

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GABRIEL MEIRA VERÍSSIMO DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTÁTICA DE UM CICLO-RIQUIXÁ ADAPTADO COM ESTRUTURA
EM FIBRA DE CARBONO**

Ilha Solteira
2024

GABRIEL MEIRA VERÍSSIMO DOS SANTOS

**ANÁLISE ESTÁTICA DE UM CICLO-RIQUIXÁ ADAPTADO COM
ESTRUTURA EM FIBRA DE CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de engenheiro mecânico.

Orientador:

Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- S237a Santos, Gabriel Meira Veríssimo dos.
Análise estática de um ciclo-riquixá adaptado com estrutura em fibra de carbono / Gabriel Meira Veríssimo dos Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
86 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2024
- Orientador: Márcio Antônio Bazani
- Inclui bibliografia
1. Análise estática. 2. Método dos elementos finitos. 3. Tensão. 4.
Deformação. 5. Chassi. 6. Fibra de carbono.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Análise estática de um ciclo-riquixá adaptado com estrutura em fibra de carbono

ALUNO: Gabriel Meira Veríssimo dos Santos

RA: 172054648

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani

Aprovado (X) – Reprovado () pela Comissão

Examinadora Nota obtida: 8,0

Comissão Examinadora

 Documento assinado digitalmente
MARCIO ANTONIO BAZANI
Data: 06/06/2024 10:54:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. _____

Prof. Dr. Márcio Antonio Bazani
Presidente (Orientador)

 Documento assinado digitalmente
EDUARDO PRETO
Data: 06/06/2024 14:16:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. _____

Doutorando. Eduardo Preto

 Documento assinado digitalmente
LUCAS SIMON ARAUJO
Data: 06/06/2024 16:41:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. _____

Mestrando. Lucas Simon Araujo

 Documento assinado digitalmente
GABRIEL MEIRA VERISSIMO DOS SANTOS
Data: 05/06/2024 22:39:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 23 de maio de 2024.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida, por todas as oportunidades que tenho e que já tive, e por todos os abjetivos alcançados nessa trajetória.

Em seguida, agradeço minha família, por todos os aprendizados, apoio e estrutura para que fosse possível alcançar minhas metas e conquistas. Pelo apoio em todos os momentos bons e também nos mais difíceis durante a graduação e na vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani, pela oportunidade, confiança e orientação prestada durante a elaboração dessa dissertação e durante todo o curso de graduação.

Ao grupo de extensão TEC Ilha BAJA por todos os ensinamentos, e experiências que enriqueceram os conhecimentos adquiridos na graduação.

Por fim, deixo meus agradecimentos aos meus amigos e colegas que tive a oportunidade de conhecer e conviver durante a graduação, pelos bons momentos vivenciados, aprendizados cultivados, apoio na vida pessoal e nos estudos. Também a toda equipe da FEIS por fazer parte e contribuir de forma imprescindível na minha formação profissional.

RESUMO

Os ciclo-riquixás são meios de transporte em baixa escala, nos quais o veículo utilizado normalmente é um triciclo, quadriciclo ou até mesmo uma bicicleta que traciona uma estrutura com assentos elevados com passageiros. Caracterizado por ser um tipo de veículo de força motriz humana ou movido por motor elétrico, este meio de transporte de origem asiática está difundido nos grandes centros urbanos, próximos a pontos turísticos e normalmente disponível para aluguel. Em tarefas fundamentais para a qualidade de vida como a locomoção, a acessibilidade é imprescindível para as pessoas com deficiência motora ou dificuldades de locomoção decorrentes da idade. Como proposta para trazer mais alegria e qualidade de vida para pessoas com restrições da capacidade motora, o material de estudo deste projeto é um ciclo-riquixá adaptado semelhante ao já construído no campus da UNESP de Ilha Solteira, contudo, com a proposta de adaptações para uma estrutura de fibra de carbono. Assim, o presente trabalho objetiva a realização da simulação e estudo estático do protótipo em questão. Hoje, a modelagem por elementos finitos é uma poderosa ferramenta, indispensável para a simulação do comportamento estrutural. Após desenhar a estrutura no software Solidworks®, foi simulado o comportamento estático da estrutura do ciclo-riquixá através do software comercial Ansys® e obteve-se, tanto utilizando fibra de carbono como matéria prima, quanto aço estrutural, que as tensões máximas sobre as estruturas não ultrapassaram o limite de escoamento dos materiais, de modo que eles respeitam o critério de integridade. Contudo, as elevadas deformações reprovaram a estrutura no critério de rigidez. Desse modo, foram propostas alterações no chassi visando atender aos 2 critérios mencionados e os resultados obtidos foram satisfatórios.

Palavras-chave: Análise estática. Método dos Elementos Finitos. Tensão. Deformação. Chassi. Fibra de carbono.

ABSTRACT

Cycle rickshaws are low-scale means of transport, the Vehicle used is normally a tricycle, quadricycle or even a bicycle that pulls a structure with elevated seats with passengers. Characterized by being a type of human-powered vehicle or powered by an electric motor, this Asian's origin means of transport is widespread in large urban centers, close to tourist attractions and normally available for rent. In tasks that are fundamental to quality of life, such as locomotion, accessibility is essential for people with motor disabilities or mobility difficulties resulting from age. As a proposal to bring more joy and quality of life to people with restrictions in their motor capacity, the study material for this Project is an adapted cycle-rickshaw similar to the one already built on the UNESP campus in Ilha Solteira, however, with the proposal for adaptations to a carbon fiber structure. Therefore, the present work aims to carry out the simulations and static study of the prototype in question. Today, finite element modeling is a powerful tool, indispensable for simulating structural behavior. After designing the structure in Solidworks® software, the static behavior of the cycle rickshaw structure was simulated using the commercial software Ansys® and, it was obtained, both using carbon fiber as raw material and structural steel, that the maximum stresses on the structures not exceeded the yield strength of the materials, so they respected the integrity criterion. However, the high deformations failed the structure in the stiffness criterion. Therefore, changes to the chassis were proposed to meet the 2 criteria mentioned and the results obtained were satisfactory.

Keywords: Static analysis. Finite Element Method. Stress. Deformation. Chassis. Carbon fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Ciclo riquixá.....	15
Figura 2	- Pirâmide etária Brasileira comparativa entre 2012 e 2022.....	17
Figura 3	- Pirâmide etária brasileira de 1980 a 2060.....	17
Figura 4	- Sistema de coordenadas de um veículo.....	21
Figura 5	- Chassi tipo escada.....	22
Figura 6	- Chassi cruciforme.....	22
Figura 7	- Forma correta de triangulação de tubos.....	23
Figura 8	- Chassi tubular de seção circular.....	24
Figura 9	- Chassi tubular de seções retangulares e triangulares.....	24
Figura 10	- Chassi monobloco.....	25
Figura 11	- Chassi combinado.....	26
Figura 12	- Tipos de reforços para materiais compósitos.....	27
Figura 13	- Curva tensão deformação para fibras contínuas alinhadas com carregamento longitudinal.....	28
Figura 14	- Tipos de elementos finitos.....	29
Figura 15	- Exemplificação de um carregamento estático.....	32
Figura 16	- Metodologia empregada em uma análise estática.....	33
Figura 17	- Metodologia para definição de modelo simplificado confiável.....	33
Figura 18	- Estrutura padrão de análise estática no Ansys Workbench Academic Student 2024 R1.....	34
Figura 19	- Modelo de estrutura no ambiente SpaceClaim do Ansys Student.....	36
Figura 20	- Indicação das seções de contato dos eixos com as rodas no ambiente SpaceClaim.....	37
Figura 21	- Ambiente Mechanical do Ansys, com estrutura e condições de contorno expostas.....	39
Figura 22	- Condições de contorno para o estudo 1 (forças aplicadas nos eixos).	40
Figura 23	- Condições de contorno para o estudo 2 (forças aplicadas nos assentos)	40
Figura 24	- Malha utilizada nas simulações estruturais do ciclo-riquixá.....	42
Figura 25	- Ciclo riquixá em estrutura de fibra de carbono.....	44
Figura 26	- Subdivisões da estrutura no Solidworks.....	45
Figura 27	- Distribuição de massa dos passageiros.....	46
Figura 28	- Configurações estudadas.....	47
Figura 29	- Região da estrutura com resultados incondizentes.....	50
Figura 30	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono sem passageiros.....	51
Figura 31	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono sem passageiros.....	52
Figura 32	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 2 passageiros na dianteira.....	53
Figura 33	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 2 passageiros na dianteira.....	54
Figura 34	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 2 passageiros na traseira.....	55
Figura 35	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 2 passageiros na traseira.....	56

Figura 36	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 4 passageiros.....	57
Figura 37	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 4 passageiros.....	58
Figura 38	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural sem passageiros.....	59
Figura 39	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural sem passageiros.....	60
Figura 40	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 2 passageiros na dianteira.....	61
Figura 41	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 2 passageiros na dianteira.....	62
Figura 42	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 2 passageiros na traseira.....	63
Figura 43	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 2 passageiros na traseira.....	64
Figura 44	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 4 passageiros.....	65
Figura 45	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 4 passageiros.....	66
Figura 46	- Regiões para estudo de tensão.....	67
Figura 47	- Deformação total com forças aplicadas nos assentos da estrutura em Fibra de carbono com 4 passageiros.....	70
Figura 48	- Deformação total com forças aplicadas nos assentos da estrutura em aço estrutural com 4 passageiros.....	70
Figura 49	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos assentos da estrutura em fibra de carbono com 4 passageiros.....	71
Figura 50	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos assentos da estrutura em aço estrutural com 4 passageiros.....	72
Figura 51	- Configuração estrutural do chassi modificada.....	75
Figura 52	- Correções no modelo do chassi.....	75
Figura 53	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura corrigida em fibra de carbono.....	76
Figura 54	- Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura corrigida em aço estrutural.....	77
Figura 55	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura corrigida em fibra de carbono.....	77
Figura 56	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura corrigida em aço estrutural.....	78
Figura 57	- Deformação total com forças aplicadas nos assentos da estrutura corrigida em fibra de carbono.....	78
Figura 58	- Deformação total com forças aplicadas nos assentos da estrutura corrigida em aço estrutural.....	79
Figura 59	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos assentos da estrutura corrigida em fibra de carbono.....	79
Figura 60	- Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos assentos da estrutura corrigida em aço estrutural.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.....	37
Tabela 2	- Parâmetros da malha utilizada.....	42
Tabela 3	- Massa específica dos materiais utilizados.....	45
Tabela 4	- Centros de massa para diferentes configurações de estudo.....	47
Tabela 5	- Forças de entrada nas rodas.....	48
Tabela 6	- Tensão máxima nos pontos de estudo.....	68
Tabela 7	- Tensão máxima nos pontos de estudo para as simulações com esforços nos assentos.....	72
Tabela 8	- Valores de tensão e deformação máximos.....	73
Tabela 9	- Forças de entrada nos eixos de roda da carruagem corrigida.....	76
Tabela 10	- Valores de tensão e deformação máximos para estrutura corrigida	80
Tabela 11	- Comparação da tensão máxima entre as estruturas.....	81
Tabela 12	- Comparação da deformação máxima entre as estruturas.....	81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CG	Centro de gravidade
D _d	Dianteiro direito
D _e	Dianteiro esquerdo
Kg	Quilograma
m	Metro
mm	Milimetro
MEF	Método dos Elementos Finitos
MPa	Megapascal
OMS	Organização Mundial da Saúde
Pa	Pascal
PAN	Poliacrilonitrila
PNS	Pesquisa Nacional de Saúde
SAE	Sociedade Automotiva dos Engenheiros
T _d	Traseiro esquerdo
T _e	Traseiro direito
Unesp	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

U_{max}	Deformação máxima na estrutura (mm)
U_{1max}	Deformação Máxima na estrutura 1 (mm)
U_{2max}	Deformação Máxima na estrutura 2 (mm)
σ_{max}	Tensão máxima (MPa)
σ_{1max}	Tensão Máxima na estrutura 1 (MPa)
σ_{2max}	Tensão Máxima na estrutura 2 (MPa)
σ_f^*	Tensão de ruptura da fibra;
σ_m^*	Tensão de ruptura da matriz;
σ_m'	Tensão na matriz na ruptura da fibra;
σ_{cl}^*	Tensão de ruptura do compósito;
ε	Deformação elástica equivalente;
ε_f^*	Deformação total da fibra e do compósito;
ε_m^*	Deformação total da matriz;
ε_{lm}^*	Início da deformação plástica da matriz (limite de escoamento) longitudinal.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS GERAIS.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2	INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	CHASSI.....	20
2.2	TIPOS DE CHASSI.....	21
2.2.1	Chassi tipo escadas.....	21
2.2.2	Chassi cruciforme.....	22
2.2.3	Chassi tubular.....	23
2.2.4	Chassi monobloco.....	25
2.2.5	Chassi combinado.....	25
2.3	FIBRA DE CARBONO.....	26
2.4	ELEMENTOS FINITOS.....	29
2.4.1	Softwares de modelagem e simulação.....	31
2.5	ANÁLISE ESTÁTICA.....	31
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA.....	35
3.2	DEFINIÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	37
3.3	DEFINIÇÃO DO SETUP.....	38
3.4	DEFINIÇÃO DA MALHA.....	41
3.5	SOLUÇÃO.....	43
4	RESULTADOS.....	44
4.1	MODELO DA ESTRUTURA.....	44
4.2	ANÁLISE ESTÁTICA.....	49
4.3	MODIFICAÇÕES NO CHASSI.....	74
5	CONCLUSÃO.....	83
	REFERÊNCIAS.....	85

1 INTRODUÇÃO

Os meios de transporte foram essenciais na história e no desenvolvimento da humanidade. Com o passar dos séculos, estes foram usados para adquirir alimentos, em guerras, para transportar pessoas e mercadorias, atravessar grandes distâncias em terra, rios e oceanos, pelos ares e até mesmo pelo espaço sideral. Com início na pré-história, em que os meios de transporte das comunidades primitivas eram suas próprias pernas e a força muscular de animais, as necessidades do homem fizeram com que os meios evoluíssem de forma inimaginável até os dias atuais (ALCOFORADO, 2021).

