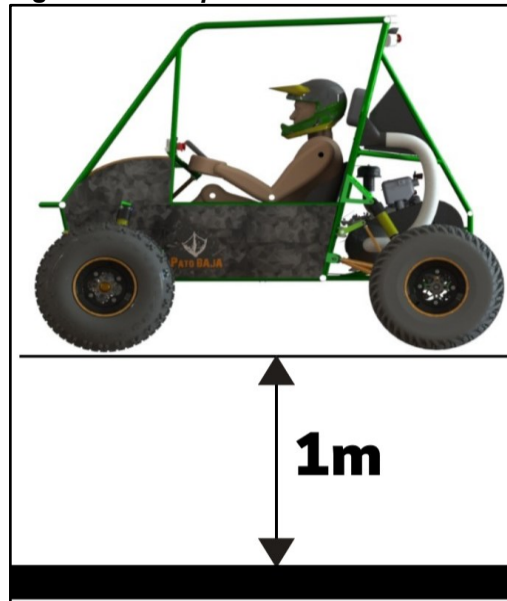
### 3.1 Análise de esforços atuantes na suspensão traseira de um protótipo BAJA

Foram realizados os estudos, análises e a compreensão dos esforços aplicados ao sistema de suspensão, e quais variáveis são importantes para seu dimensionamento. A metodologia a ser utilizada pelo trabalho, seguiu um paralelo à utilizada pela Equipe Pato BAJA, de modo que os resultados sejam semelhantes, mesmo que para materiais diferentes.

Para a análise de forças atuantes, consideramos a análise anteriormente realizada e validada por métodos de simulação MEF pela Equipe Pato BAJA. O objetivo é averiguar o pior obstáculo em que o protótipo é submetido para garantir que seu sistema seja dimensionado adequadamente. Dessa forma, usa-se a análise de *Bump Force*, conhecida como *Drop Test*, e com isso, temos duas possibilidades, conforme a seguir:

A primeira possibilidade considera que o veículo foi solto a um metro de altura e atingiu o solo exatamente com as quatro rodas, conforme Figura 12, e toda sua energia potencial, transforma-se em cinética.

Figura 12 – Drop test um metro de altura



Fonte: Autoria própria (2022)

Logo, temos que:

$$E_{pg} = E_c \quad (6)$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7)$$

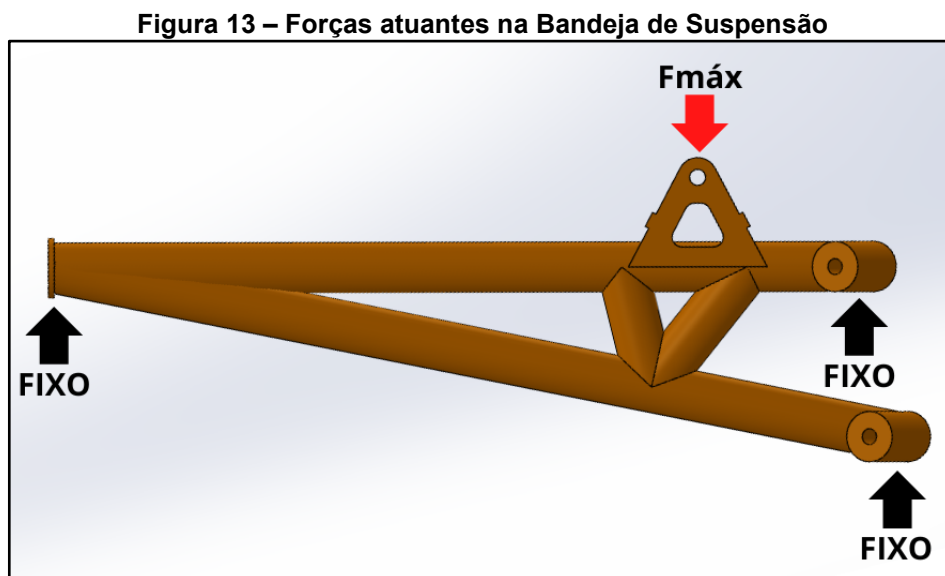
$$v = g * t \quad (8)$$

E, considerando que a quantidade de movimento pode ser deduzida com uma função de força em função do tempo ( $F(t)$ )

$$F = m * v \quad (9)$$

$$F(t) = m * dv * dt \quad (10)$$

Por essas equações, é possível fazer uma breve análise de movimento e transmissão de forças, considerando um conjunto não amortecido, ou seja, um sistema rígido ao qual os amortecedores são substituídos por perfis inflexíveis e que toda a força seja transmitida para a bandeja (braço) de suspensão, conforme Figura 13. Esse método considera fórmulas de física 1 e equações do movimento, que com isso, pode-se obter a tensão máxima aplicada na peça a ser estudada.



Fonte: Autoria própria (2022)

Por sua vez, na segunda hipótese e também mais condizente com a situação real, pode-se analisar a força exata aplicada no sistema de braços de suspensão e

dinâmica vertical pela força exercida pelo conjunto do amortecedor, que é uma resultante do choque e do momento de flexão no braço, pela força exercida no conjunto mola-amortecedor (SINGH; GABEL, 2020).

Com os dados de entrada contendo informações de projeto e do amortecedor a ser utilizado, temos que a força no amortecedor será a sua rigidez pelo seu comprimento máximo:

$$F_a[N] = k_a \left[ \frac{N}{mm} \right] * X_a[mm] \quad (11)$$

A força exercida pelo amortecedor, é então dependente de seu ângulo de montagem no veículo, logo:

$$F_b[N] = F_a[N] * \text{sen } \theta[^\circ] \quad (12)$$

Obtemos então a força real aplicada do amortecedor em uma situação de compressão máxima, com seu ponto de fixação no chassi, temos a distância perpendicular ou  $L_a$  e encontramos então o torque no braço de suspensão  $\tau_a$ :

$$\tau_a[Nm] = F_b[N] * L_a[m] \quad (13)$$

Com o torque, analisamos a distância do braço de suspensão desde sua fixação até sua ligação com a manga de eixo, e obtemos  $L_b$ :

$$F_{BF}[N] = \tau_a[Nm] * L_b[m] \quad (14)$$

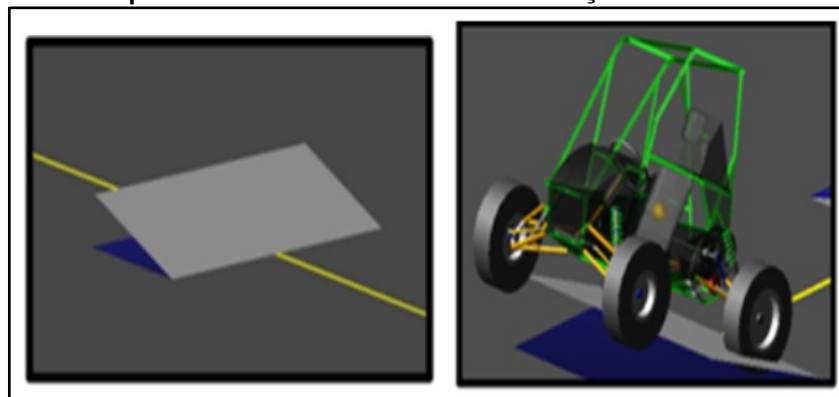
Logo,  $F_{BF}$  é o *Bump Force* por uma análise de esforço máximo de compressão da suspensão (SINGH; GABEL, 2020).

Assim, o meio encontrado pela equipe Pato BAJA para obter as forças verticais atuantes no conjunto de suspensão, seguem os mesmos modelos utilizados pela maioria das equipes do Brasil e do exterior.

Utilizando o *software Adams Car* (licença estudantil), no qual é possível inserir dados de modelagem 3D de um protótipo, e utilizando o segundo modelo proposto, o *software* fornece a análise gráfica do estudo. Os principais dados requeridos pelo *software* e fornecidos pela equipe Pato BAJA, referem-se à massa total do veículo com piloto, localização do centro de massa, curso de deslocamento do amortecedor

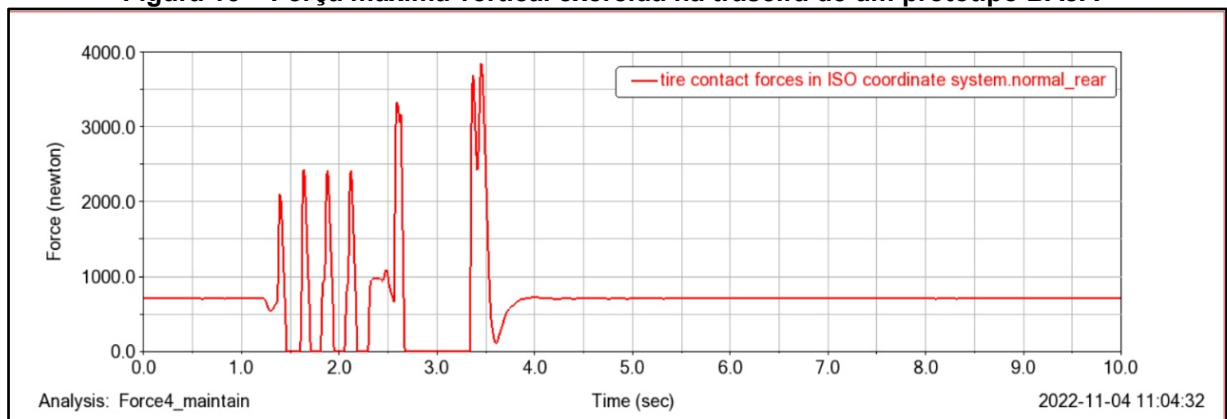
e coeficiente de amortecimento, posição e localização do amortecedor em relação ao centro de massa e a força vertical aplicada no centro do pneu. Para a geração das análises, utilizou-se a simulação ao qual o protótipo estaria a 30km/h e transpôs um obstáculo de rampa com um metro de altura, aterrissando com todas as rodas simultaneamente ao solo, e considerando sua massa total em 172kg + 80kg piloto, conforme Figura 14. O impacto gera uma força vertical devido ao choque do veículo que possui massa total + massa do piloto, adicionando a variável velocidade. Dessa forma, determinou-se a força máxima exercida no braço de suspensão traseira, absorvido parcialmente pelo amortecedor. Conforme a Figura 15, podemos analisar o gráfico do percurso desenvolvido pelo protótipo no *software* e assim, temos que a força máxima vertical traseira é de 3900N.

**Figura 14 – Rampa com um metro de altura e simulação no software *Adams Car***



Fonte: Equipe Pato BAJA (2022)

**Figura 15 – Força máxima vertical exercida na traseira de um protótipo BAJA**



Fonte: Equipe Pato BAJA (2022)

### 3.2 Fibra de carbono

Na escolha do material de fibra de carbono, optou-se pela viabilidade tanto econômica, quanto na facilidade de refino do processo para a manufatura com resistência equivalente ou superior a do aço SAE 4130.

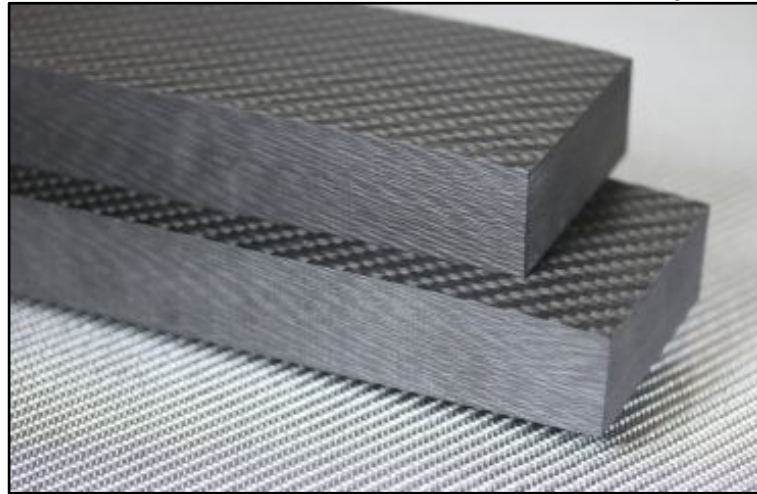
Foram levantadas as possibilidades quanto ao desenvolvimento manual da peça pela equipe Pato BAJA, adotando-se o método de construção da peça bruta manufaturada à mão com o uso de molde e desenvolvida por processo de laminação à vácuo.