A invenção da roda foi um grande marco da história dos meios de transporte, o qual fez com que as possibilidades de transporte se expandissem para além dos animais. Com a utilização de carroças foi possível tornar mais eficiente a locomoção de pessoas e transporte de mercadorias. Hoje, a roda é indispensável no dia a dia e além de veículos compõe grande parte das máquinas industriais.

Já no século XVII, a primeira fonte de força motriz não natural foi inventada como a contribuição de alguns dos grandes pensadores de sua época. No mesmo século, o motor a vapor foi aperfeiçoado, o que possibilitou seu uso no âmbito industrial e o desenvolvimento dos primeiros veículos a motor. Em 1769, o francês Nicolas Joseph, com intenções bélicas, construiu um triciclo a vapor para o transporte de carga e por volta do início do século seguinte, diversas carruagens a vapor foram inventadas, contudo, foram consideradas inviáveis na época, quando comparadas aos trens (GILLESPIE, 1992).

Inventado em 1868, o riquixá é um veículo de tração humana cuja criação foi inspirada nas carruagens puxadas a cavalo. Nesse meio de transporte, uma pessoa puxa uma carroça de duas rodas, na qual acomodam-se até duas pessoas. Já na década de 1870, milhares de riquixás eram utilizados na Ásia. Embora tenha sido um meio muito utilizado, atualmente, caiu em desuso, passando a ser usado apenas para passeios turísticos e exposições em museus (KAWANAMI, 2022).

Como evolução dos modelos de riquixá em que pessoas puxavam o veículo caminhando, surgiram os ciclos riquixás. Com um conceito similar ao descrito anteriormente, este tem como diferença o fato de o condutor utilizar uma bicicleta ou triciclo como fonte de força motriz para o meio de transporte. A disposição de assentos para o condutor e passageiros e a estrutura do veículo variam de acordo com a

intenção de uso, o modelo, e o lugar de origem. Por exemplo, modelos oriundos do sul da Ásia normalmente possuem o chassi e a estrutura dos assentos dos passageiros atrás do motorista, enquanto na indonésia o mais comum é o assento do motorista ficar na parte de trás (“Ciclo-riquixá”, 2024). Na Figura 1, a seguir, é possível observar um ciclo riquixá e sua estrutura.

Figura 1 – Ciclo riquixá



Fonte: IGOR, 2021.

Como parte dos sistemas mecânicos veiculares dos automóveis, o chassi também é parte primordial de veículos como os riquixá e os ciclo riquixás. Além da necessidade de cumprir o papel principal de transporte, também devem prezar pela segurança e conforto dos passageiros e do motorista. Assim, definido como a estrutura principal do veículo, os chassis precisam ser projetados com o intuito de resistir aos esforços impostos pelos demais componentes internos acoplados a ele e do contato com o meio ambiente (SOARES et al., 2012).

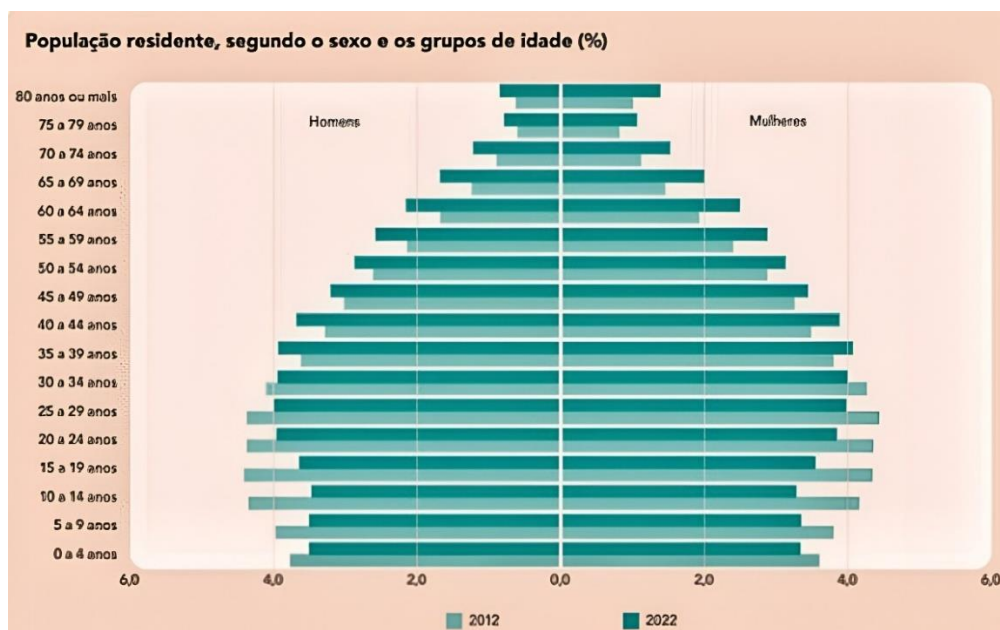
Mesmo que os veículos tenham os seus chassis desenvolvidos respeitando os requisitos de projeto para segurança e ergonomia, quando se trata de transporte de pessoas com deficiência motora ou dificuldades de locomoção, os veículos adaptados para atender esse público são minoria. De acordo com o decreto federal nº 5.296/2004, pessoa com deficiência é aquela que possui limitação ou incapacidade para o desempenho de atividade e se enquadra nas seguintes categorias de: deficiência física, mental, sensorial, orgânica e múltipla. O mesmo decreto define ainda que

pessoa com restrição de mobilidade é aquela que, não se enquadrando no conceito de pessoa com deficiência, tenha, por qualquer motivo, dificuldade de movimentar-se, permanente ou temporariamente, gerando redução efetiva da mobilidade, flexibilidade, coordenação motora e percepção. Trata-se de pessoas idosas, gestantes, lactantes, convalescentes cirúrgicos, pessoas com criança de colo, obesas, dentre outras. Assim, para garantia dos direitos e deveres dos cidadãos, respeitando os princípios de independência, autonomia e dignidade de forma coletiva e individual, é imprescindível destacar a importância da acessibilidade (LIMA; ARRUDA; GUERRA, [s.d.]).

Para compreensão da expressiva parcela da população que lida com dificuldades de mobilidade, passa a ser interessante observar dados que expressam a situação de forma quantitativa. Logo, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saúde (PNS) de 2013 e 2019, em 2013 tínhamos que 1% da população brasileira que adquiriu doença física por doença ou acidente e 0,3% nasceram com a deficiência física, o que para a população da época de 200,6 milhões de pessoas corresponde a um valor aproximado de 2 milhões e 600 mil pessoas respectivamente. Já em 2019, 4,9% dos brasileiros possuíam deficiência motora, sendo nos membros superiores ou inferiores e 1,7% usavam equipamentos de auxílio para a locomoção, trazendo para número de pessoas teríamos aproximadamente 10,4 e 3,6 milhões (“Painel de Indicadores – PNS”, 2021).

Ademais, como fator agravante do número de pessoas com necessidade de auxílio para locomoção, o envelhecimento da população é crescente. Avanços tecnológicos, principalmente na área da saúde, aumentam a expectativa de vida da população. Consequentemente, a necessidade de um mundo mais acessível às minorias citadas é evidente. Nas Figuras 2 e 3, a seguir, pode-se observar pirâmides etárias da população brasileira.

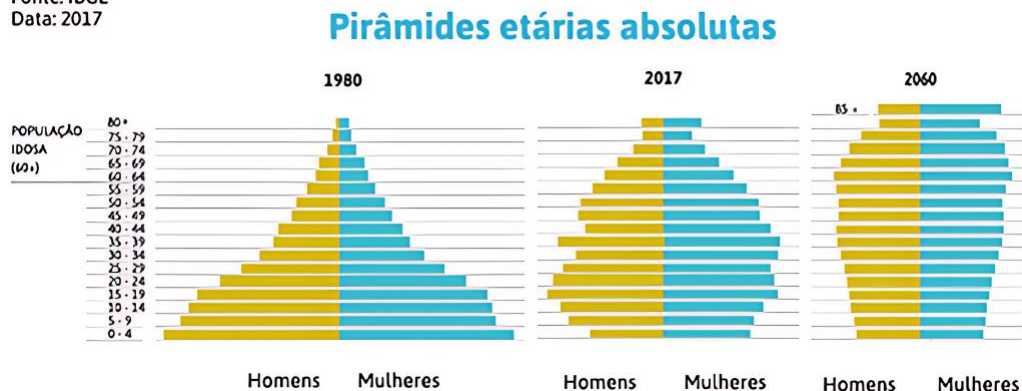
Figura 2 - Pirâmide etária Brasileira comparativa entre 2012 e 2022.



Fonte: AZEVEDO, 2022.

Figura 3 - Pirâmide etária brasileira de 1980 a 2060.

Fonte: IBGE
Data: 2017



Fonte: ASAP, 2021.

Como é possível notar na Figura 2, o envelhecimento da população brasileira aumentou entre 2012 e 2022, o que fica claro com a redução do número de pessoas nos grupos etários da base da pirâmide e o aumento das porcentagens do topo. Além disso, pode-se concluir que a mortalidade de homens é maior que a de mulheres.

Já na Figura 3, com o comparativo de pirâmides etárias iniciado em 1980 e uma estimativa feita até o ano de 2060, os dados do IBGE estimaram uma visível alteração no formato da pirâmide etária brasileira. Além disso, a Organização Mundial da Saúde

(OMS) estima que até 2050, o número de pessoas com idade superior a 60 anos chegará a 2 bilhões de pessoas, representando um quinto da população mundial.

Com o envelhecimento crescente, a população idosa, mais sujeita a acidentes e doenças degenerativas, requer atenção e ajuda no desenvolvimento de novos equipamentos que promovam a acessibilidade e maior qualidade de vida. Movimentos como “*Cycling Without Age*”, iniciativa que muda a vida de idosos ao possibilitar vivenciar novamente experiências de liberdade e levar alegria e sorrisos nos seus rostos com o ciclismo. De forma similar, e baseado nessa ideia, o ciclo riquixá (Carruagem da alegria) cuja estrutura será base de estudo neste trabalho, foi desenvolvido.

1.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento estrutural, estático, de um chassi de um ciclo riquixá através de uma modelagem via elementos finitos utilizando os softwares Solidworks e ANSYS.

1. 2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Modelagem 3D do chassi do ciclo riquixá.
2. Estudo de convergência de malha de elementos finitos;
3. Estudo estático via elementos finitos no software ANSYS do chassi modelado atribuindo fibra de carbono como matéria prima.
4. Análise comparativa dos resultados com o material aço estrutural disponível na biblioteca do ANSYS;
5. Correção do chassi e verificação do comportamento estático.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Seção 1 – Na Introdução, foi contextualizado o tema de estudo e foram apresentadas as motivações para o desenvolvimento dos trabalhos relacionados com a “Carruagem da alegria”.

Seção 2 – Na Revisão Bibliográfica, serão estudados e compreendidos os fundamentos teóricos e respectivas formulações matemáticas.

Seção 3 – Na Metodologia, será reestruturado e desenhado o modelo de chassi que será simulado, com adequações do projeto inicial para viabilizar as simulações com a matéria prima de estudo. Ademais, serão explicados os procedimentos para realização de uma Análise Estática via ANSYS, com a especificação do critério utilizado para definição de malha e condições de contorno utilizadas neste trabalho.

Seção 4 – Nos Resultados, serão apresentados o modelo 3D, os valores de força aplicados conforme as condições de contorno especificadas, a malha definida e são analisados dos resultados obtidos.

Seção 5 – Na conclusão, serão feitas as considerações finais com base nos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão apresentados os fundamentos teóricos nos quais o trabalho foi embasado. Nele, é explorado o conceito de chassi, com um paralelo às necessidades do ciclo riquixá. Em seguida, serão discutidos os tipos de análises aplicadas para o estudo do comportamento estrutural do chassi proposto.

2.1 CHASSI

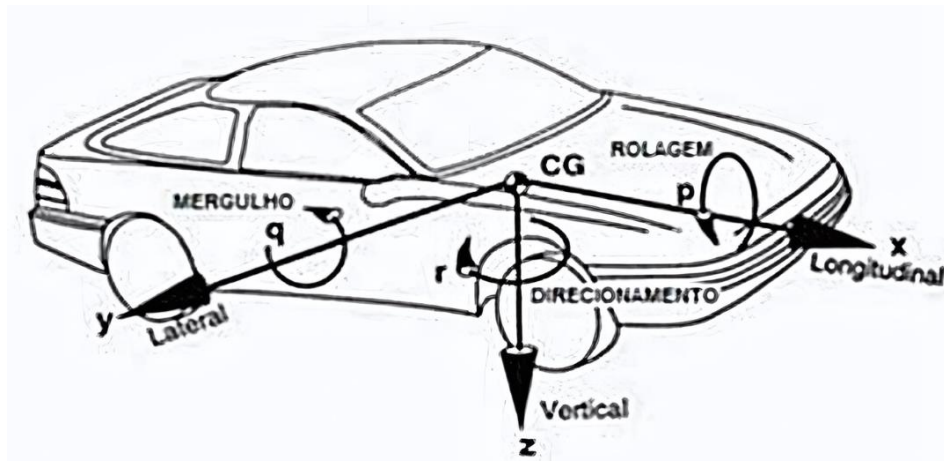
O chassi pode ser definido como o componente estrutural principal de um veículo, o qual deve ser capaz de suportar todos os esforços e solicitações que o veículo for submetido oferecendo resistência e estabilidade para diferentes interações e ambientes (CANUT, 2014). Além disso, Chandra et al (2012) se refere ao chassi automotivo como um esqueleto que liga todos os sistemas mecânicos de um automóvel. Assim, para cada tipo de solicitação e objetivo de uso, variam-se os tipos de chassi utilizados, sendo premente o estudo das forças e interações de trabalho.

Devido às novas ferramentas que foram desenvolvidas nos tempos atuais, os chassis mais modernos podem contar com uma relação melhor de peso e resistência, com a possibilidade de estudo de geometrias mais complexas. O surgimento de ferramentas de análises por elementos finitos, por exemplo, possibilitou um grande aumento na complexidade das estruturas projetadas (CANUT, 2014).

Para garantir baixos níveis de ruídos e vibrações, promovendo mais conforto e ergonomia, um chassi deve ser projetado seguindo vários requisitos de projeto. Desse modo, é importante que o chassi seja suficientemente rígido, capaz de reagir a cargas estáticas e dinâmicas sem deformações excessivas, evitar fadiga com um alto número de ciclos sob a ação da carga de trabalho aplicada e ainda resistir a cargas de impacto. Ademais, visando minimizar os riscos de ferimentos aos ocupantes e pedestres a estrutura deve ainda possuir a capacidade de deformar-se (FURTADO, 2013).

Na Figura 4, a seguir, está apresentada a notação referencial do sistema de coordenadas de um veículo, adotada por Gillespie (1992), como padrão de referência na avaliação de chassis automotivos. Similarmente para outros chassis, podem ser adotadas para estudo as propriedades de rigidez à flexão (em torno do eixo y) e rigidez à torção (em torno do eixo x).

Figura 4 - Sistema de coordenadas de um veículo.



Fonte: GILLESPIE, 1992.

2.2 TIPOS DE CHASSI

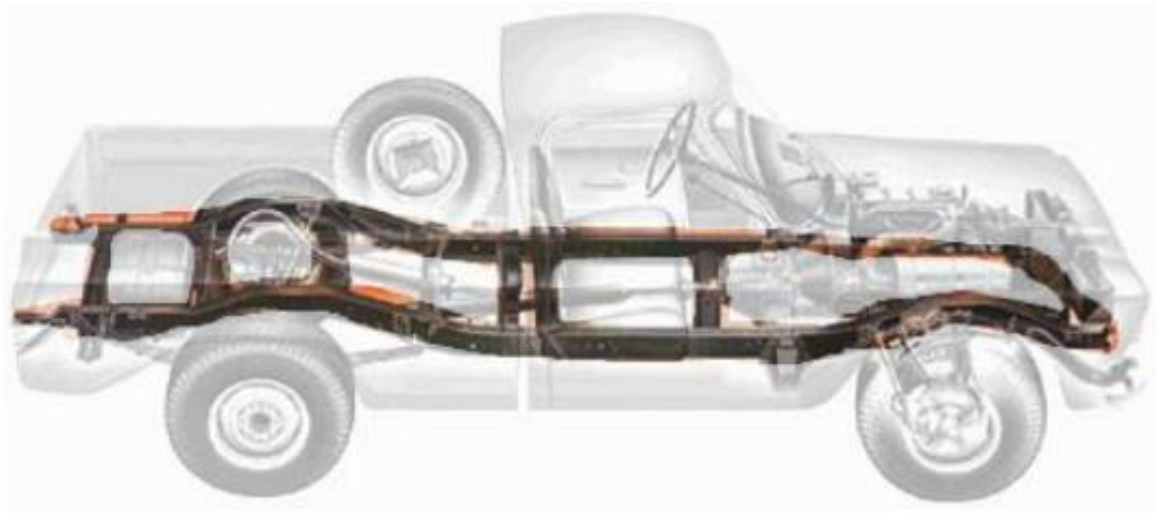
Diferentes tipos de chassis são utilizados conforme a exigência da aplicação a que se destinam. Logo, a seguir serão apresentados os principais modelos existentes, divididos em 5 grupos (CANUT, 2014). Os grupos são: Chassi em escadas; Chassi cruciforme; Chassi tubular; Chassi monocoque; Chassi combinado.

2.2.1 Chassi tipo escadas

Esse tipo de chassi foi utilizado em larga escala nos primeiros automóveis construídos e foi largamente utilizado até primórdios dos anos 60. O chassi em escada, como o nome sugere, assemelha-se muito com uma escada, sendo constituído de duas longarinas, ligado por várias transversinas. Sua estrutura simples possui como vantagem a flexibilidade de aplicações, com capacidade de ter montado sobre o mesmo chassi, diferentes tipos de carroceria. Assim, costuma ser utilizado em veículos como caminhões e pick-ups (FURTADO, 2013).

Do ponto de vista estrutural, essa configuração possui uma boa resistência a flexão e elevada rigidez de peso, contudo, por se tratar de uma estrutura praticamente plana, tem como ponto negativo uma baixa rigidez torcional. O perfil de tubo predominante para esse tipo de chassi é o retangular, visto que este é mais rígido que um perfil circular com mesma espessura de parede. A Figura 5 mostra um exemplo de chassi em escada.

Figura 5 - Chassi tipo escada.

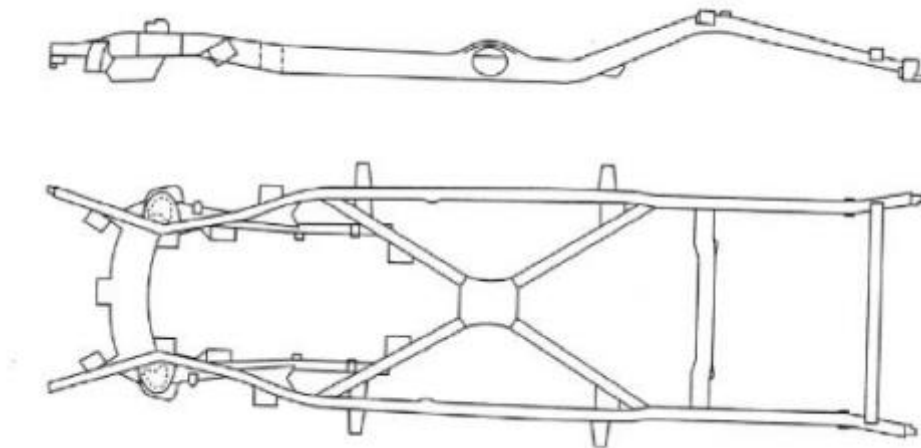


Fonte: FURTADO, 2013.

2.2.2 Chassi cruciforme

Este tipo de estrutura é muito similar à apresentada anteriormente, com o adicional de tubos em cruz entre as longarinas principais do chassi. Desse modo, é possível aumentar a rigidez torcional, que era o principal ponto negativo do chassi tipo escada. Portanto, quanto maior a rigidez da junta central da cruz, maior a rigidez do chassi. Na Figura 6 é possível observar a estrutura de um chassi cruciforme.

Figura 6 - Chassi cruciforme.

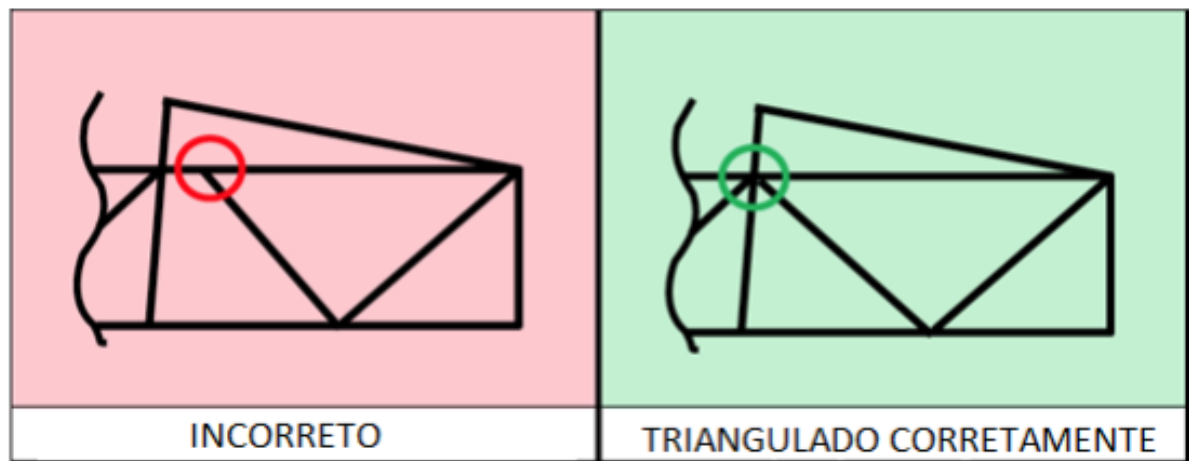


Fonte: CANUT, 2014.

2.2.3 Chassi tubular

Os chassis tubulares, diferentemente dos anteriormente citados, são estruturas essencialmente tridimensionais compostas principalmente por tubos de seções circulares ou quadradas. Logo, triangulando corretamente os tubos, como uma estrutura treliçada, é proporcionado ao chassi maior resistência a flexão e torção, com maior rigidez. Na Figura 7, vê-se a forma correta de triangular os tubos para atender a condição descrita.

Figura 7 - Forma correta de triangulação de tubos.

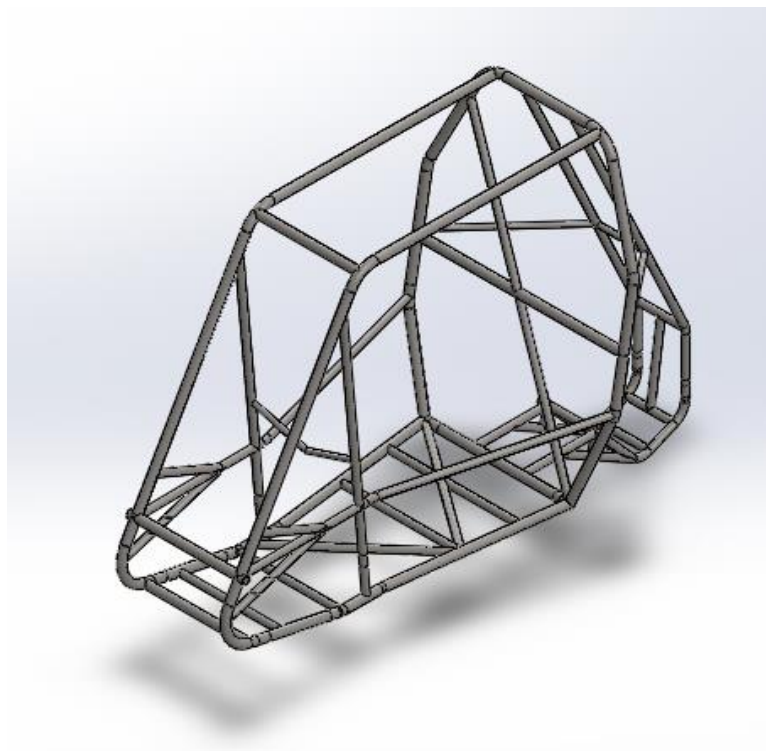


Fonte: CANUT, 2014.