As maiores dificuldades encontradas referem-se ao desenvolvimento do molde que será confeccionado manualmente bem como, do acompanhamento contínuo durante o processo de cura da resina evitando bolhas. Inicialmente, considera-se baixa a probabilidade de acerto na primeira tentativa de produção da peça, devido a pouca expertise na utilização deste material, que demanda de difícil aferição quanto às resistências provocadas pelas falhas por bolhas ou camadas de ar.

Pensando na viabilidade, facilidade, tornando as metas plausíveis, optou-se pela procura de materiais comerciais de fibra de carbono em placas prontas com a espessura da peça final projetada. Com isso, dispomos de matéria-prima com maior garantia do processo de fabricação, da eficiência do material, da disponibilidade de dados certificados de resistência e que estariam condizentes com o processo fabril adequado. Os fabricantes de placas de fibra de carbono, também fornecem as informações para simulação e comparação dos materiais, como as densidades em  $\text{g/cm}^3$  e principalmente, módulos de tensão e cisalhamento.

Com isso, o desenvolvimento da peça resume-se na readequação do modelo proposto inicialmente pela equipe Pato BAJA, e que foi desenvolvida em aço SAE 4130, para a utilização de uma placa pronta de fibra de carbono conforme Figura 13, que a partir de uma geometria específica, poderia ser usinada por um processo de fresamento CNC (Controle Numérico Computadorizado), para obtenção de sua geometria final.

**Figura 16 – Placa de fibra de carbono T700G – Rockwest Composites**



Fonte: ROCKWEST COMPOSITES (2022)

Conforme Tabela 4, obtemos as principais informações de referência do material a ser utilizado, baseado no *website* do fabricante. A procura priorizava materiais que pudessem ser produzidos e encontrados no Brasil, porém, fatores limitantes foram essenciais para a escolha da placa de fibra de carbono T700G.

**Tabela 4 – Propriedades da Placa de Fibra de Carbono T700G**

Material	Espessura (mm)	Dimensão da Placa (mm x mm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Fibra de Carbono Standard	15,75	609.6 x 609.6	2450	140

Fonte: ROCKWEST COMPOSITES (2012)

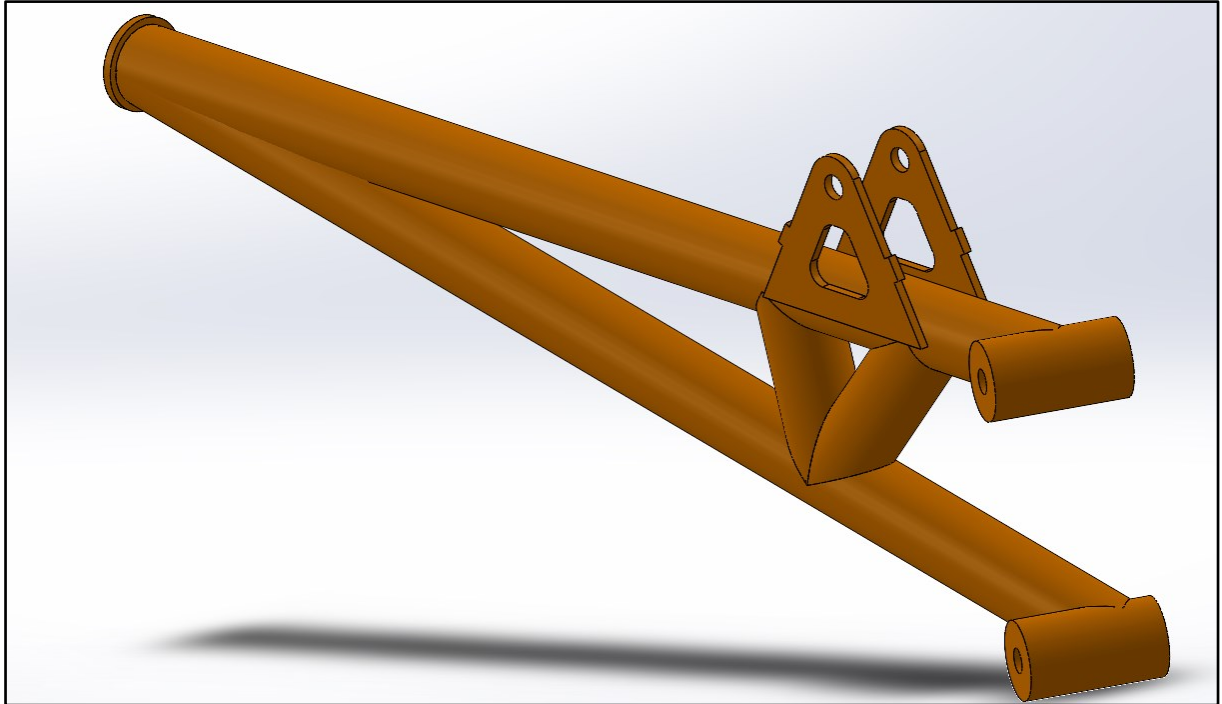
### 3.3 Softwares para desenho 3D e simulação

Com o processo de escolha da fibra de carbono definida, e após a montagem de uma tabela de organização de suas propriedades específicas, baseada no componente que a Equipe Pato BAJA utiliza, foi realizada a modelagem 3D das peças do sistema traseiro de suspensão do tipo *three-link* no *software Solidworks* (versão estudantil 2020). A geometria foi alterada objetivando as melhores propriedades para a fibra de carbono, mas sem alterar as principais dimensões e distâncias de fixação em relação ao chassi e a manga de eixo.

O estudo possibilita uma maior coerência na análise do projeto, tendo em vista que no modelo prático, essas peças serão intercambiáveis. Para o modelo teórico, foco deste trabalho, possibilita a avaliação das condições de contorno de cada material, descartando a necessidade de realização dos testes práticos. Desta forma, utilizamos a experiência de um modelo de peça validado, e aplicamos o novo material para avaliação do atendimento das condições necessárias para o êxito do projeto. Se o resultado não for satisfatório, deverá ser avaliado quais as alterações serão necessárias para obtenção do sucesso.

Seguindo então o modelo de *Three-link* proposto pela equipe Pato BAJA, temos as respectivas Figuras 17,18 e 19 que apresentam sua geometria e fixação.

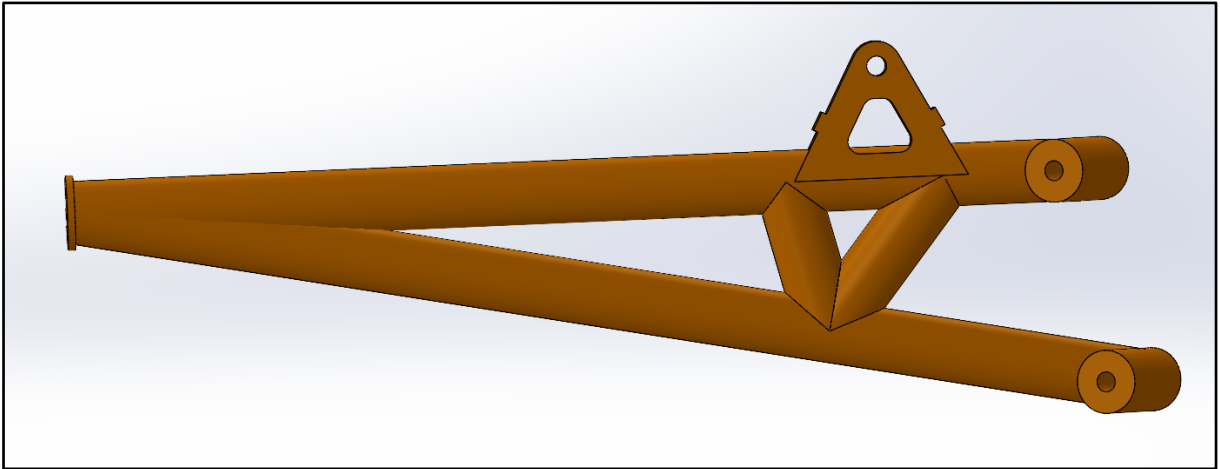
**Figura 17 – Bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em tubos de aço SAE 4130**



Fonte: Acervo Equipe Pato BAJA (2022)

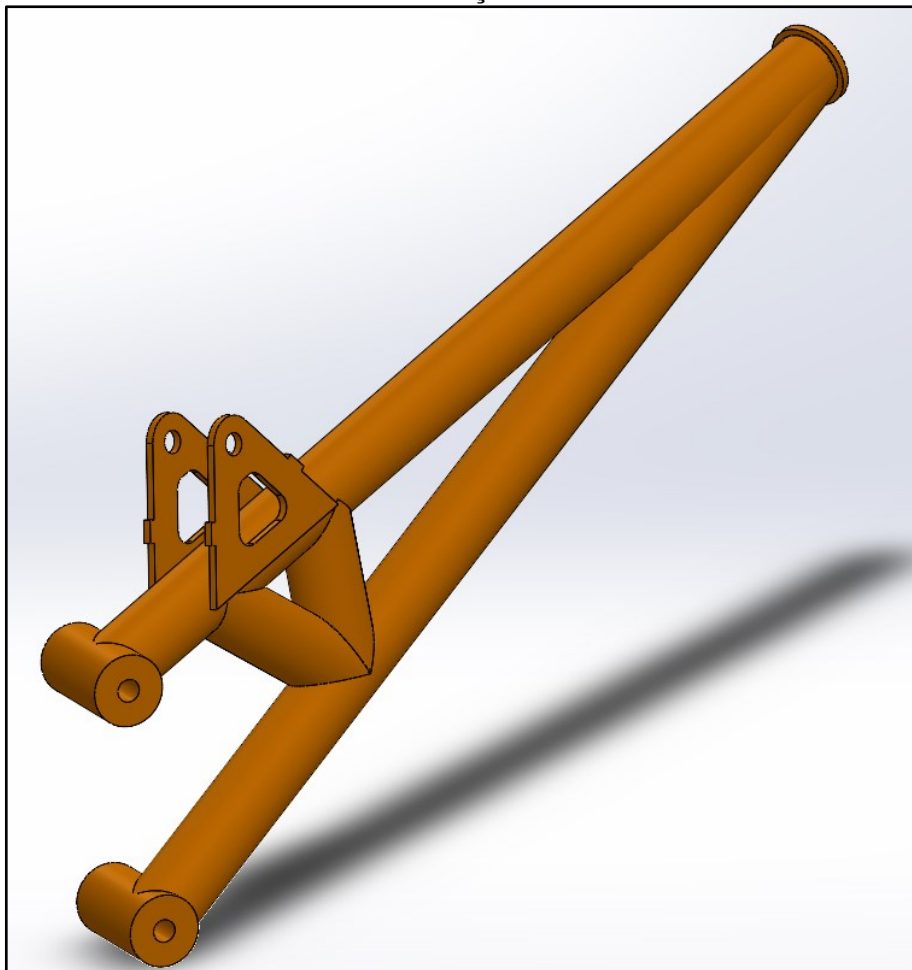


**Figura 18 – Vista lateral da bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em tubos de aço SAE 4130**



Fonte: Acervo Equipe Pato BAJA (2022)

**Figura 19 – Vista da relação externa da bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em tubos de aço SAE 4130**

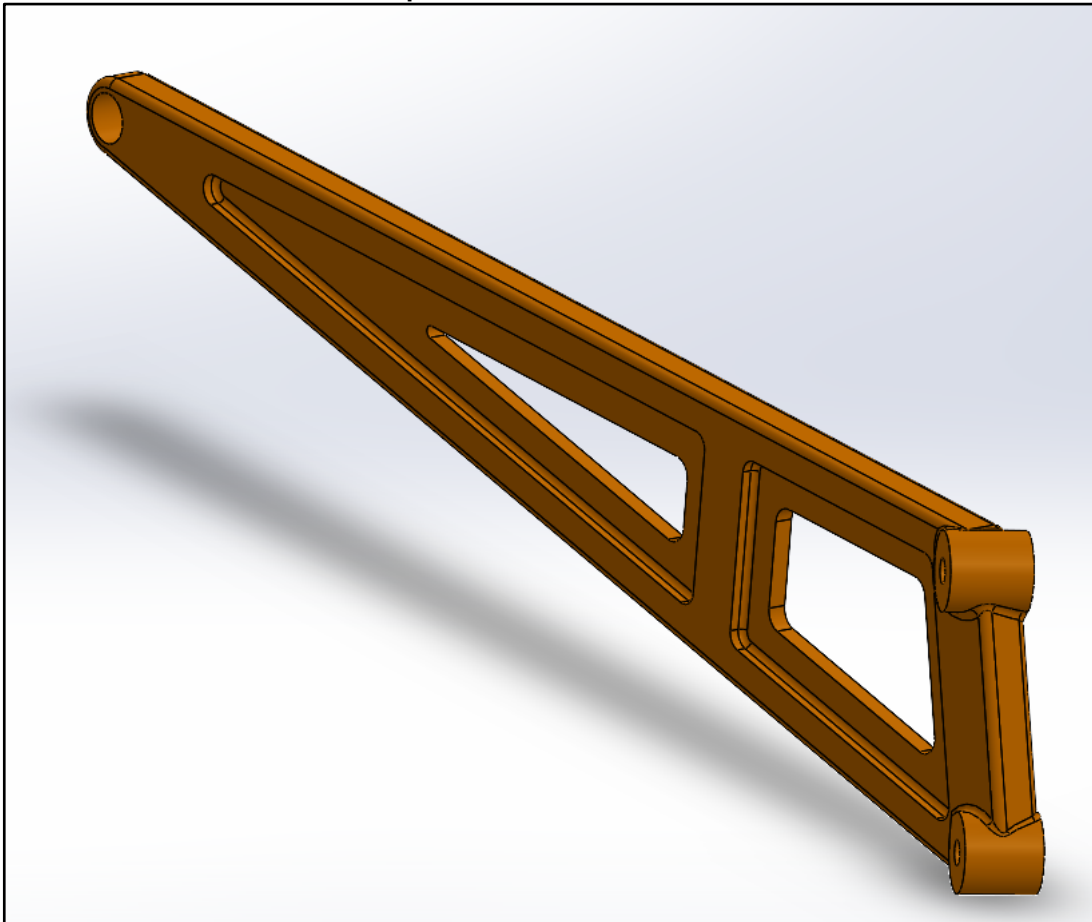


Fonte: Acervo Equipe Pato BAJA (2022)

Em observância aos pontos de fixação, foram propostos três modelos de projeto para definição do modelo ideal de utilização nas simulações do trabalho.

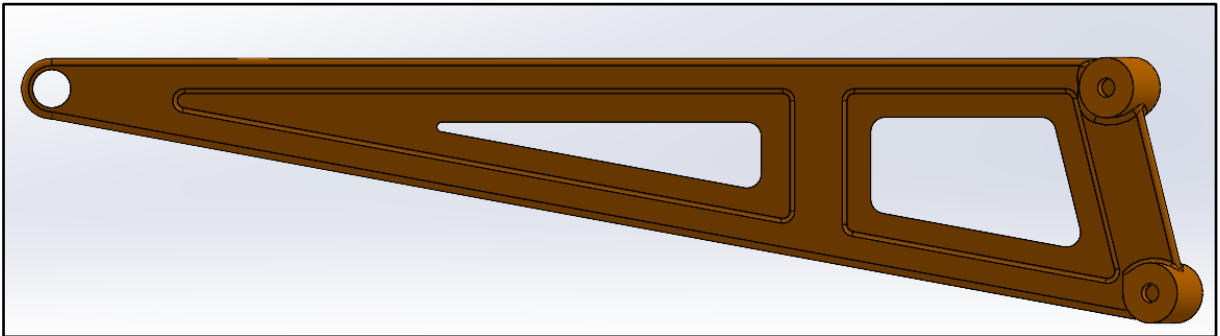
O primeiro modelo assemelha-se ao modelo atual em Aço SAE 4130 proposto e utilizado pela equipe Pato BAJA, através de uma geometria complexa e de difícil manufatura, conforme Figuras 20 e 21. Seu desenvolvimento foi idealizado para uma manufatura manual, e, a principal dificuldade seria na laminação. Como o trabalho busca a utilização da placa de fibra de carbono, ocorreria que a espessura seria maior e haveria muito desperdício desse material, tendo em vista que as buchas ultrapassam o plano das faces laterais do componente.

**Figura 20 – Primeira proposta de modelo e geometria para bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em fibra de carbono**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

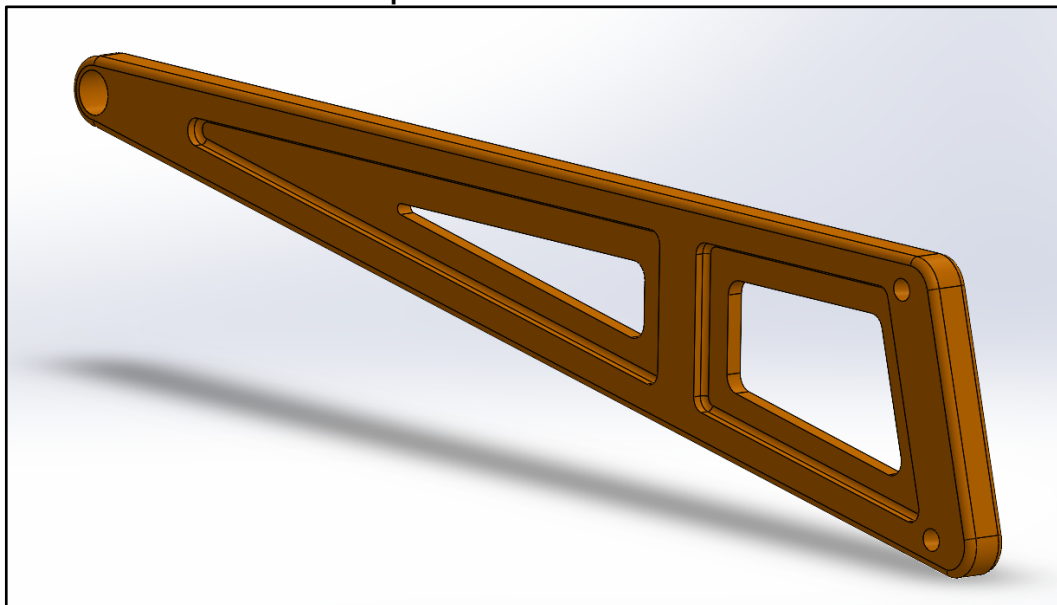
**Figura 21 – Vista lateral da primeira proposta de modelo e geometria para bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em fibra de carbono**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

O segundo modelo proposto tem como objetivo solucionar as deficiências do primeiro problema. Através de um sistema de olhal rotular na dianteira, que será o ponto de fixação ao chassi do protótipo; e na parte posterior da bandeja, devido a complicada operação de acoplamento levando-se em conta os ângulos que devem ser utilizados do suporte da manga de eixo à bandeja por buchas, objetivamos solucionar essas dificuldades com a simplificação da geometria, conforme Figura 22. Dessa forma, a bandeja de fibra de carbono teve suas furações para a manga projetadas para furação angulada em CNC.

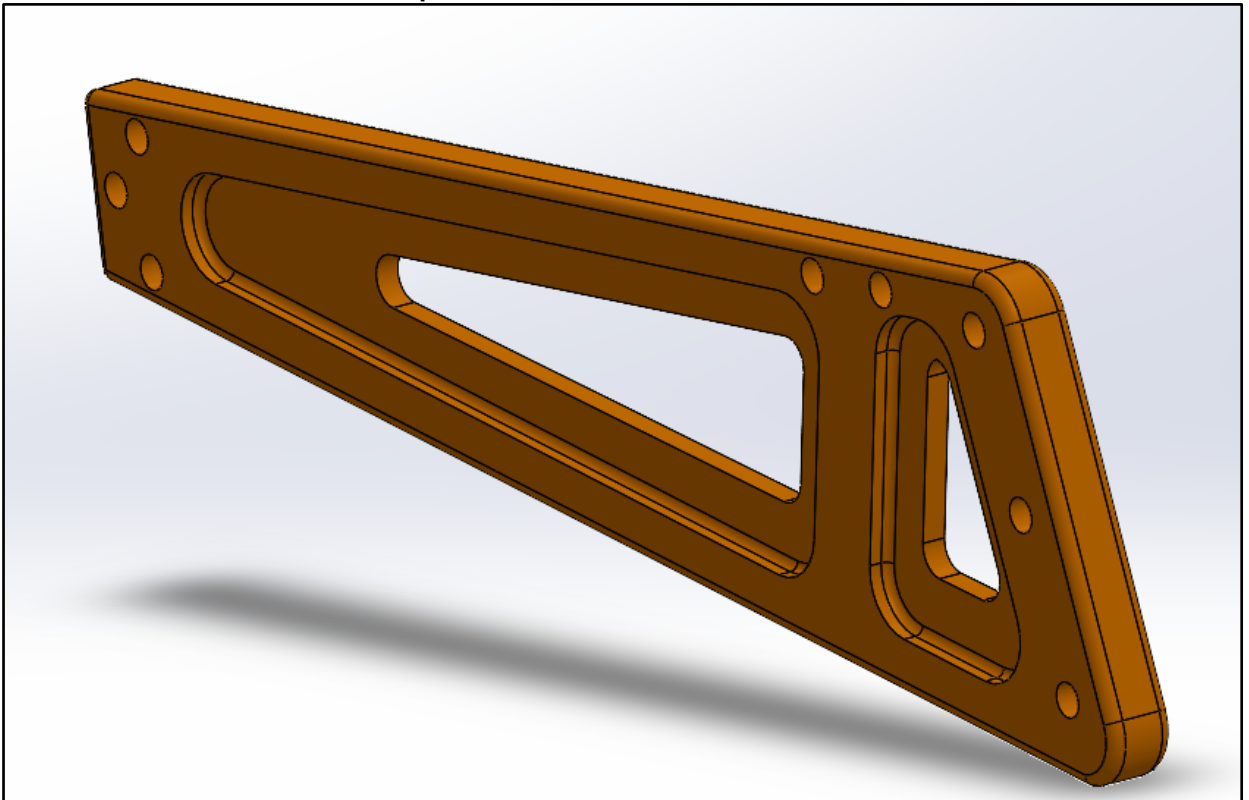
**Figura 22 – Segunda proposta de modelo e geometria para bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em fibra de carbono**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

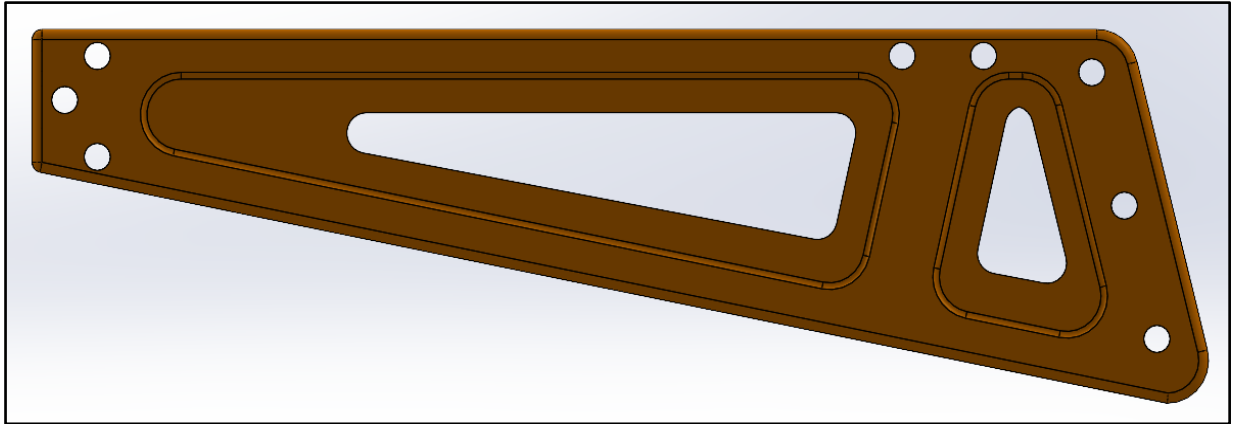
Por fim, o terceiro modelo foi escolhido principalmente pela sua facilidade de manufatura e desenvolvimento. Para os problemas apresentados de conexão ao olhal rotular dianteiro, a solução proposta foi de encurtar a bandeja e desenvolver um suporte para o terminal rotular *uniball* (peça muito eficiente, de grande valor agregado, e que a equipe já utiliza). Esse suporte foi concebido em aço SAE 1020 e possuirá uma bucha para parafusar o *uniball*. A união das chapas de suporte das buchas à bandeja principal de fibra de carbono, se dará por parafusos de alta classe e resistência mecânica. Seu corpo será em chapa de fibra de carbono com espessura de 15,45mm, e o processo de acabamento, furação e alívio de massa será realizado por um processo de fresamento por CNC. O material principal da bandeja e que torna a peça mais pesada seria substituído por uma peça de fibra de carbono, conforme Figuras 23 e 24, e para as competições, aliado ao seu design e facilidade de montagem e desmontagem, é uma peça de fácil intercambialidade em casos de fadiga ou quebra precoce, substituindo apenas os suportes em aço, conforme Figuras 25, 26 e 27.