O tipo de perfil de tubo adotado influencia nas características da estrutura construída. Assim, os tubos de seção quadrada permitem uma soldagem mais fácil, entretanto, não conferem a estrutura a mesma rigidez que um tubo de seção circular. Estes, têm a capacidade de proporcionar à estrutura a rigidez máxima.

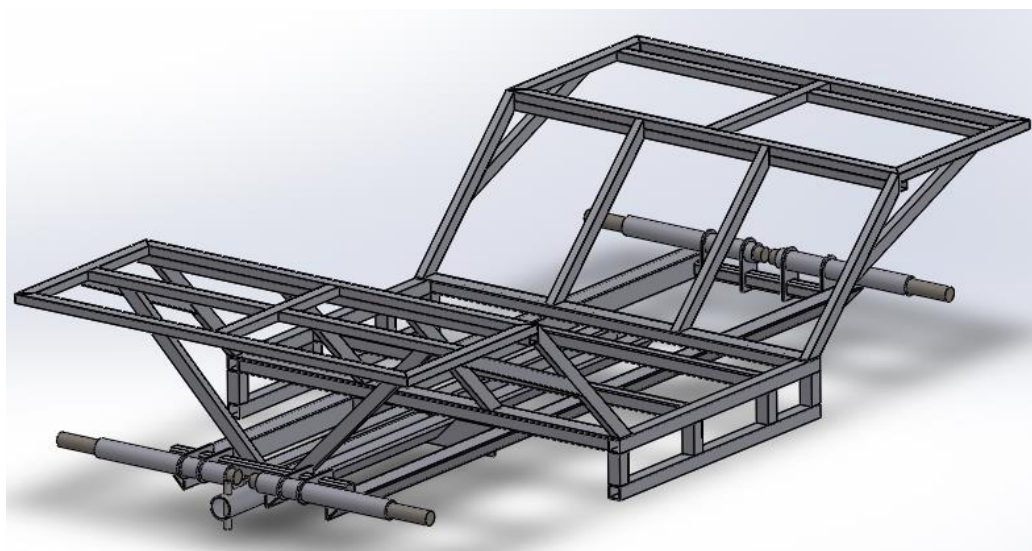
Chassis tubulares tem uma construção trabalhosa e em grande parte são produzidos a mão. Nas Figuras 8 e 9, a seguir, pode-se observar uma estrutura de chassi do tipo tubular com perfil de tubo circular, de um protótipo baja SAE construído pela equipe TEC Ilha Baja na UNESP de Ilha Solteira e o chassi de um ciclo-riquixá projetado com tubos de perfis retangulares, triangulares e circulares.

Figura 8 - Chassi tubular de seção circular.



Fonte: Equipe TEC Ilha Baja, 2021.

Figura 9 - Chassi tubular do ciclo riquixá estudado neste trabalho.



Fonte: Próprio autor.

A estrutura apresentada na Figura 9 foi modelada com a adaptação do modelo de ciclo-riquixá já construído na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (Carruagem da alegria), para o modelo de chassi tubular. Logo, esta estrutura de chassi tubular será o alvo de estudo desse trabalho.

2.2.4 Chassi monobloco

Esta categoria de chassi é a mais utilizada atualmente em veículos de passeio, sendo composta por uma estrutura formada por um único sólido que define a forma final do carro. Também conhecido como chassi monocoque, normalmente tem como matéria prima folhas de aço, alumínio ou fibra de carbono. Entretanto, os chassis monoblocos de fibra de carbono são mais utilizados nos carros de competição, como é o caso da Fórmula 1, devido à alta resistência e rigidez, além de serem extremamente leves (QUEIROZ, 2018).

Como descrito por Oliveira (2007), a fabricação desse tipo de chassi requer altos custos ferramentais, com moldes e máquinas e são destinados à produção de veículos em grande escala. Logo, a grande maioria dos carros de produção atuais utilizam esse tipo de estrutura, visto que além de ser voltado à produção de grandes volumes de unidades com facilidade de implementação de uma construção robotizada, a categoria possui alta resistência a impactos. A seguir, na Figura 10, é possível observar um chassi monobloco.

Figura 10 - Chassi monobloco.



Fonte: QUEIROZ, 2018.

2.2.5 Chassi combinado

A categoria de chassi combinado, como o nome sugere, é formada pela união de outros dois tipos dentre os já citados anteriormente. Como combinação do chassi monobloco e o chassi tubular, a célula do piloto é constituída por um bloco único e o restante da estrutura formada por tubos. Dessa forma, é capaz de reunir os pontos

positivos dos dois tipos de estruturas com um custo menor que o monobloco. A Figura 11 traz um exemplo de chassi combinado.

Figura 11 - Chassi combinado.



Fonte: CANUT, 2014.

2.3. FIBRA DE CARBONO

As fibras de carbono têm grandes aplicações industriais e são utilizadas frequentemente em veículos de alto desempenho e aeronaves, principalmente pela boa razão resistência/massa. Esse material é constituído de filamentos compostos por mais de 90% de carbono que possuem entre 5 e 15 micrômetros de diâmetro. Além de possuir elevada rigidez, as fibras de carbono possuem múltiplas características físicas e mecânicas (LEBRÃO, 2008).

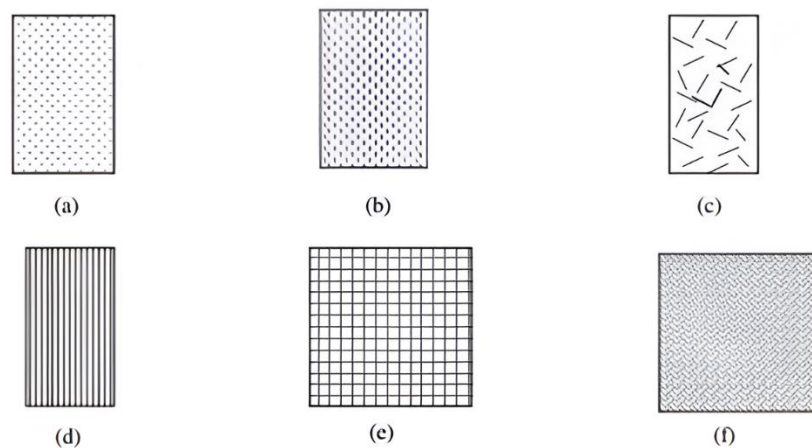
Como características principais, é interessante ressaltar a elevada resistência mecânica, tanto a tração, como também a torção e compressão, além de um elevado módulo de elasticidade, alta resistência a temperatura (alto ponto de fusão), boa tolerância à corrosão e desgaste. Como citado previamente, a razão resistência/massa da fibra de carbono é extremamente elevada, o que se deve ao fato desses compostos possuírem baixa densidade. Aliados à resistência à temperatura, o baixo coeficiente de expansão térmica e a alta condutividade agregam excelentes características ao comportamento do material sob calor (LEBRÃO, 2008).

Outros pontos que devem ser considerados quando se tem interesse em usar a fibra de carbono são o custo, processo de fabricação, a configuração do material fabricado e aplicação. O alto custo para obtenção do material faz com que o produto tenha um alto preço para venda. Dentre os processos desenvolvidos durante sua

história, o mais eficiente e utilizado até hoje na produção comercial utiliza o polímero poliacrilonitrila (PAN), material sintético de propriedades controladas que proporciona uma qualidade consistente a fibra. Além do PAN, utiliza-se também o Pitch, material orgânico, que pode ser preferencial quando o custo é um fator principal no projeto. Entretanto, é imprescindível que seja analisada a configuração do material para cada aplicação, pois dependendo da configuração empregada pode ser altamente anisotrópico.

Materiais compósitos, como a fibra de carbono, são interessantes pela ação combinada dos materiais que o constituem, promovendo uma sinergia das propriedades mecânicas. Os compósitos são misturas de duas ou mais fases, sendo uma delas a matriz e a outra a fase dispersa, chamada também de reforços. A primeira protege os reforços e distribui a carga aplicada a ela para eles, já a segunda, de forma simplificada, garante maior resistência ao conjunto. A Figura 12, a seguir, apresenta os diferentes tipos de reforços existentes (OLIVEIRA et al., 2020).

Figura 12 – Tipos de reforços para materiais compósitos.



Fonte: (OLIVEIRA et al., 2020).

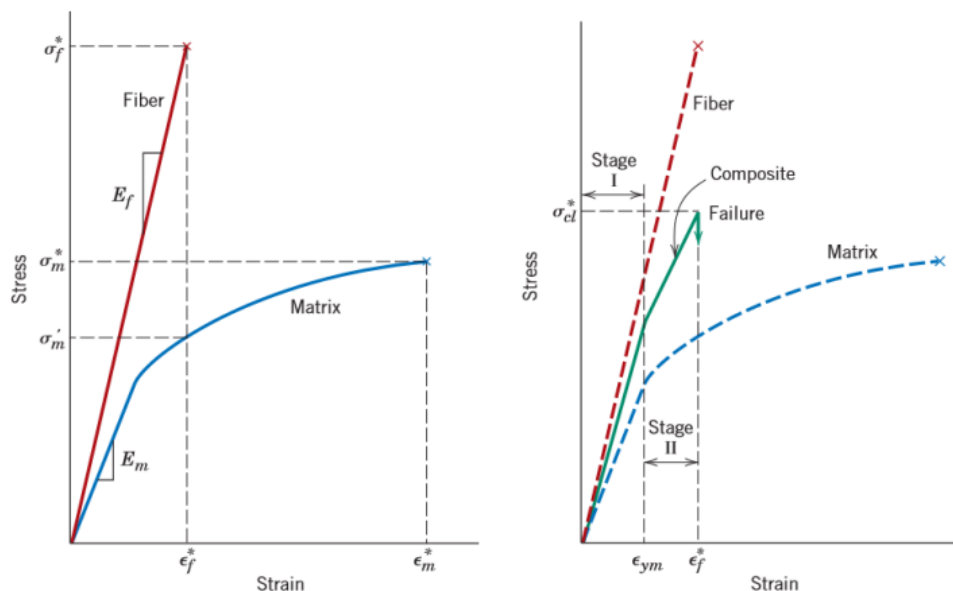
Em que: (a) partículas aleatórias; (b) fibras descontínuas unidirecionais; (c) fibras descontínuas aleatórias; (d) fibras contínuas unidirecionais; (e) fibras contínuas "crossply" e (f) fibras contínuas multidirecionais.

Desse modo, o ângulo de orientação da fibra de cada lâmina do material e a sequência das lâminas são determinantes para cada projeto, levando em conta os requisitos de carga e geometria. Fibras de carbono em camadas multidirecionais,

diferentemente de um laminado unidirecional, são capazes de obter boas propriedades em ambas as direções ortogonais, com maior resistência ao impacto e uma isotropia relativamente alta. Já as fibras unidirecionais, como possuem as fibras orientadas numa única direção de forma ordenada e paralela, conferem boa resistência e rigidez apenas em uma direção, com alta anisotropia.

Como ilustração do comportamento de um material compósito submetido a carga, o esquema da curva tensão x deformação para fibras contínuas alinhadas com carregamento longitudinal está representado na Figura13.

Figura 13 – Curva tensão deformação para fibras contínuas alinhadas com carregamento longitudinal.



Fonte: USP, 2017.