**Figura 23 – Proposta final de modelo e geometria para bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em fibra de carbono**



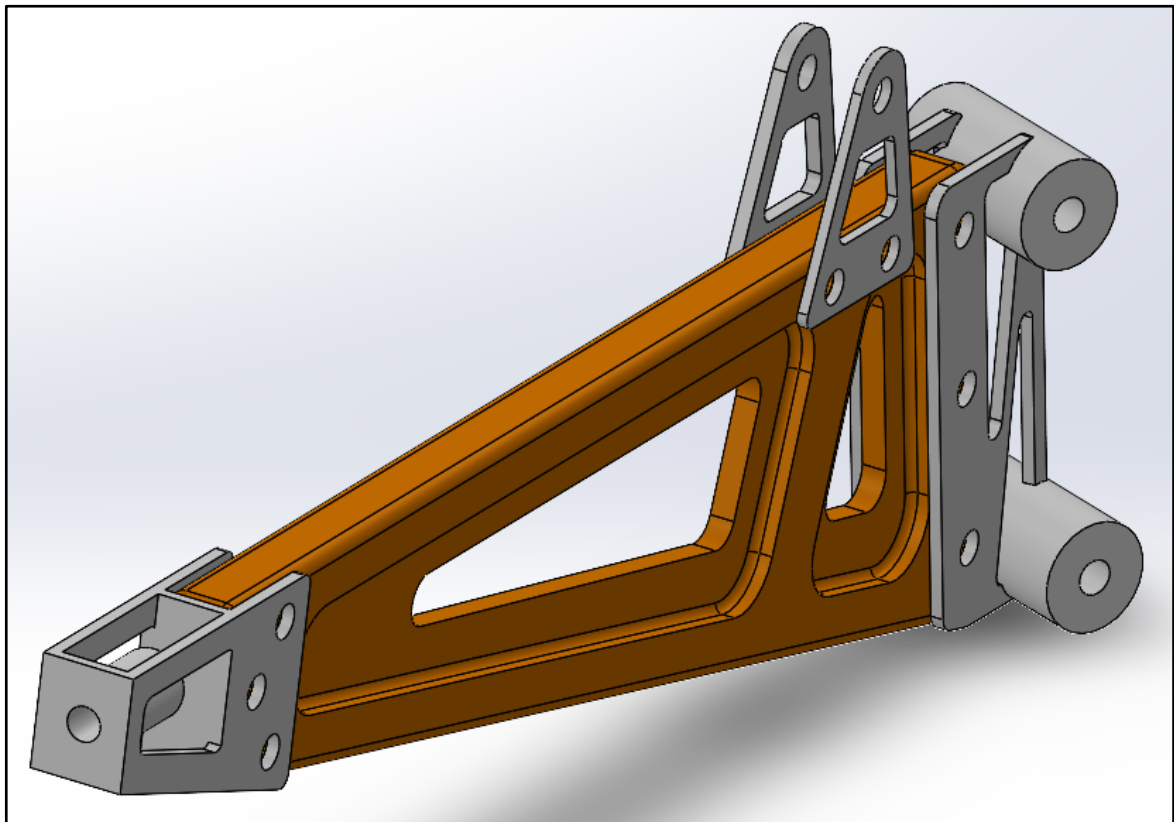
Fonte: Aatoria própria (2022)

Figura 24 – Vista lateral da proposta final de modelo e geometria para bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em fibra de carbono



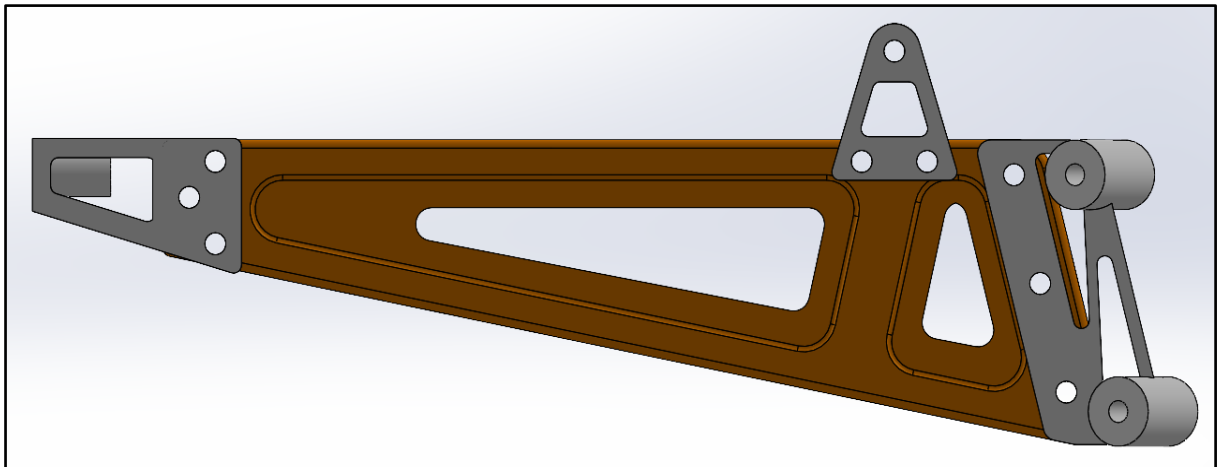
Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 25 – Proposta final de modelo e geometria para bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em fibra de carbono com todos os suportes adicionais



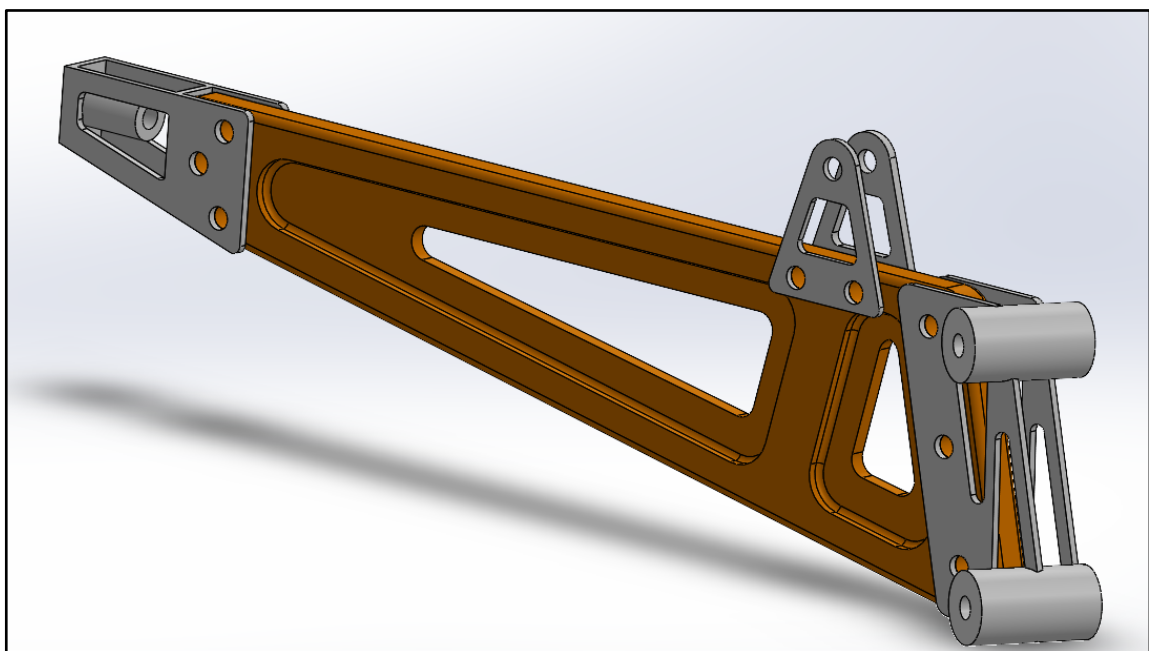
Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 26 – Vista lateral da proposta final de modelo e geometria para bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em fibra de carbono com todos os suportes adicionados**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 27 – Proposta final de modelo e geometria para bandeja de suspensão traseira direita do tipo *Three-link* em fibra de carbono com todos os suportes adicionados sob diferente perspectiva**



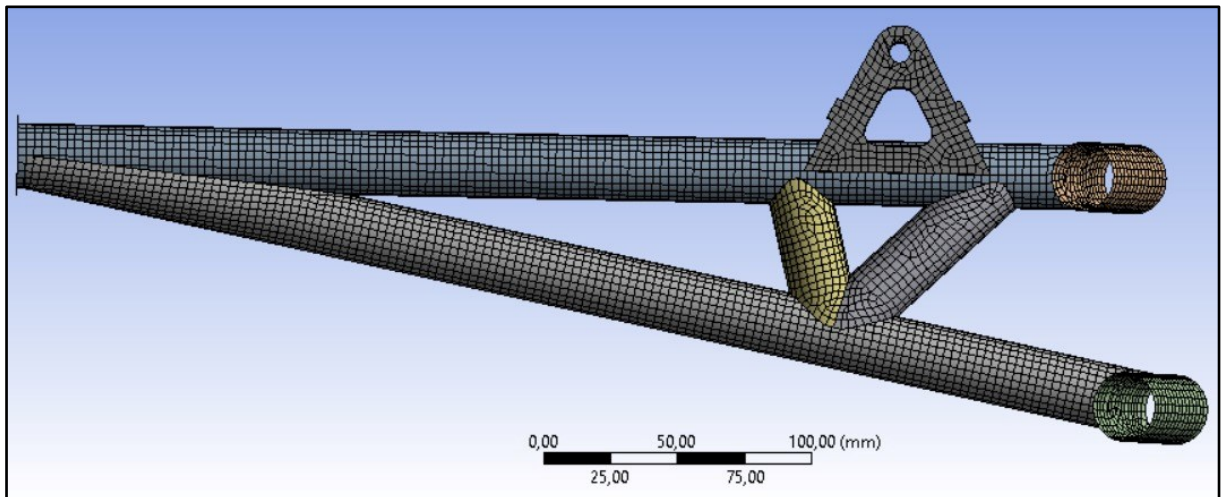
Fonte: Autoria própria (2022)

Com o modelo desenvolvido em *software* de desenho CAD 3D *Solidworks*, as simulações computacionais de resistência mecânica e deformação da peça foram realizadas. A grande diferença entre os materiais são as suas características construtivas de ordenações matriciais. Os materiais metálicos possuem um

ordenamento anisotrópico, e suas propriedades mecânicas são iguais para toda e qualquer direção de aplicação de força. Já os compósitos, e neste caso em específico, a placa de fibra de carbono, é um material ortotrópico, isto é, há a real necessidade de entendimento das forças e da direção da fibra para que seja obtido a maior resistência mecânica para a necessidade.

Foi utilizado o software *Ansys Workbench* para o desenvolvimento das simulações de resistência e deformação da peça. Como uma das métricas a serem atingidas pelo trabalho, tínhamos a necessidade de validação com o modelo que atualmente está em funcionamento na equipe Pato BAJA. Conforme os arquivos da equipe, desenvolvidos durante a fase de projeto do protótipo e conforme a Figura 28, temos a ilustração da malha de simulação no *software* com análise em carga estática para a bandeja de suspensão do tipo *Three-link* em Aço SAE 4130 e Conforme a Figura 29, a qualidade de malha, a qual majoritariamente é quadrangular e apresenta 8940 nós e 8708 elementos.

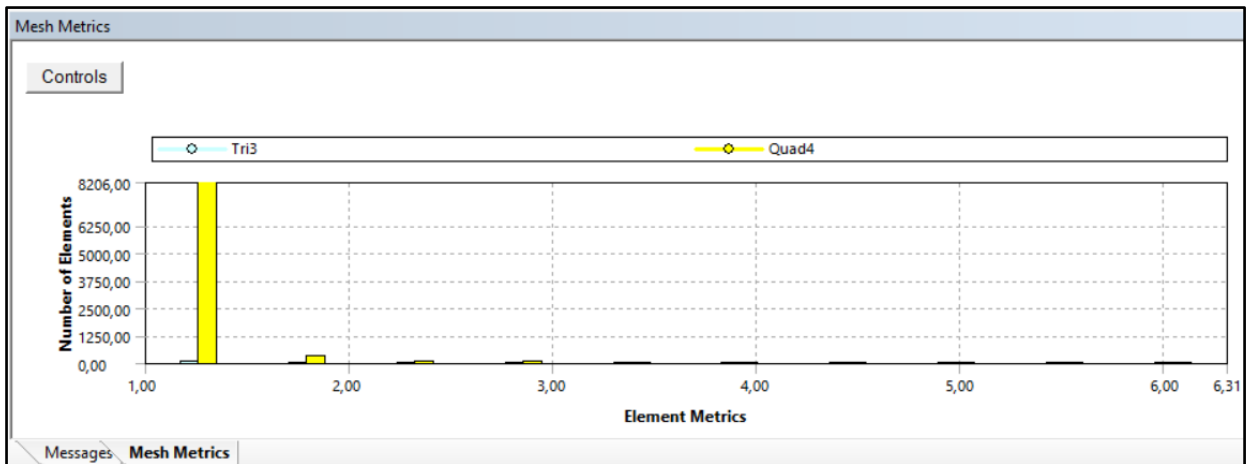
**Figura 28 – Visualização lateral da malha da bandeja de suspensão traseira do tipo *Three-link***



**Fonte: Autoria própria (2022)**



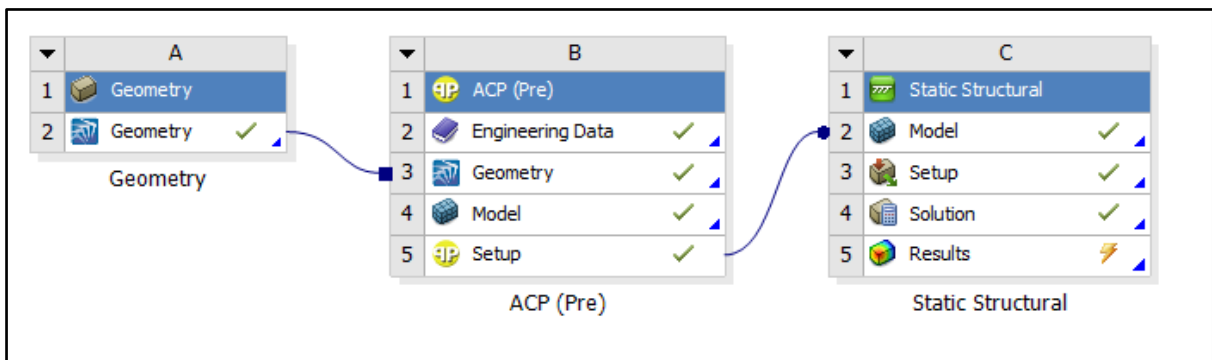
**Figura 29 – Gráfico de qualidade de malha para a bandeja de aço SAE 4130**



Fonte: Autoria própria (2022)

Com o modelo proposto e simulado pela equipe, passa-se para a validação da proposta de modelo final desenvolvida no presente trabalho. Conforme Figura 30, é apresentada a visão final do *Ansys* e suas configurações para execução com sucesso, descritas abaixo.

**Figura 30 – Análise estrutural *Ansys Workbench* e seus passo a passos**

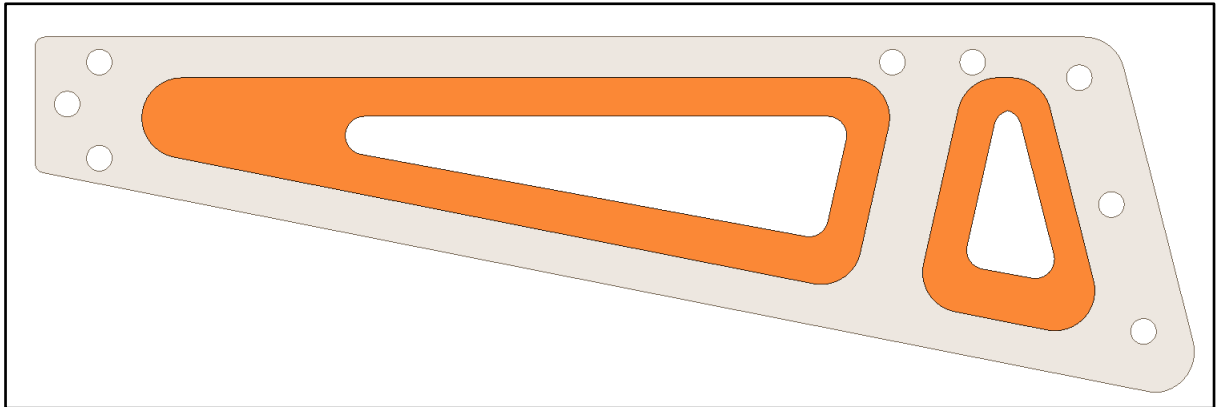


Fonte: Autoria própria (2022)

Inicia-se com a importação e mapeamento da geometria da peça do *software Solidworks* CAD 3D, e como a peça a ser simulada possui completa simetria, foi utilizada o plano central da peça como referência. É fundamental o entendimento do plano central da peça para a realização das próximas etapas. Na ferramenta *SpaceClaim*, do *Ansys*, é definido as espessuras de cada plano. A peça foi separada em duas áreas, conforme Figura 31, interna em cor laranja e externa em cinza. A área interna contém espessura equivalente a 6mm e a área externa tem espessura equivalente de 16mm.



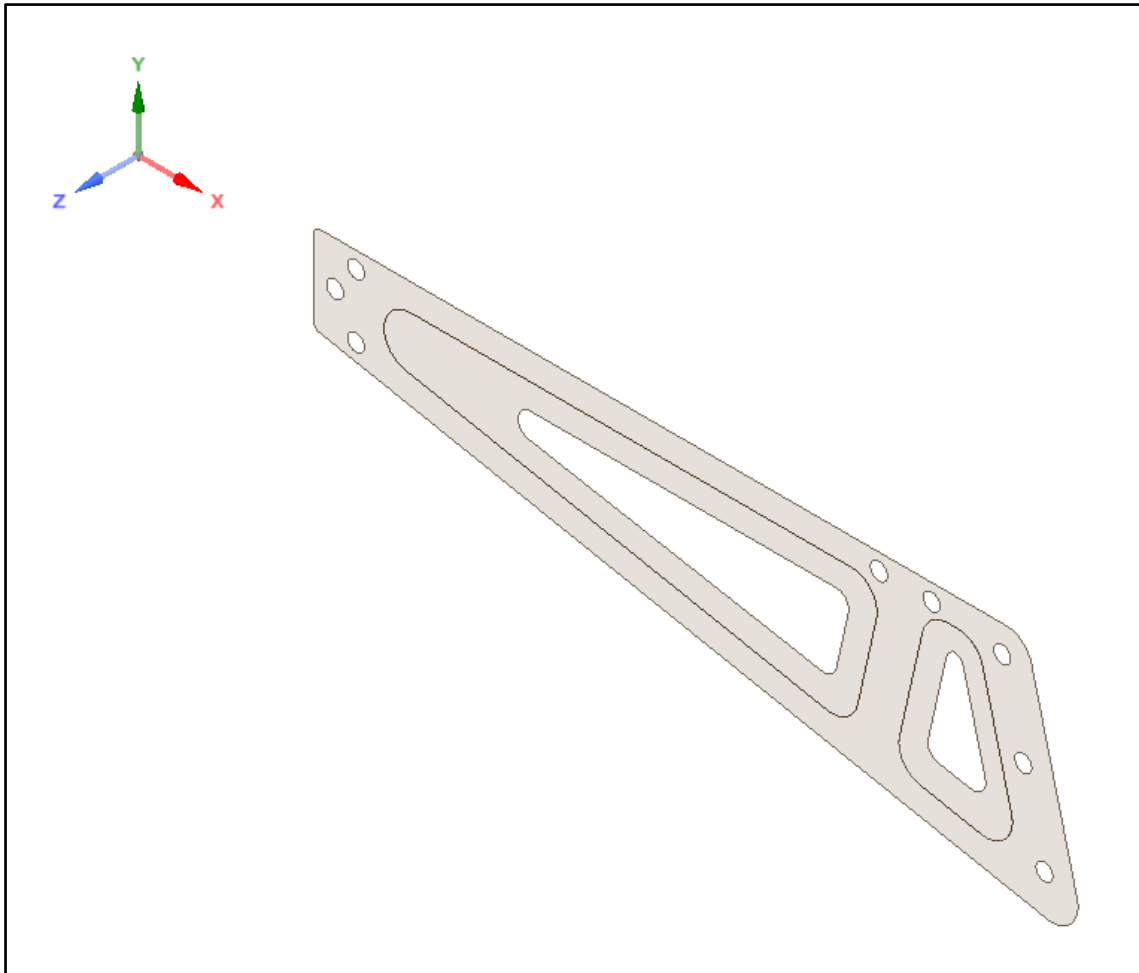
**Figura 31 – Plano central da peça com área interna e externa**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

A primeira etapa dentro do *ACP (Ansys Composite PrepPost)*, é definir o material como ortotrópico, característica proveniente de materiais compósitos. Pode-se utilizar da sua biblioteca interna para selecionar o material, ou pode-se adicionar um novo material com as propriedades de uso. Foi escolhido o material conforme especificado na planilha do fornecedor da placa, como Fibra de Carbono com resina Epóxi, e alimentado a aba do *Engineering Data* com a informação de densidade e resistência do material. Com as informações dos dados do material inseridos no *software*, a etapa seguinte destina-se a configuração da geometria, que é a importação das configurações anteriormente descritas.

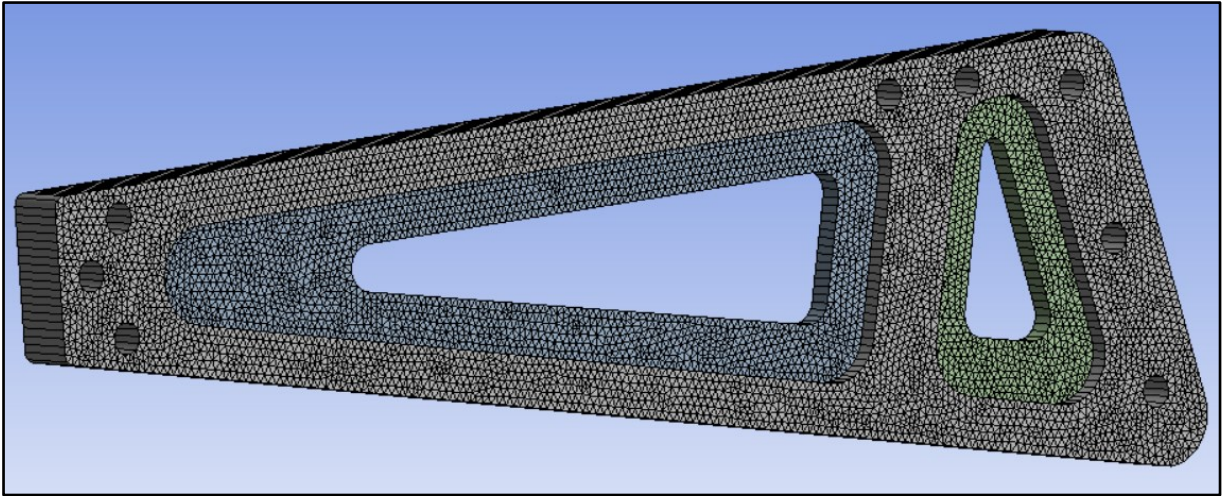
A terceira etapa, foi a realização da importação do plano central proveniente da geometria, conforme Figura 32. Como o plano central foi separado entre interno e externo, foi determinado a relação de contato entre essas duas áreas. A relação de contato utilizada entre as áreas foi colada, e em seguida, é especificado as regiões de contato; posteriormente, foi indicado o material da peça através da biblioteca de materiais do *software*, e definido as coordenadas geométricas.