Onde:

(σ_f^*) Tensão de ruptura da fibra;

(σ_m^*) Tensão de ruptura da matriz;

(σ_m') Tensão na matriz na ruptura da fibra;

(σ_{cl}^*) Tensão de ruptura do compósito;

(ϵ_f^*) Deformação total da fibra e do compósito;

(ϵ_m^*) Deformação total da matriz;

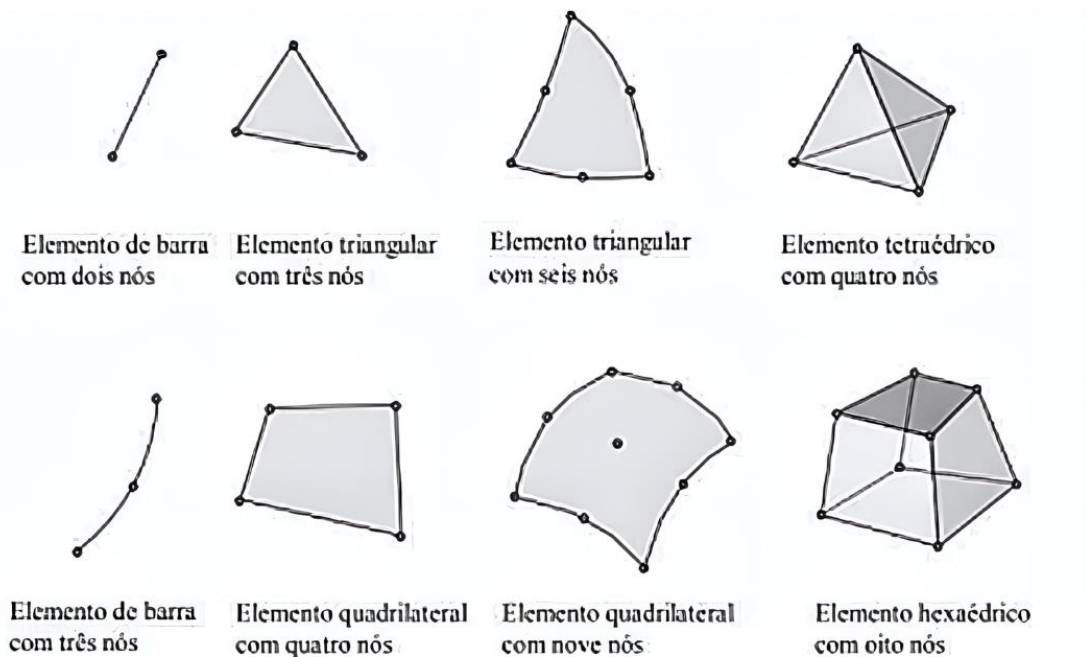
(ϵ_{lm}^*) Início da deformação plástica da matriz (limite de escoamento) longitudinal.

Dado o exposto, no estágio 1, a fibra e a matriz deformam elasticamente e no estágio 2, apenas a matriz entra em regime de deformação plástica. Ao atingir ϵ_f^* , as fibras começam a fraturar, mas o compósito não apresenta falha catastrófica. O limite de tração longitudinal da fibra de carbono de módulo padrão pode atingir 3550 MPa.

2.4. ELEMENTOS FINITOS

O Método dos elementos finitos (MEF) é amplamente utilizado na resolução de problemas de engenharia, sendo considerado por alguns autores, o mais utilizado para representar o comportamento e a discretização de meios contínuos. Conforme citado, o método é baseado no conceito de discretização do domínio contínuo, (sólido, líquido ou gasoso) em pequenos elementos interligados por pontos denominados nós ou pontos nodais. Dessa forma, um problema complexo pode ser transformado na soma de vários problemas mais simples, que são resolvidos através de interpolações. Por conseguinte, o tamanho dos elementos influencia nos resultados que serão obtidos e quanto menor este for, mais próximo do real é o resultado (TEZA, 2022). Como apresenta Souza (2003), na Figura 14, pode-se ver alguns tipos de geometrias de elementos finitos.

Figura 14 - Tipos de elementos finitos.



Fonte: SOUZA, 2003.

Mesmo com a aplicação desse método, a complexidade dos cálculos envolvidos na solução de problemas é elevada, fazendo-se necessário a utilização de softwares de elementos finitos para realizar a grande quantidade de cálculos e convergir os resultados. Devido ao fato de grande parte dos problemas que podem surgir para análise serem sobre geometrias irregulares, ao discretizar essa região de domínio irregular gerando uma malha com elementos finitos, o domínio passa a ter finitos graus de liberdade. Como uma malha mais refinada (dividida em mais elementos finitos) demanda maior capacidade e tempo computacional, para otimização do processo é importante analisar o efeito do refinamento sobre o resultado obtido. Assim, para a obtenção de um resultado preciso deve-se refinar a malha até o momento em que o resultado não altere mais de um refinamento para outro ou até que a diferença entre os resultados obtidos passe a ser insignificante (TEZA, 2022). Logo, como apresentado por RAO (2004), para determinar a solução de problemas contínuos pelo método de elementos finitos, pode-se seguir o seguinte procedimento:

Primeiramente, tem-se a etapa de pré-processamento, a qual engloba todo o processo de definição do modelo geométrico, propriedades do material utilizado no modelo estudado, geração de malha e definição das condições de contorno. Por ser uma etapa trabalhosa, é o passo que exige mais tempo para sua execução.

A segunda etapa é o processamento. Esta etapa intermediária, consiste na aplicação das equações diferenciais na malha gerada. Aqui, os resultados são obtidos.

Na etapa 3, o pós-processamento, são feitas análises criteriosas dos resultados obtidos na etapa de processamento. Para cada tipo de problema analisado observa-se a coerência dos dados e o comportamento do objeto de estudo em cada ponto de interesse.

Dado o exposto, o método dos elementos finitos é uma ferramenta fundamental e indispensável atualmente nos projetos de engenharia. Essa ferramenta viabiliza o estudo, análise e desenvolvimento de projetos complexos e de elevado custo sem a necessidade de construção prévia de um protótipo, visto que a aplicação do método de elementos finitos permite simular o comportamento de estruturas. Dessa forma, vale ressaltar o quão imprescindível passou a ser para a otimização de tempo e custo no desenvolvimento de projetos.

2.4.1 Softwares de modelagem e simulação

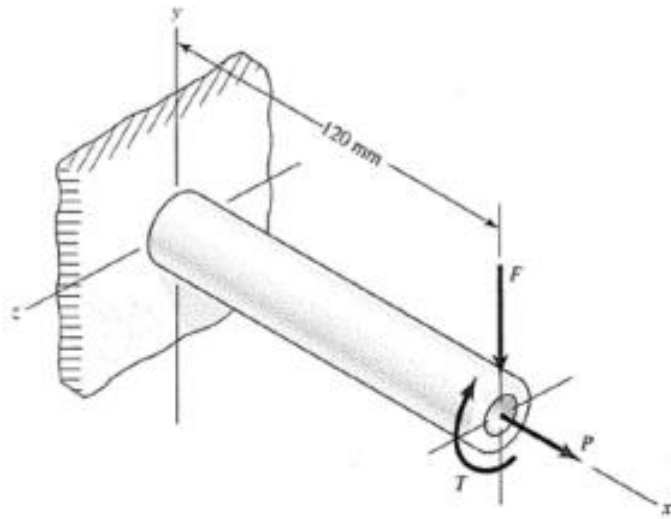
Neste trabalho o software utilizado para modelar a estrutura estudada foi o Solidworks. Este é um poderoso software de modelagem 3D que, a partir de geometrias básicas cria formas tridimensionais através de computação paramétrica. Além de possuir ferramentas capazes de fazer análises pelo método de elementos finitos, permite que os modelos sejam exportados para serem analisados por esse mesmo método em outros programas. Para o estudo do chassi do ciclo riquixá foi adotado o Ansys para a realização das simulações.

2.5. ANÁLISE ESTÁTICA

A análise estática linear é realizada em um chassi para testar diferentes condições de carga com o objetivo de obter as tensões e deformações resultantes nos elementos da estrutura. Com o conhecimento do comportamento do chassi sob a aplicação de diferentes condições e magnitudes de carga, é possível que projetistas melhorem os projetos antes da construção do protótipo. Ademais, esse tipo de análise serve como base para outros tipos de estudos, uma vez que permite que muitos problemas sejam identificados antes do gasto de mais tempo e recursos em análises mais complexas e trabalhosas (NOORBHASHA, 2010).

Conforme Bernardes (2015), pode-se definir como carga estática, uma carga estacionária que pode ser uma força ou momento nos quais não variam em função do tempo, o ponto de aplicação ou sua magnitude. Esses carregamentos podem gerar diversos tipos de esforços como compressão, tração, torção, flexão ou uma combinação delas. Logo, a análise estática de estruturas é realizada submetendo a estrutura a carregamentos arbitrários, desprezando-se os efeitos das forças de inércias e amortecimento. Desse modo, é possível quantificar a magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos correspondentes na estrutura. Na Figura 15 é exemplificado um carregamento estático com esforços de tração, torção e flexão.

Figura 15 - Exemplificação de um carregamento estático.



Fonte: SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005.

Após o cálculo da magnitude dos esforços internos, aplica-se o critério de falha estrutural por deformação elástica. Para satisfazer esse critério, é necessário que esteja dentro da relação linear que rege o estado de deformação elástica na curva de tensão x deformação característica da matéria prima empregada no projeto. Segundo Bernardes (2015), um modelo falhar por carga elástica, quer dizer que a tensão de escoamento foi ultrapassada, entrando na zona plástica da curva citada.

Autores como Happian-Smith (2002), consideram que na pior condição de carga estática, a tensão não deverá exceder 67% da tensão de escoamento do material, portanto o coeficiente de segurança mínimo aceito é de 1,5. Ao obedecer a este requisito, a estrutura passou na condição de integridade. Já se a estrutura sofrer pequenos deslocamentos, significa que ela passou na condição de rigidez. Idealmente, a estrutura deve obedecer às duas condições citadas.

3 METODOLOGIA

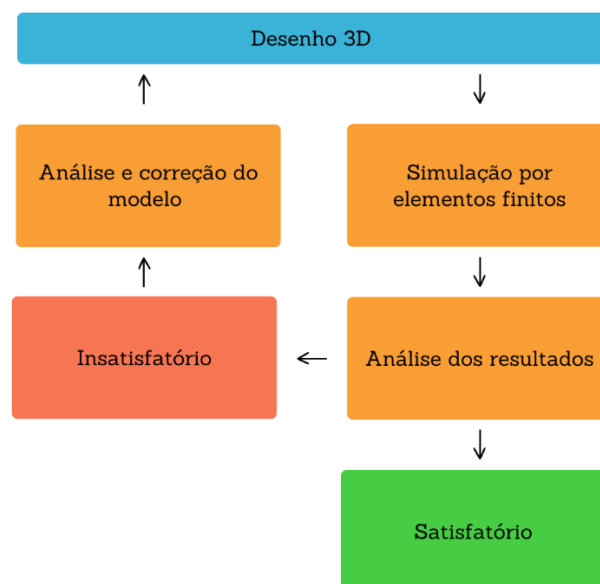
Neste trabalho, a construção do modelo 3D e as adaptações da estrutura para garantia de resultados precisos na simulação por elementos finitos foi realizada utilizando o software Solidworks. As simulações foram realizadas utilizando o Software Ansys Workbench Academic Student 2024 R1, uma versão estudantil do software de elementos finitos largamente aplicável em diversos problemas de engenharia. A metodologia empregada na execução da análise estática da estrutura dentro do software Ansys e para obtenção de um modelo com garantia de resultados confiáveis está ilustrada nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Metodologia empregada em uma análise estática.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Metodologia para definição de modelo simplificado confiável.



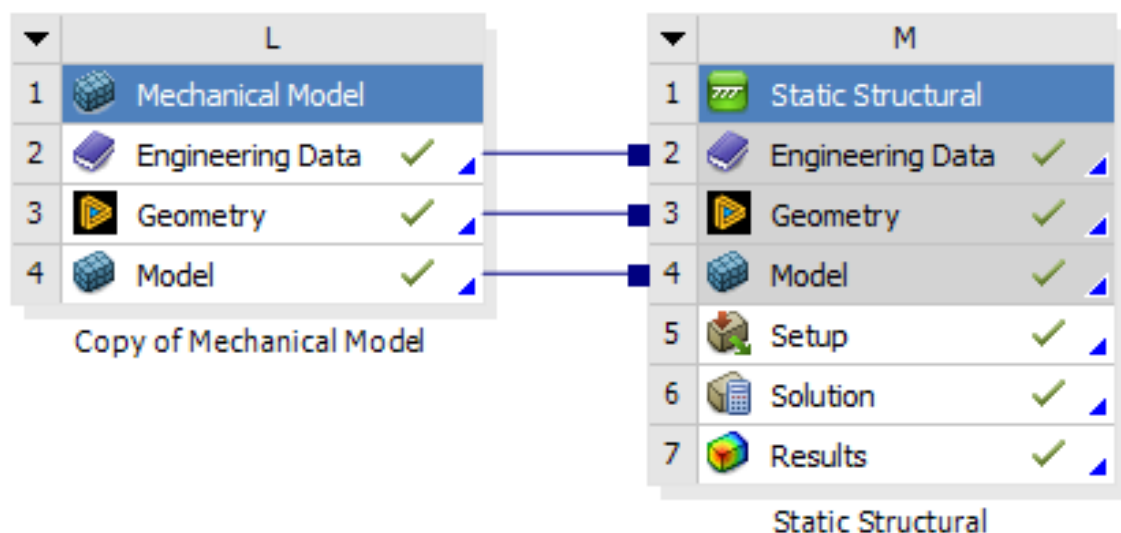
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o desenho 3D finalizado, é possível aplicar a metodologia descrita na Figura 16. Assim, é possível importar o desenho do software Solidworks® para o software Ansys® e realizar os passos de pré-processamento descritos nos itens 2 a 5. Estes passos serão melhor explicados posteriormente utilizando a própria interface do software.