**Figura 32 – Plano médio com as características externas e internas**

**Fonte: Autoria própria (2022)**

Além disso, seguindo com as configurações de modelo, é feita a criação da malha de simulação utilizando-se a malha para elementos de placa, com a composição tetraédrica parabólica, isto é, como a geometria da peça é irregular, a leitura da geometria de malha é importante para a parametrização dos pontos de análise, conforme Figura 33. Ela é composta por uma maior quantidade de polinômios interpoladores, possui 6 nós e 2 graus de liberdade por nós. Dessa forma, com os 12 graus de liberdade, a simulação torna-se mais complexa, mas seu refino e resultado são mais precisos em relação a uma malha tetraédrica linear que apresenta apenas 6 graus de liberdade e a distribuição da força e entendimento do processo. Foram 725239 nós e 260344 elementos

Figura 33 – Visualização 3D da malha tetraédrica parabólica



Fonte: Autoria própria (2022)

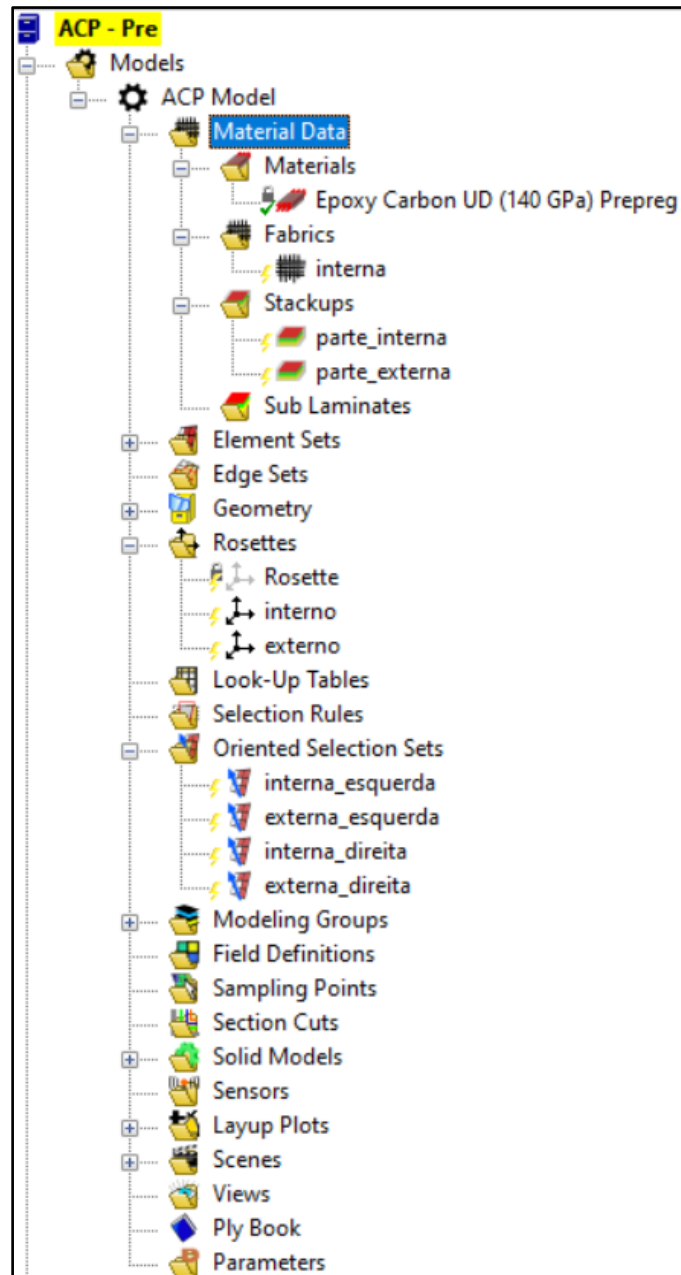
Avançando para o *Setup* no *ACP*, a primeira análise é verificar se o material foi importado conforme definido nas etapas anteriores. A próxima etapa consiste na criação do *Fabrics*, adicionando o material e as informações de espessura de cada lâmina, e conclui-se colocando a direção de alinhamento das lâminas de fibra de carbono. Para o projeto, cada camada apresenta 0,5mm de espessura de laminação, e foram desenvolvidas 32 camadas externas (totalizando 16mm) e 12 camadas internas (totalizando 6mm). Para o entendimento, a placa comercializada é encontrada em medidas imperiais de polegadas, então sua conversão para a métrica é determinada em 15,75mm, o que significa uma medida levemente inferior à utilizada na simulação. Isso se deve pelo resultado da criação das camadas serem padronizadas pelas espessuras construtivas de 0,5mm, 0,75mm ou 1mm, cada.

A terceira etapa no *Setup* do *ACP*, utilizando o recurso de *Stackups*, é destinada à definição da direção de alinhamento de cada plano para a simulação. Foi utilizada as informações técnicas do fornecedor da placa, em que a lâmina possui 0°/90° graus de ordenamento direcional das fibras de carbono. Assim, definimos a espessura de extrusão, considerando o plano central da peça, a área interna terá 3mm para cada direção Z e a área externa terá 8mm para cada direção Z.

Na penúltima etapa do *Setup*, através do recurso *Model* foram definidas as configurações de *Rosettes*. Esta configuração define o sentido de orientação da laminação da fibra de carbono, através da seleção das propriedades, é realizada a referência para cada camada, a relação com as *rosettes*. Em contrapartida, no grupo de modelagens são criadas as *Plies* (folhas), sendo duas internas e duas externas

(totalizando quatro *Plies*), devido ao uso do plano médio para a construção da arquitetura da peça. Por fim, pode-se verificar se a simulação do modelo sólido e as informações carregadas anteriormente estão conforme o esperado. O *software ACP* gera os modelos de área interna e externa em 3D, e como um *checklist* final, pode ser realizada as conferências dos ângulos de fibra, direções de alinhamento e espessura das camadas. Conforme a Figura 34, podemos verificar todas as abas de configurações do *Setup* do *ACP*.

Figura 34 – Configurações do ACP



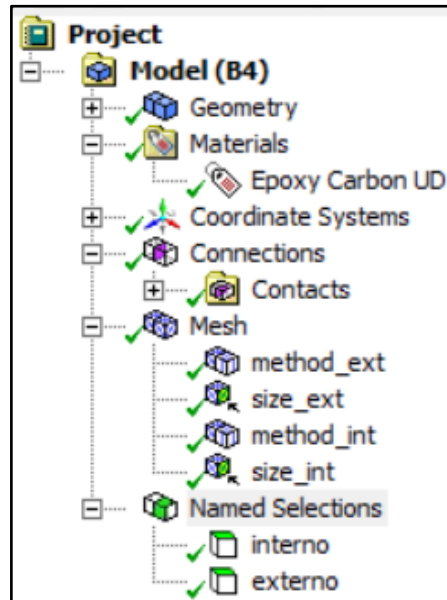
Fonte: Autoria própria (2022)

Após a finalização de todas as informações e configurações no *software ACP*, definiu-se na próxima etapa, qual o tipo de análise será utilizada. De acordo com a opção adotada pela equipe Pato BAJA para a bandeja de suspensão traseira do tipo *Three-link* em aço SAE 4130, utilizamos a mesma topologia de simulação estática estrutural.

Utilizando o recurso da aba estática estrutural, é realizada a importação da geometria, material, coordenadas, malha, camadas da fibra e a seleção de áreas por

nome. Com essas informações, podemos definir os carregamentos e os pontos fixos, conforme Figura 35.

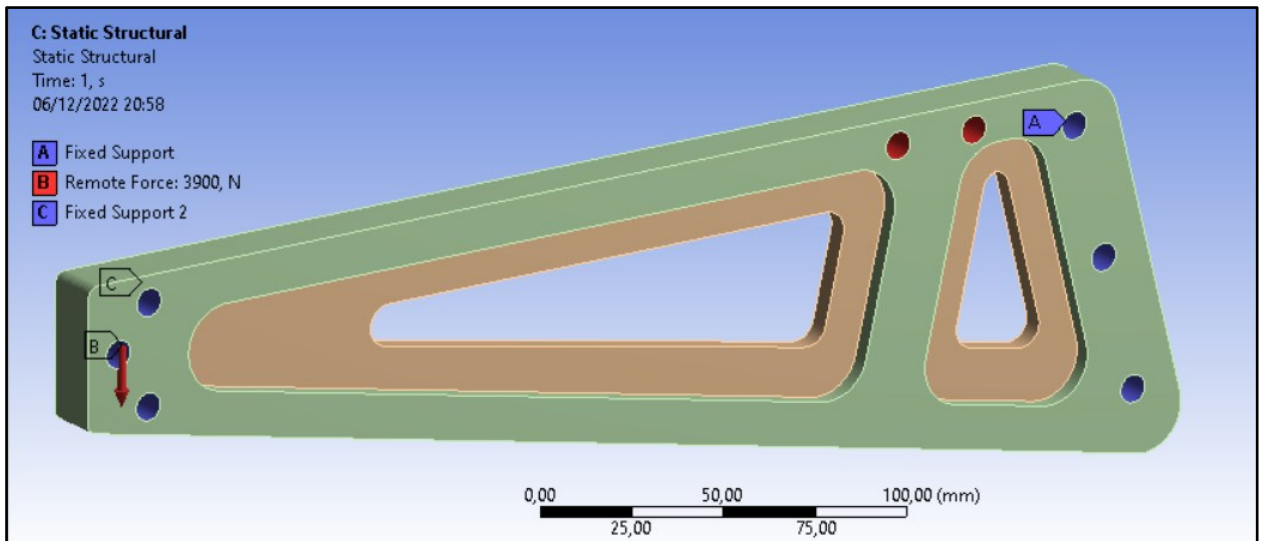
Figura 35 – Configurações dentro do *Static Structural* do *Ansys Workbench*



Fonte: Autoria própria (2022)

Como a análise é estrutural no material em fibra de carbono, foram utilizados os três furos em cada uma das extremidades como os pontos de fixação aos suportes de *uniball* e suporte de buchas, conforme Figura 36 (anteriormente citados no trabalho). Com os dados da equipe Pato BAJA relacionados a solução do *software Adams Car*, que utiliza a massa total do veículo, coordenadas de apoio da suspensão do protótipo, pontos de centro de gravidade, altura de obstáculo e tipo de obstáculo, define-se a força resultante no sistema de amortecedor, conhecida como *bump force* ou força vertical. Essa força de impacto máximo, em Newton [N], é configurada no *software Ansys* como uma força vertical no eixo Y em 3900N, na área de apoio do suporte de amortecedor, ou seja, nos dois furos superiores quando em vista frontal da peça.

Figura 36 – Pontos de fixação em azul e força vertical aplicada em vermelho



Fonte: Autoria própria (2022)

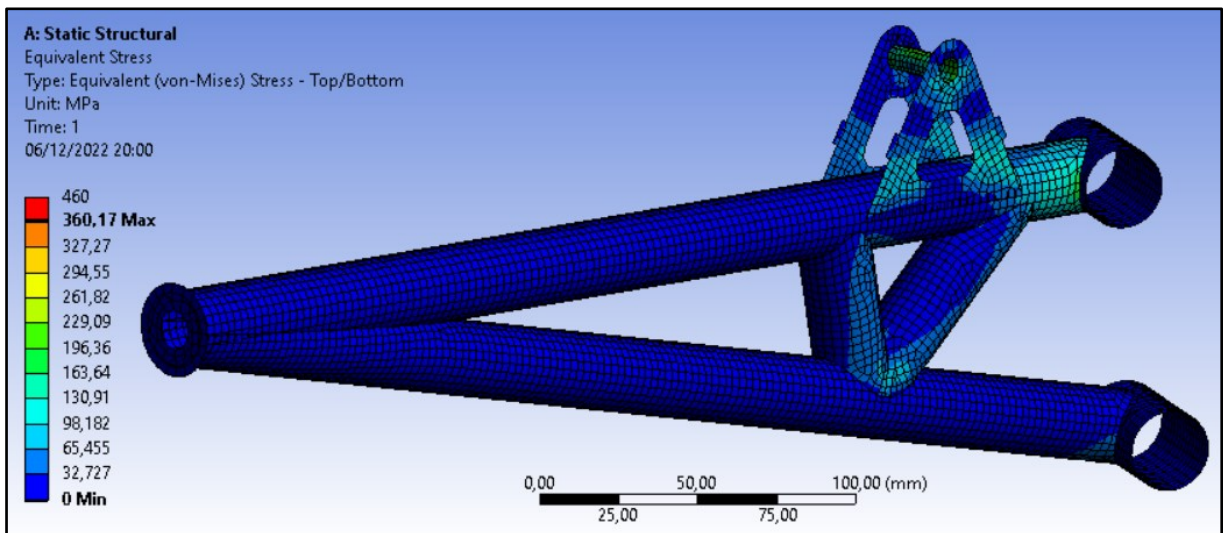
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Simulações

Para a substituição do aço SAE 4130 do sistema traseiro de suspensão, a premissa foi encontrar um compósito de fibra de carbono com matriz polimérica que possuía resistência equivalente ou superior ao aço, atualmente utilizado.

A modelagem CAD 3D permitiu o desenvolvimento de uma peça com geometria mais coerente com o modelo esperado, atendendo os requisitos de facilidade de manufatura, resistência, durabilidade, porém em adversidade à redução de custos. As simulações foram determinantes para a validação do modelo de geometria e a substituição do material, bem como, para alcançar os objetivos do projeto. Conforme as figuras 37, 38, 39 e 40, obtemos os resultados comparativos de simulações entre a bandeja de suspensão traseira direita do tipo *three-link* em aço SAE 4130 e o modelo proposto em fibra de carbono com resina epóxi.

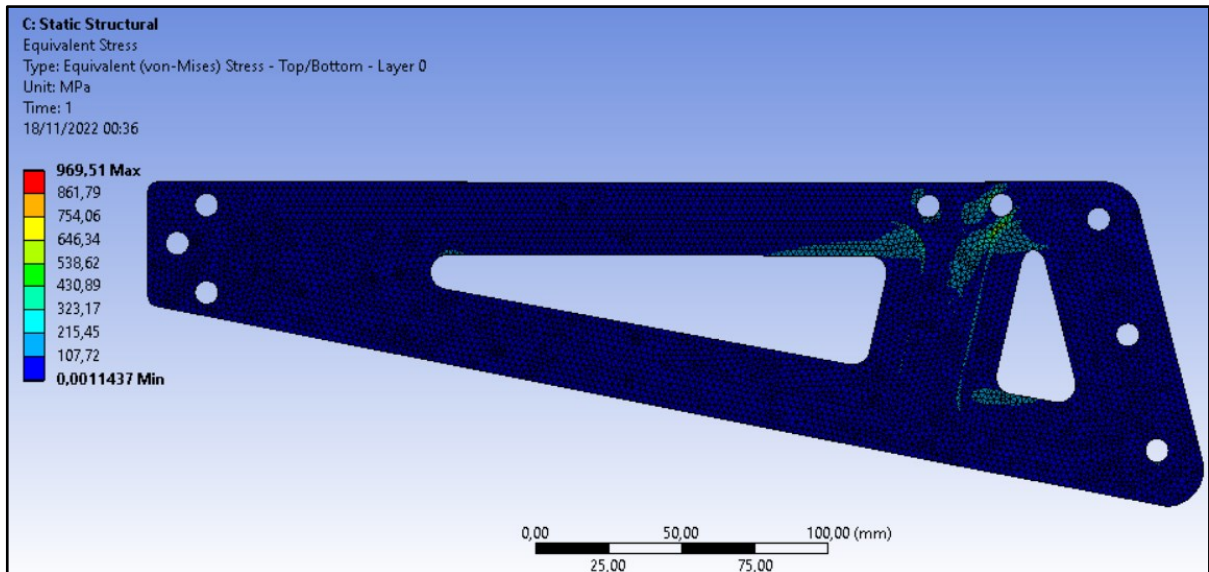
**Figura 37 – Tensão equivalente em MPa para a bandeja de suspensão em aço SAE 4130**



Fonte: Autoria própria (2022)



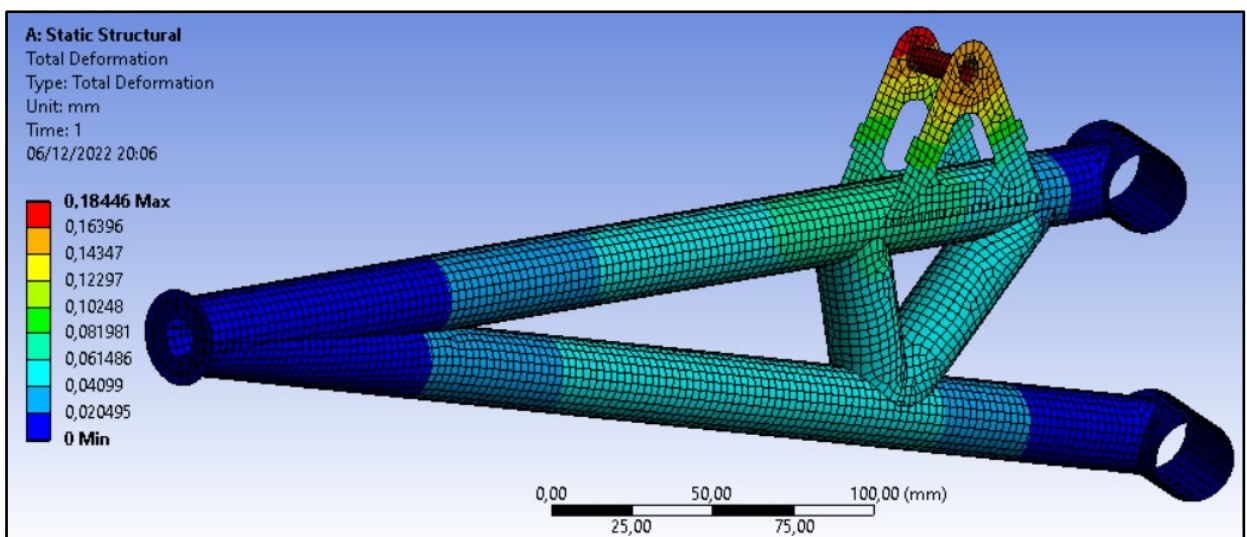
**Figura 38 – Tensão equivalente em MPa para a bandeja de suspensão em fibra de carbono**



Fonte: Autoria própria (2022)

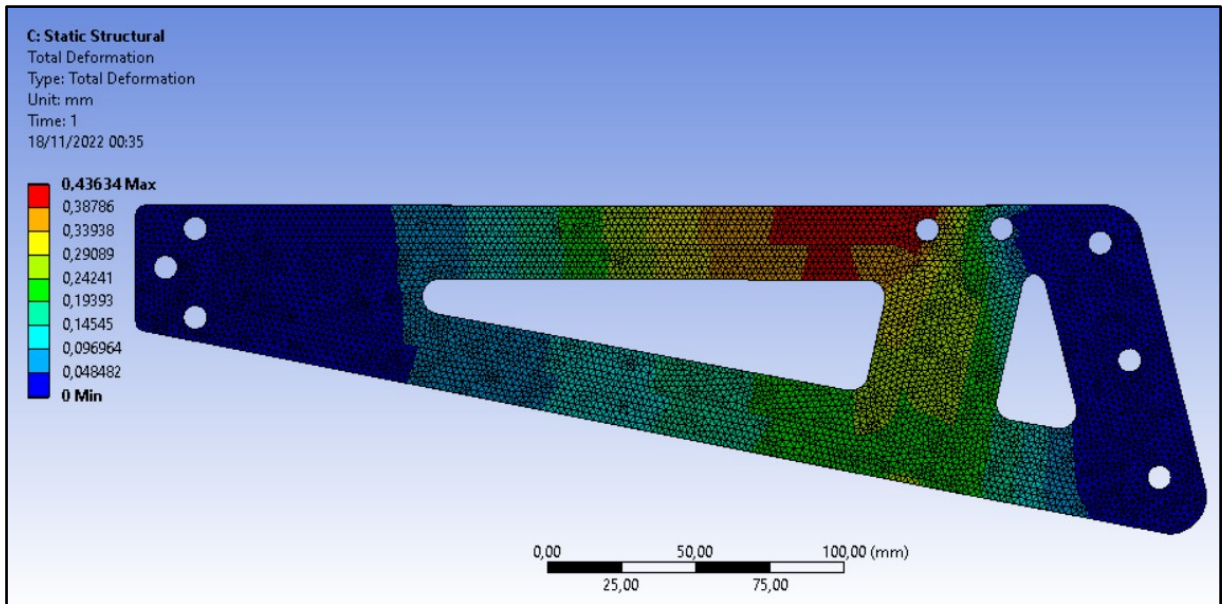
A tensão equivalente para a bandeja de suspensão traseira do tipo *Three-link* em fibra de carbono obteve um pico máximo de 969MPa, porém sua média esteve em 24MPa. Comparando os resultados, a Bandeja de suspensão em Aço SAE 4130 obteve um pico máximo de tensão de 360MPa, com média em 17MPa. Considerando que a resistência a tração é 2450MPa e 560MPa para fibra de carbono e aço SAE 4130, respectivamente, ambos os materiais estariam na faixa de resistência.

**Figura 39 – Deformação máxima em mm da bandeja de suspensão em aço SAE 4130**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 40 – Deformação máxima em mm da bandeja de suspensão em fibra de carbono**



**Fonte: Autoria própria (2022)**

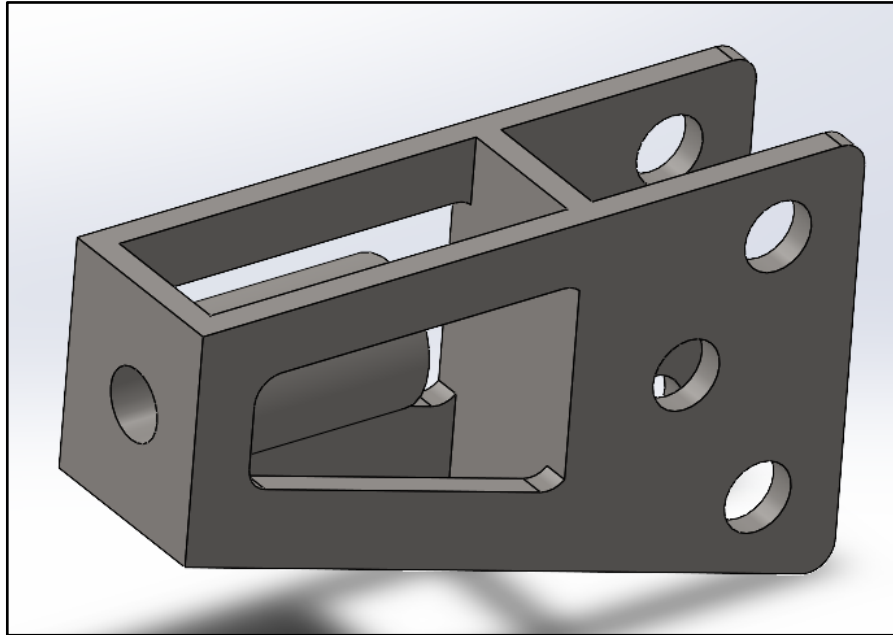
A deformação máxima em milímetros para a bandeja de suspensão traseira do tipo *Three-link* apresentou um pico máximo de 0,44mm, porém sua média permaneceu em 0,13mm. Como resultado comparativo, para a Bandeja de suspensão em Aço SAE 4130, o pico máximo de deformação foi 0,18mm, e sua média se manteve em 0,04mm.

Deste modo, podemos identificar que os resultados estiveram dentro do esperado de resistência mecânica e deformação, tendo em vista que uma das premissas era apresentar resistência mecânica próxima ou superior a do Aço SAE 4130.

## 4.2 Impacto da massa

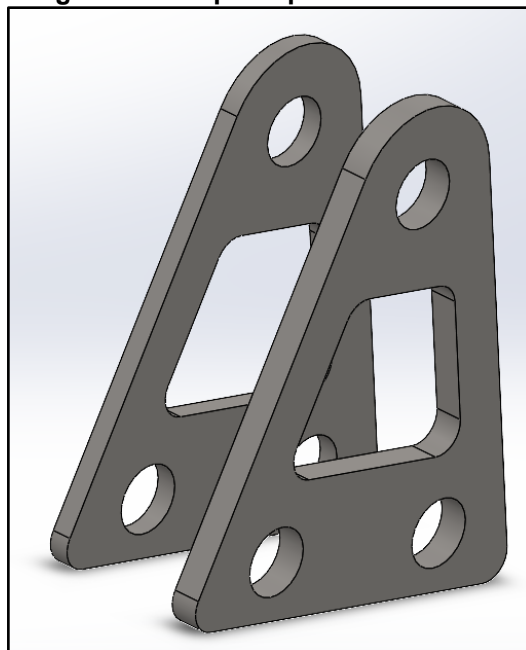
Para definir o impacto da massa, foram utilizados os dados de entrada do *software Solidworks* para cada componente. Através das Figuras 41, 42 e 43, respectivamente, são apresentadas as peças que serão adicionadas à estrutura da bandeja em fibra de carbono, para fixação das peças e ligação direta com o protótipo. Após, na Tabela 5, temos os dados da massa para os componentes da Bandeja de suspensão traseira em fibra de carbono e em aço.