Conforme apresentado na Figura 17, pode-se observar um fluxograma que descreve a metodologia para garantia de um modelo simplificado que seja possível extrair resultados confiáveis para estudo. Desse modo, o primeiro passo é a obtenção do desenho 3D e, em seguida, são realizadas as simulações pelo método dos elementos finitos. Após obter os resultados, esses são analisados para verificação da existência de alguma incoerência nos dados obtidos ou pontos de melhoria no modelo ou malha utilizados. Assim, obtendo uma resposta insatisfatória nesses quesitos, é feita a análise e correção do modelo, o que retorna para a etapa de desenho 3D. Esse ciclo é repetido até a obtenção de resultados satisfatórios.

Na Figura 18, a seguir, está indicado o padrão de simulação para uma análise estática indicado dentro do Ansys workbench. Neste trabalho, optou-se por adicionar inicialmente as propriedades em um Modelo Raiz para que fosse possível realizar diferentes análises sobre um mesmo modelo e houvesse maior praticidade ao realizar alterações na geometria e parâmetros principais do modelo.

Figura 18 – Estrutura padrão de análise estática no Ansys Workbench Academic Student 2024 R1.



Fonte: Próprio autor.

Como apresentado na figura acima indicado na linha número 1, a “caixa L”, representa o modelo mecânico raiz que é abastecido com parâmetros principais da estrutura e material. Nesta estrutura organizacional da simulação, adotada para maior praticidade, a linha 2, *Engineering Data* (Informações de engenharia), corresponde ao campo onde são selecionados os materiais do modelo analisado. Dessa forma, intrínseco a cada material estão os parâmetros mecânicos básicos, como densidade, tensão de escoamento, tensão máxima de cisalhamento, modulo de Young, coeficiente de Poisson, entre outros. A biblioteca do software já oferece um grande número de materiais com parâmetros validados, contudo, é possível criar novos materiais e abastecê-los com as informações coerentes e mais precisas para o estudo desejado.

O item 3, Geometry (Geometria), é o campo no qual é inserida a geometria que será alvo de estudo da simulação. Pode-se criar uma nova no próprio software ou importar de outro software um modelo 3D pronto. Já o item 4, Model (modelo), é o campo onde se define os parâmetros de malha.

Na sequência dos itens apresentados na Figura 18, a “caixa M” possui a configuração para adição de novas informações voltadas à análise que será realizada. Assim, no item 1, static structural (estrutura estática), está indicado qual análise será realizada. Os itens 2, 3 e 4 são importados do modelo raiz, já definido previamente. Já o item 5, Setup (configurar), é o campo onde são definidas as condições de contorno no modelo e esforços que a estrutura é submetida. No item 6, Solution (Solução) indica-se quais informações deseja-se obter como resultado da análise, como por exemplo, tensão de Von Misses e deformação. Além disso, no item Solution, após a especificação dos estudos desejados, dá-se início a simulação. Por fim, no item 7, Results (resultados), são apresentados os resultados dos estudos e as mensagens informativas sobre possíveis erros da geometria, que influenciam nos resultados ou até mesmo impossibilitam a resolução da simulação.

A seguir serão detalhados os desenvolvimentos de cada um dos passos citados.

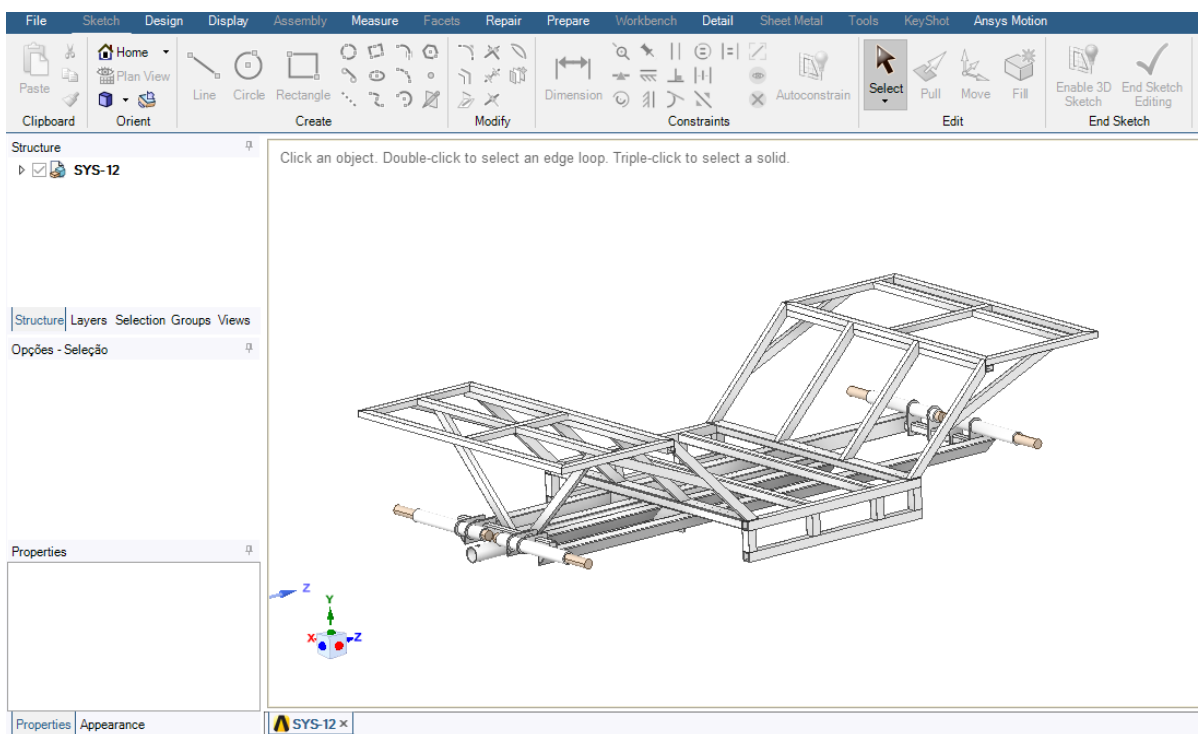
3.1. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

Primeiramente, para a realização da análise estática, é imprescindível que se tenha o modelo CAD do chassi da Carruagem dentro do software Ansys®. Assim,

importou-se a estrutura do chassi previamente modelada no software Solidworks®. Nesse modelo, a estrutura foi desenhada com base na carruagem da alegria, tendo componentes internos como chapas em L alterados para tubos de perfis retangular ou triangular de dimensões similares, de modo que o projeto ficasse mais condizente com uma possível estrutura tubular fabricada de tubos fibra de carbono.

Nesse trabalho, por questão de preferência, a importação foi realizada para o ambiente SpaceClaim™ no Ansys®. Neste ambiente foram seccionadas as áreas para aplicação de força posteriormente no ambiente de simulação. O modelo da estrutura da carruagem em fibra de carbono com os eixos de roda montados, importado no ambiente SpaceClaim™ pode ser observado na Figura 19.

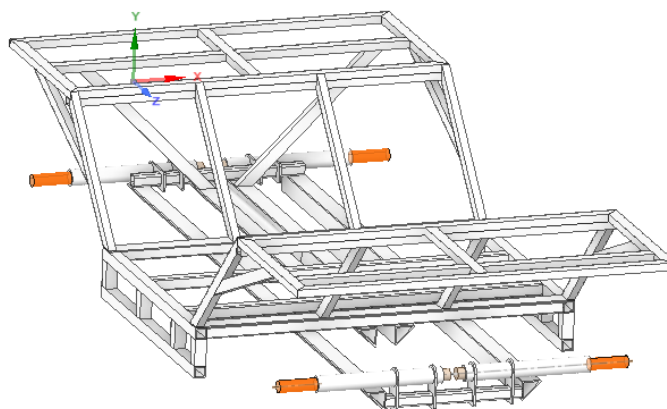
Figura 19 – Modelo de estrutura no ambiente SpaceClaim™ do Ansys® Student.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 20, a seguir, estão destacadas em laranja as áreas delimitadas no espaço SpaceClaim™ para receber os esforços transmitidos das rodas para a estrutura.

Figura 20 – Indicação das secções de contato dos eixos com as rodas no ambiente SpaceClaim™.



Fonte: Próprio autor.

3.2. DEFINIÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para a definição dos materiais utilizados, utilizou-se o recurso Engineering Data para selecionar os materiais disponíveis na biblioteca do software. Como o intuito deste trabalho é estabelecer um comparativo entre estruturas de aço e fibra de carbono, as simulações foram realizadas com as propriedades mecânicas correspondentes de cada material. As propriedades mecânicas extraídas da biblioteca do Ansys® estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos materiais utilizados.

Propriedades Mecânicas	Material		
		Aço estrutural	Compósito de fibra de carbono
Densidade (Kg/m ³)		7850	1800
Módulo de Young (Pa)	X		$2,9 \times 10^{11}$ (1)
	Y	$2,0 \times 10^{11}$	$2,3 \times 10^{10}$ (2)
	Z		$2,3 \times 10^{10}$ (3)
	XY		0,2 (4)
Coeficiente de Poisson	YZ	0,3	0,4 (5)
	XZ		0,2 (6)

	XY		9×10^9	(7)
Módulo de cisalhamento (Pa)	YZ	$7,6923 \times 10^{10}$	$8,2143 \times 10^9$	(8)
	XZ		9×10^9	(9)

Fonte: Ansys.

Nota:

(1): Módulo de Young na direção X

(2): Módulo de Young na direção Y

(3): Módulo de Young na direção Z

(4): Coeficiente de Poisson XY

(5): Coeficiente de Poisson YZ

(6): Coeficiente de Poisson XZ

(7): Módulo de cisalhamento XY

(8): Módulo de cisalhamento YZ

(9): Módulo de cisalhamento XZ

3.3. DEFINIÇÃO DO SETUP

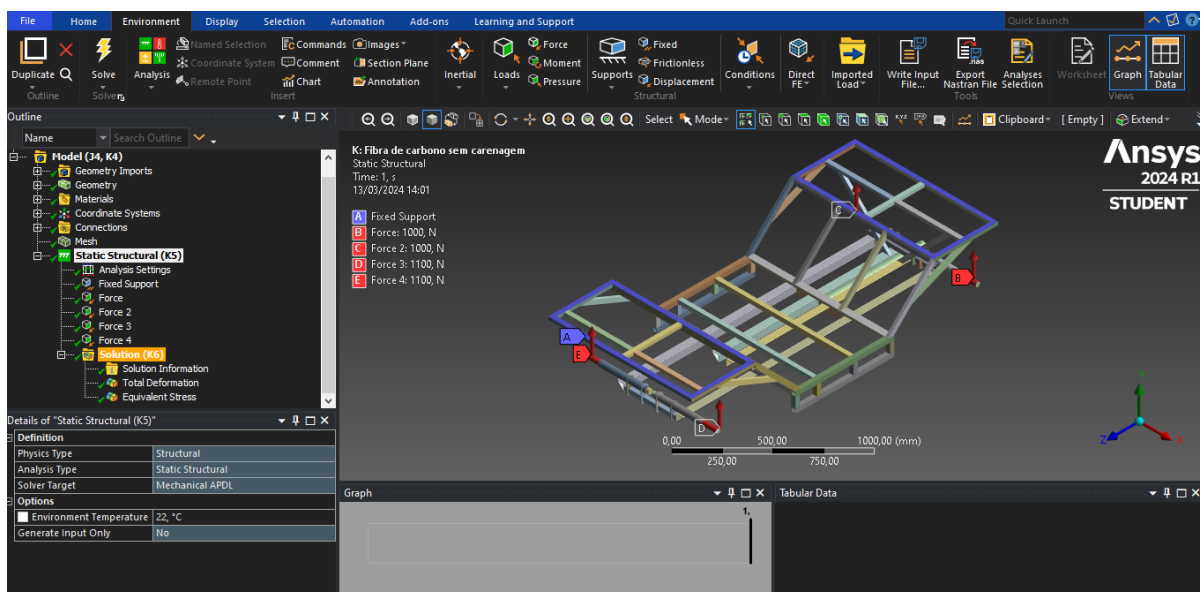
Ao selecionar o item “Setup” da árvore de estrutura da análise estática, o ambiente “Mechanical” é aberto. Nessa interface que são adicionadas as condições de contorno desejadas para a realização da simulação. Assim, para cada uma das análises foram selecionados estrategicamente os tubos da estrutura que seriam pontos de fixação e os pontos de entrada de força. A magnitude da força aplicada em cada ponto variou com o número de passageiros considerado (0 a 4 passageiros de 75 kg cada) e o efeito da distribuição de massa dos passageiros considerando as diferentes configurações que eles podem se sentar nos 4 assentos.

Para a definição das forças nas rodas, com o modelo 3D simplificado finalizado no software Solidworks®, utilizou-se a ferramenta de avaliação de propriedades de massa para determinação da localização espacial do centro de massa da estrutura sem passageiros e com passageiros (0 a 4 passageiros sentados em diferentes configurações). Com base na posição do centro de massa fez-se uma análise de forças e momentos para estabelecer a carga em cada um dos pneus. Por fim, tendo em vista a secção do pneu em contato com o eixo de roda, aplicou-se a força distribuída em cada um dos eixos de roda, como foi apresentado na Figura 20.

Já para a força aplicada nos assentos, considerou-se uma massa de 75 Kg para cada passageiro, aplicando uma força com o módulo equivalente ao peso da pessoa, distribuída sobre a superfície da placa de apoio que o fixa o assento na estrutura.

Para ilustrar melhor, na Figura 19 é apresentado o ambiente “Mechanical” já com a estrutura do Ciclo riquixá e as condições de contorno selecionadas. Nesse caso, o estudo realizado foi de flexão da estrutura, com os pontos de fixação na superfície dos tubos que são base para os assentos, como destacado na cor roxa. As entradas de força estão nas regiões destacadas em vermelho, com direção para cima no eixo Y, como indicado pela seta e magnitudes condizentes com a distribuição de carga em cada roda.

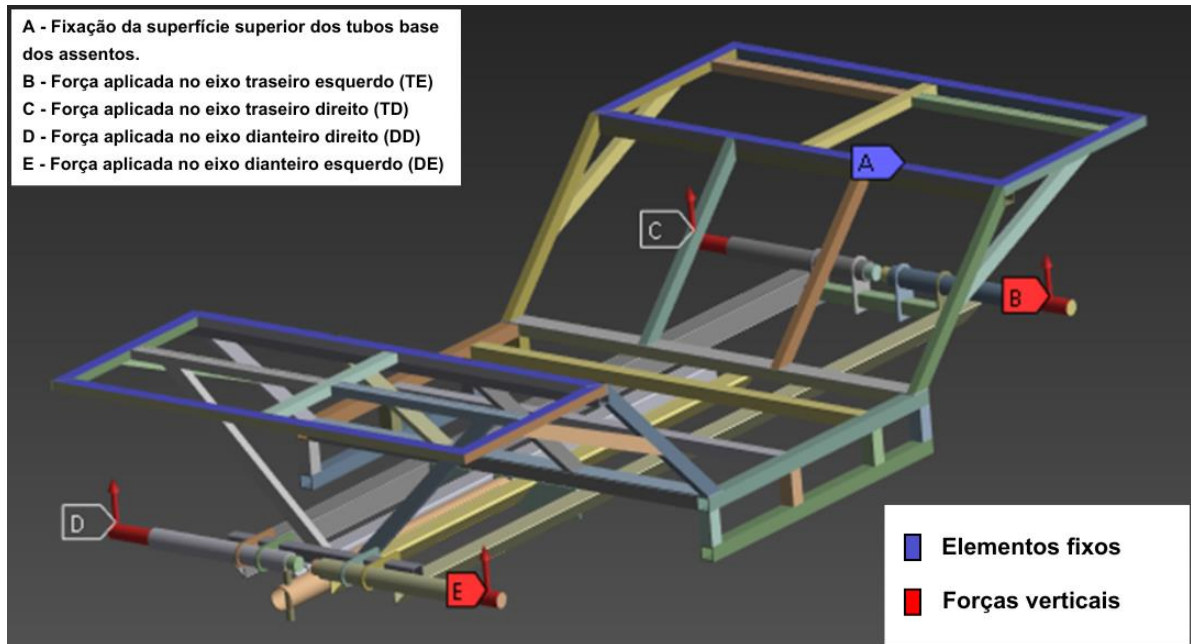
Figura 21 – Ambiente Mechanical do Ansys, com estrutura e condições de contorno expostas.



Fonte: Próprio autor.

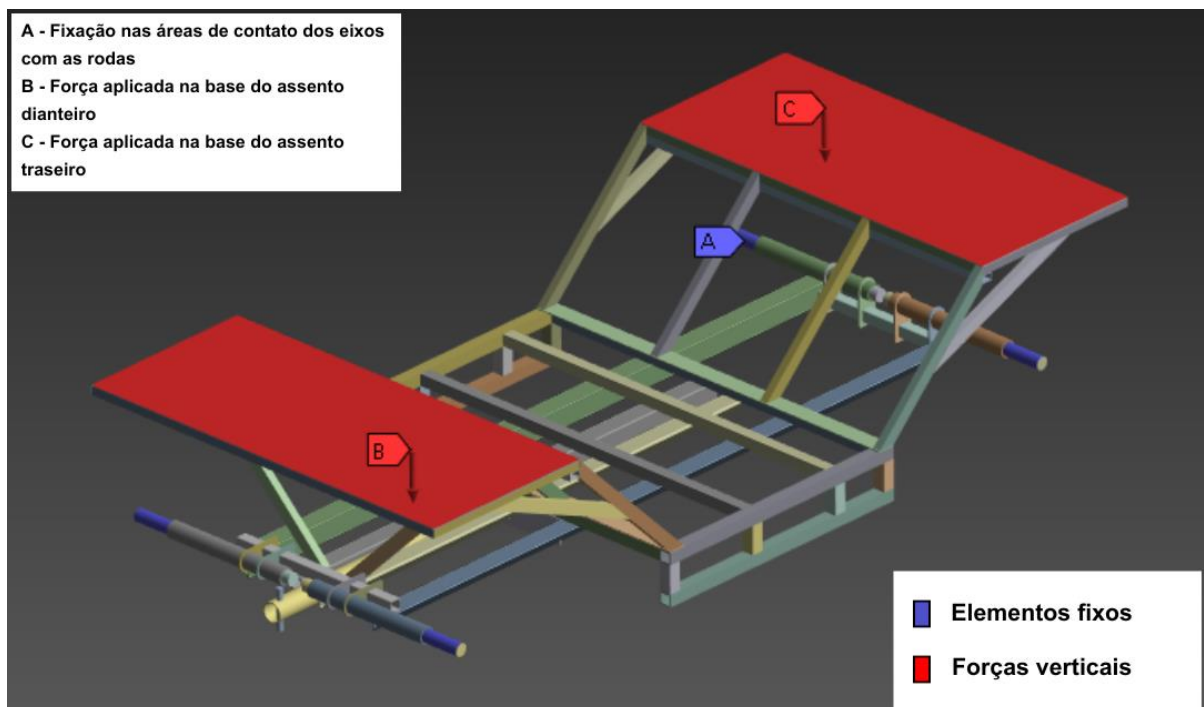
Ademais, na etapa de Setup, são selecionados os tipos de resultados que são desejados no estudo. Por exemplo, como destacado em laranja na árvore de simulação presente na Figura 21, as variáveis de interesse do estudo foram tensão (von-misses) e deformação. As Figuras 22 e 23, a seguir, apresentam as condições de contorno adotadas nas simulações presentes nesse trabalho.

Figura 22 – Condições de contorno para o estudo 1 (forças aplicadas nos eixos).



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Condições de contorno para o estudo 2 (forças aplicadas nos assentos).



Fonte: Próprio autor.

Como indicado na Figura 22, nota-se que as superfícies superiores dos tubos dos assentos, indicados em azul, estão fixos no espaço, com restrição dos seus graus de liberdade de translação e rotação nas direções X, Y e Z. Os elementos destacados

em vermelho estão sob a aplicação de forças verticais com magnitudes condizentes com as forças de entrada em cada roda para os diferentes casos estudados. A direção e o sentido das forças estão representados pelas setas vermelhas.

Já na Figura 23, a área superficial dos eixos que ficam em contato com as rodas, indicadas em azul, estão fixas no espaço, com restrição dos seus graus de liberdade de translação e rotação nas direções X, Y e Z. Já as superfícies superiores das bases dos assentos, destacadas em vermelho, estão sob a aplicação de forças verticais com magnitudes condizentes com o peso estimado dos passageiros (75 Kg cada) e o número de passageiros por assento. A direção e o sentido das forças estão representados pelas setas vermelhas.

3.4. DEFINIÇÃO DA MALHA.

Como neste trabalho foi utilizada a versão estudantil e gratuita do software Ansys, existem limitações quanto a capacidade computacional de processamento. Dessa forma, análises de estruturas muito complexas e com um nível de refinamento alto não são processadas pelo programa. Assim, o critério utilizado para a definição da malha em cada uma das simulações foi a adoção da malha mais refinada o possível para a estrutura em questão que o software conseguisse calcular os resultados.

O método utilizado para a identificação da malha foi inicialmente por testes com uma estimativa inicial 0,08 m de distância entre nós e reduzindo 0,005 m até que o software fosse incapaz de entregar soluções. A estimativa inicial foi adotada com base na experiência com o software durante testes prévios e o valor final adotado para o refinamento da malha foi o diretamente anterior a incapacidade do programa de gerar soluções segundo o método descrito.

Os parâmetros finais da malha selecionada estão descritos na Tabela 2, a seguir.

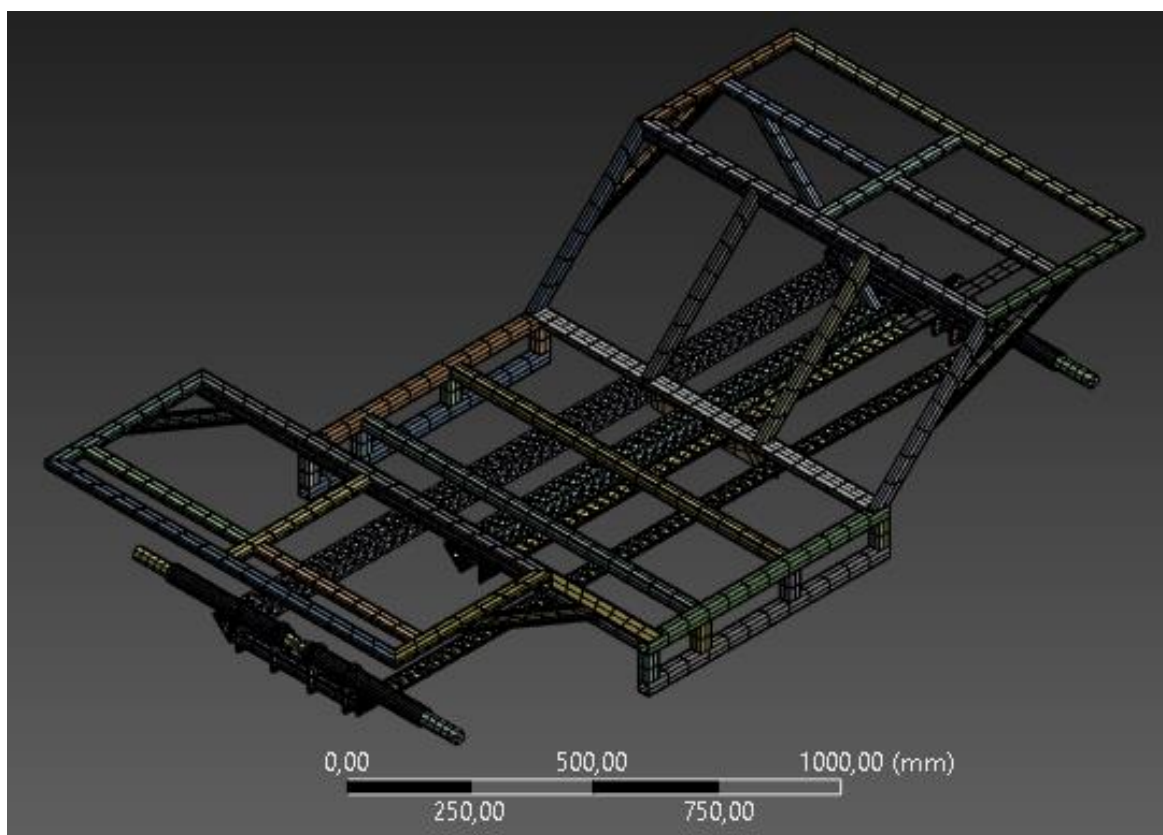
Tabela 2 - Parâmetros da malha utilizada.

Número de nós	118683
Número de elementos	37257
Tamanho dos elementos	0,06 m
Limite diagonal	2407,7 mm
Área de superfície média	9430,5 mm ²

Fonte: Próprio autor.

A Figura 24 exibe a estrutura com a aplicação da malha descrita na tabela anterior. É possível observar elementos do tipo quadrilateral nos tubos de seções quadrada, retangular e circular e elementos do tipo triangular nos tubos de perfil triangular.

Figura 24 – Malha utilizada nas simulações estruturais do ciclo-riquixá.



Fonte: Próprio autor.

Após a análise dos resultados e identificação de incoerências pontuais oriundas da geometria da malha, esta foi refinada ao máximo nos elementos que apresentaram inconsistências.