**Figura 41 – Suporte para uniball – Fixação ao chassi do protótipo**



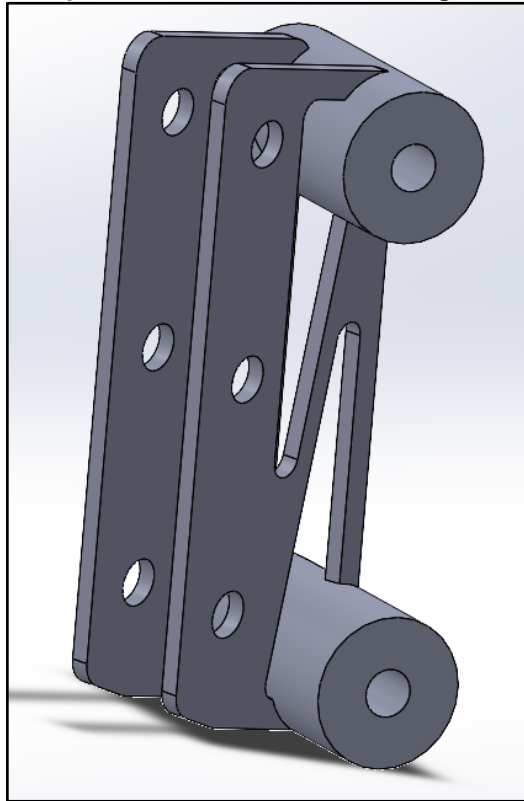
Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 42 – Suporte para amortecedor**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 43 – Suporte para buchas – Fixação a manga de eixo do protótipo**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 5 – Impacto massa para os componentes da bandeja de suspensão traseira em fibra de carbono**

Componente	Material	Massa (g)
Bandeja de Suspensão	Fibra de Carbono	516
Suporte Uniball	Aço SAE 1020	160
Suporte Buchas	Aço SAE 1020	200
Suporte Amortecedor	Aço SAE 1020	60

Fonte: Autoria própria (2022)

Totalizando 936g, a bandeja de suspensão em fibra de carbono está abaixo dos 1275g que o *software* fornece para a peça em Aço SAE 4130. A redução de massa representa cerca de 26,6%, considerada expressiva para um dos principais componentes de suspensão.

### 4.3 Impacto do custo

Para determinar o impacto do custo, foram utilizados os valores reais para aquisição dos materiais. Simplificando as análises, os suportes e buchas em aço SAE 1020 serão desconsiderados na comparação, pois são indispensáveis e utilizados em ambos os modelos; e também, as buchas, as chapas de aço e os cortes a água são obtidos gratuitamente através de patrocínio. Assim, as comparações levaram em

conta a peça principal desenvolvida em cada material, com os valores dos tubos SAE 4130 e com a placa de fibra de carbono.

É importante considerar que os componentes de suspensão possuam peças sobressalentes para reposição, para necessidade de utilização em casos de quebra ou imprevisibilidade das condições de pista durante a competição. Para utilização do modelo em aço, são necessárias uma peça para a direita e uma peça para a esquerda, e recomenda-se uma peça sobressalente para cada lado, resultando na necessidade de quatro peças. Para a bandeja em fibra de carbono, o modelo foi projetado para utilização em ambos os lados do protótipo, de forma intercambiável, através de ajustes nas geometrias de suporte, mas seu componente principal, é único para ambos os lados. Assim, pode-se reduzir a quantidade necessária para três peças no total, duas peças para utilização simultânea no protótipo e uma de reserva. Os dados referentes os custos, é apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6 – Impacto massa para os componentes da bandeja de suspensão traseira em fibra de carbono**

<b>Componente</b>	<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor Matéria-Prima</b>	<b>Valor Unitário da Peça</b>
Bandeja de Suspensão	Fibra de Carbono	0,039639m <sup>2</sup>	R\$ 18.069,91/m <sup>2</sup>	R\$ 716,27
Bandeja de Suspensão	Aço SAE 4130	1m	R\$ 140,00/m	R\$140,00

**Fonte: Aatoria própria (2022)**

O aço SAE 4130 é normalmente comercializado em barras de seis metros, ao preço de R\$ 840,00 cada, resultando num custo de R\$ 140,00 o metro linear, e para manufatura da bandeja de suspensão, é necessário a utilização de um metro por peça.

Para a fabricação da bandeja de suspensão em fibra de carbono, será utilizada a placa de fibra de carbono T700G, com uma dimensão de 609,6mm x 609,6mm, equivalente a 0,371612m<sup>2</sup>, é encontrada no mercado ao preço de R\$ 6.715,00 (utilizado valor do dólar para conversão de R\$ 5,33, sem considerar taxas e outros custos para importação), logo, seu valor é de R\$ 18.069,91/m<sup>2</sup>. Para a fabricação da bandeja de suspensão, será necessário 0,039639m<sup>2</sup> da placa de fibra de carbono, ao qual, resultará no custo unitário de R\$ 716,27 por peça.

Conclui-se que o custo de fabricação da bandeja de suspensão em fibra de carbono será um pouco maior que cinco vezes mais oneroso, se comparado à fabricação em aço SAE 4130.

## 5 CONCLUSÃO

Diante de todos os fatores analisados pelo presente trabalho, foram realizados estudos em relação a tipologia do material compósito e as características da fibra de carbono. Também foram estudadas as formas para a realização das simulações dos componentes, considerando que o material compósito apresenta uma característica e comportamento mecânico completamente diferente dos materiais metálicos, especialmente o aço.

Com o desenvolvimento do projeto, obtivemos uma peça que atende aos requisitos iniciais propostos, de utilização de materiais disponíveis no mercado e de facilidade na fabricação. O modelo de peça projetado também recebeu melhorias construtivas, com intuito de torná-la intercambiável para utilização em ambos os lados, direito e esquerdo, de modo que apenas os suportes sejam espelhados. A intercambialidade é um elemento essencial para utilização no protótipo, devido ao elevado esforço desta peça, desgastes e possibilidades de quebras resultantes da fadiga na utilização de pistas de terreno acidentado, com grandes obstáculos e de grande dificuldade técnica. Com o desenvolvimento de uma peça intercambiável, de uso comum, de fácil substituição, resistente e que possibilita o alívio de peso total do protótipo, são fatores extremamente positivos para sua utilização.

O modelo utilizou *software* de simulação computacional para a análise comparativa dos materiais distintos utilizados para a fabricação da bandeja de suspensão, e de acordo com os dados de entrada obtidos com a Equipe Pato BAJA, os resultados foram expressivos e demonstram que o componente em fibra de carbono, analisados de forma estática, pode resistir às condições requisitadas por um protótipo BAJA. Sugere-se que, com a sua utilização do componente proposto, a equipe monitore a sua relação dinâmica com os elementos, como a fadiga.

Este trabalho também poderá ser apresentado na forma de estudo de caso na competição SAE BRASIL, demonstrando que a equipe Pato BAJA está em constante busca de aperfeiçoamento técnico para o protótipo, utilizando materiais tecnológicos e modernos, e que ampliam as possibilidades construtivas.

Conclui-se que, mediante ao acréscimo de 511,62 % no custo de fabricação da bandeja de suspensão, obtivemos um componente com redução de 26,6 % da massa e que contribui com a redução de aproximadamente 678g do total de massa do protótipo e que atende às principais premissas propostas, de facilidade na

manufatura com uma resistência mecânica semelhante ao da presente peça manufaturada em aço SAE 4130.

A análise da viabilidade técnica e econômica para implementação e substituição da bandeja de suspensão se dará pela Equipe Pato BAJA. Apesar da constante evolução técnica implementada ao longo dos anos pela equipe Pato BAJA, constantemente busca-se o aprimoramento da dinâmica do protótipo e redução da massa. O presente trabalho atende a premissa de redução de massa, mas com um significativo investimento que deverá ser ponderado pela equipe.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Diante do tema abordado durante o trabalho, pode-se perceber que a abordagem simplificada resultou em ganhos e experiência para o Projeto BAJA. Com isso, sugere-se como proposta futura a substituição dos suportes de aço SAE 1020 para materiais de liga de alumínio, analisar a viabilidade de fabricação de uma placa de fibra de carbono na universidade, refinar e complementar os estudos e as simulações do presente trabalho buscando novas variáveis e resultados mais precisos, principalmente no aprimoramento de malha, análise de esforços nas furações e torção do componente. Sugere-se também, o estímulo dentro da equipe para novos estudos em materiais compósitos para outros componentes, de diferentes subsistemas, que propiciem a continuidade da evolução do projeto com soluções inovadoras para a competição BAJA e também para a contribuição na formação profissional de seus membros e demais estudantes.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, Avelino. F. **Elementos finitos - a base da tecnologia CAE**. 7. ed. São Paulo, SP: Érica, 2002.
- ANSYS. **ANSYS Composite PrepPost User's Guide**. Release 15.0. Canonsburg, PA: Ansys, Inc. 2013
- ASSAD, Allan. **CUBO DE RODA BAJA SAE**. 13 mai. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=MG14lptgzTU>. Acesso em: 11 mai. 2022.
- BAJPAI, Pratima; **Carbon Fiber Second Edition**, Great Britain: Elsevier Inc, 2021. ISBN: 978-0-12-821890-7
- BARBERO, Ever.J. **Finite element analysis of composite materials using ansys®**, 2ed. Boca Raton: Taylor & Francys Group, 2014. ISBN 978-1-4665-1690-8
- BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**, 2ed. Watertown: K.J. BATHE, 2014. ISBN 978-0-97-900495-7
- CALLISTER. Willian. D; RETHWISCH. David. G. **Ciência e Engenharia de materiais**, uma introdução, 7ed. Rio de Janeiro: GenLtc, 2012, Cap 16.
- d'ALMEIDA.J.R.M; MONTEIRO.S.M, **The Effect of the Resin/Hardener Ratio on the Compressive Behavior of an Epoxy System**, Great Britain: Elsevier Inc, 1995; Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0142-9418\(95\)00037-2](https://doi.org/10.1016/0142-9418(95)00037-2)
- DASSAULT SYSTEMES. **Cascas compostas**. 2016. Disponível em: [https://help.solidworks.com/2016/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c\\_Composite\\_Shells.htm?id=1dd67cc7e5854bd6bbc38a24c5c10039#Pg0](https://help.solidworks.com/2016/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Composite_Shells.htm?id=1dd67cc7e5854bd6bbc38a24c5c10039#Pg0) Acesso em: 07 jun. 2022.
- EQUIPE PATO BAJA. **Estatuto da Equipe – Pato BAJA**. Aprovado em assembleia geral, de 18 de junho de 2019, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, v. 3, 2019.
- GILLESPIE. Thomas. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Pennsylvania: Society of Automotive Engineers Inc, 1992. ISBN 13: 978-1-56-091199-9
- LEVY NETO, F; PARDINI, Luiz C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia** – 1.ed. – São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- LIMA, Leonardo. Z. **Otimização do braço inferior da suspensão dianteira do veículo baja utilizando o método dos elementos finitos**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2011.
- MAGALHÃES, Remo. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. 2003. Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.



MECHEAD. **Mesh methods and element types in Ansys Workbench**. 2022. Disponível em: <https://www.mechead.com/mesh-methods-and-element-types-in-ansys-workbench/>. Acesso em: 19 out.2022

MECHEAD. **3 Tips to improve your FE model**. 2021. Disponível em: <https://www.mechead.com/3-tips-to-improve-your-fe-model/>. Acesso em: 19 out.2022

NASSEH, Jorge. **Barcos: Métodos Avançados de Construção em Compósitos**. Rio de Janeiro - RJ: Sem Editora, 2007.

REFATTI, Fernando. **Determinação das forças atuantes na suspensão dianteira de um veículo baja sae**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina (FAHOR), Horizontina, 2015.

RUIZ, Pedro Franchi; VERISSIMO, Wellington Bazarim. **Produção e caracterização mecânica de um painel sanduíche com núcleo inercial tipo honeycomb de bambusa tuldoides**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pato Branco, 2021.

SAE BRASIL. **Regulamento administrativo e técnico – Baja SAE Brasil**. SAE Brasil, Programas estudantis, Baja SAE Brasil, Regras e relatórios, 2021. Disponível em: [http://saebrasil1.hospedagemdesites.ws/RATBSB\\_emenda\\_04.pdf](http://saebrasil1.hospedagemdesites.ws/RATBSB_emenda_04.pdf). Acesso em: 10 out.2022

SINGH, Kritika; GABEL, Kanishka. **Calculation of Dynamic Forces and Analysis of Front Upright for ATV**. Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Raipur, Chhattisgarh, India. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2020. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V7/i4/IRJET-V7I41189.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2022.