3.5. SOLUÇÃO.

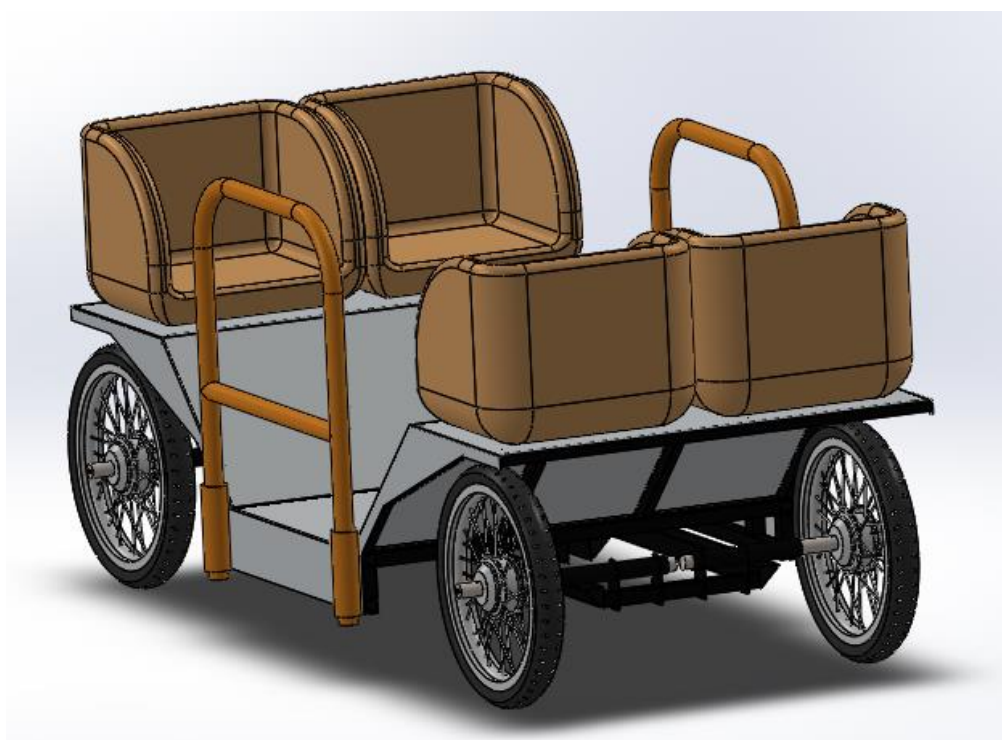
A partir do momento que as etapas anteriores estão cumpridas, pode-se iniciar a solução do problema. Assim, o software resolve o problema proposto e retorna as informações desejadas, além de mensagens de aviso ou erro. Como no exemplo citado, a solução retornada foram os valores de tensão equivalente de Von- Mises e valores de deformação principal. Logo, é possível analisar cada ponto da estrutura e, através da animação que o software traz, compreender melhor os efeitos das condições aplicadas.

4 RESULTADOS

4.1. MODELO DA ESTRUTURA.

Para a realização da análise estática do ciclo riquixá, o proposto para este trabalho foi basear-se na estrutura já existente do ciclo-riquixá denominado carruagem da alegria, construído no campus de Ilha Solteira da UNESP. Assim, com o intuito de trabalhar com uma estrutura tubular de fibra de carbono, adaptações iniciais foram feitas no modelo. Além disso, a carruagem original possui apenas rodas traseiras e um engate na dianteira, o que não foi mantido no modelo atual. Como será apresentado na Figura 25. O modelo proposto possui 4 rodas, sendo duas dianteiras e duas traseiras.

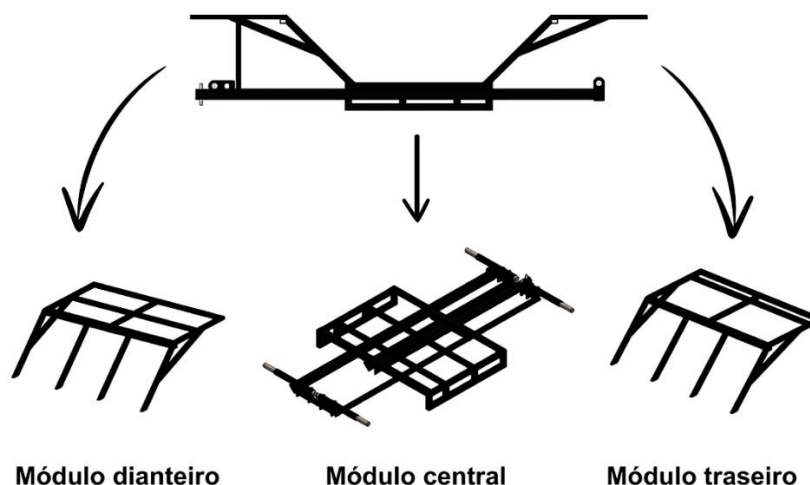
Figura 25 – Ciclo riquixá em estrutura de fibra de carbono.



Fonte: Próprio autor

Como forma organizacional no software Solidworks®, preferiu-se dividir a montagem da estrutura da carruagem em 3 grupos principais. Estes são: Módulo central; Módulo traseiro; Módulo dianteiro. A vista lateral da estrutura, assim como as subdivisões mencionadas estão expostas na Figura 26.

Figura 26 – Subdivisões da estrutura no Solidworks.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale destacar que essa subdivisão foi realizada apenas por preferência na organização do projeto, não influenciando nos resultados obtidos. Nota-se que no nível de montagem principal da carruagem finalizada, o módulo central é o corpo base que recebe as demais submontagens da estrutura.

Com o modelo simplificado completo da estrutura foi possível fazer uma estimativa de distribuição de massa mais próxima do real. Para isso, foi adicionado o material com suas respectivas propriedades mecânicas para cada componente. Para o cálculo do centro de massa da estrutura, a propriedade mais importante a ser inserida corretamente no software após a modelagem dos itens é a massa específica de cada material. Nesse estudo foram utilizadas as propriedades disponíveis na biblioteca de materiais do Solidworks. Os materiais utilizados, os locais de uso e suas massas específicas estão na Tabela 3.

Tabela 3 – Massa específica dos materiais utilizados.

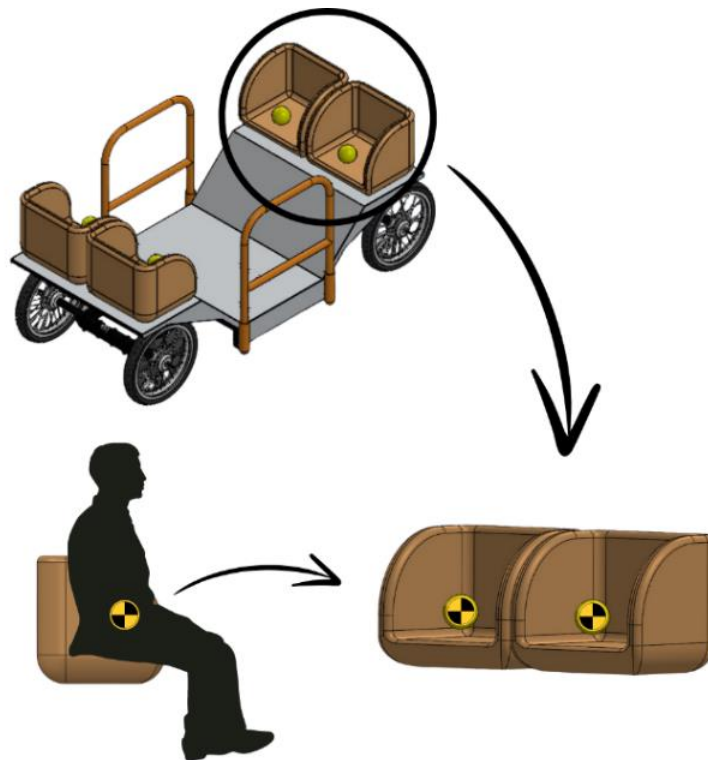
Material	Local de uso	Massa específica (Kg/m³)
Compósito de fibra de carbono	Estrutura	1800,0
Aço estrutural	Estrutura	7850
Alumínio liga 1060	Carenagem	2700
Aço inoxidável	Apoios laterais	7700
Madeira balsa	Assentos	160,0

Fonte: SolidWorks.

Visto que as montagens cujo modelo 3D foi importado de um arquivo pronto no formato “.step” (rodas) e não permitem que seja atribuído materiais diferentes para seus componentes internos, foi adotada a massa aproximada de 3,6 kg para cada conjunto roda. Desse modo, pela simetria do conjunto, o centro de massa manteve-se centralizado, contudo, com a massa correta atribuída a montagem.

Para a definição do centro de massa da estrutura com a adição da massa dos passageiros foi importante ter a possibilidade de adicionar ou remover de qualquer um dos passageiros dos 4 assentos individualmente. Para isso, a massa dos passageiros (75Kg cada) foi atribuída ao centro de massa de esferas amarelas e estas posicionados no ponto aproximado dos centros de massa de cada passageiro caso estivesse sentado nos assentos. A Figura 27 apresenta os pontos adotados.

Figura 27 – Distribuição de massa dos passageiros.

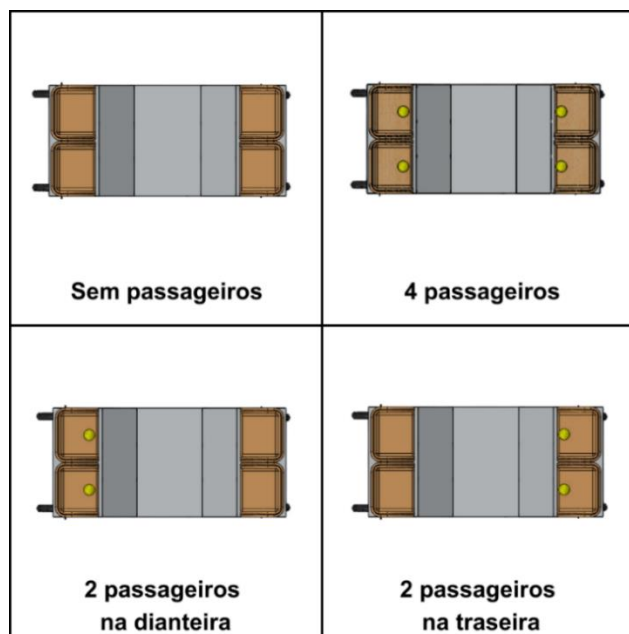


Fonte: Próprio autor.

Desse modo, com a finalização da preparação do modelo e através das ferramentas de análise de massa do Solidworks®, obteve-se a posição do centro de massa para cada condição estudada. As diferentes configurações podem ser vistas

na Figura 28 e os dados de localização do CG em relação ao sistema de coordenadas principal, localizado no pino do engate, estão na Tabela 4.

Figura 28 – Configurações estudadas.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Centros de massa para diferentes configurações de estudo.

Coordenadas do centro de massa		Material	
		Aço estrutural	Compósito de Fibra de Carbono
Sem passageiros (mm)	X	0,0	0,0
	Y	154,4	207,1
	Z	971,4	992,5
2 Passageiros na dianteira (mm)	X	0,0	0,0
	Y	312,2	372,1
	Z	649,0	581,0
2 Passageiros na traseira (mm)	X	0,0	0,0
	Y	312,2	372,1
	Z	1327,8	1421,8
4 Passageiros (mm)	X	0,0	0,0
	Y	369,5	446,2
	Z	994,6	1003,8

Fonte: Próprio autor.

Logo, considerando a massa total do conjunto estudado e a posição do centro de massa com relação a cada uma das rodas, foi possível calcular a força de entrada em cada roda para condição da carruagem parada na superfície não inclinada. Para isso, foram realizadas somatórias de forças e momentos, e em uma análise da vista lateral da carruagem, foram obtidas as forças na dianteira e traseira. Em seguida, analisando uma vista frontal, foram determinadas as distribuições entre rodas direitas e esquerdas. Os valores das forças em cada uma das rodas nas configurações apresentadas para as estruturas de fibra de carbono e de aço estrutural estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Forças de entrada nas rodas.

Forças nas rodas (N)		Material da estrutura	
		Aço estrutural	Compósito de Fibra de Carbono
Sem passageiros	D _E	410,3	259,8
	D _D	410,3	259,8
	T _E	419,2	276,9
	T _D	419,2	276,9
2 Passageiros na dianteira	D _E	1056,9	906,4
	D _D	1056,9	906,4
	T _E	508,3	366,0
	T _D	508,3	366,0
2 Passageiros na traseira	D _E	463,4	312,9
	D _D	463,4	312,9
	T _E	1101,8	959,5
	T _D	1101,8	959,5
4 Passageiros	D _E	1110,0	959,5
	D _D	1110,0	959,5
	T _E	1191,0	1048,7
	T _D	1191,0	1048,7

Fonte: Próprio autor.

Em que D_E corresponde a roda dianteira esquerda, D_D a roda dianteira direita, T_E a roda traseira esquerda e T_D a roda traseira direita.

4.2. ANÁLISE ESTÁTICA.

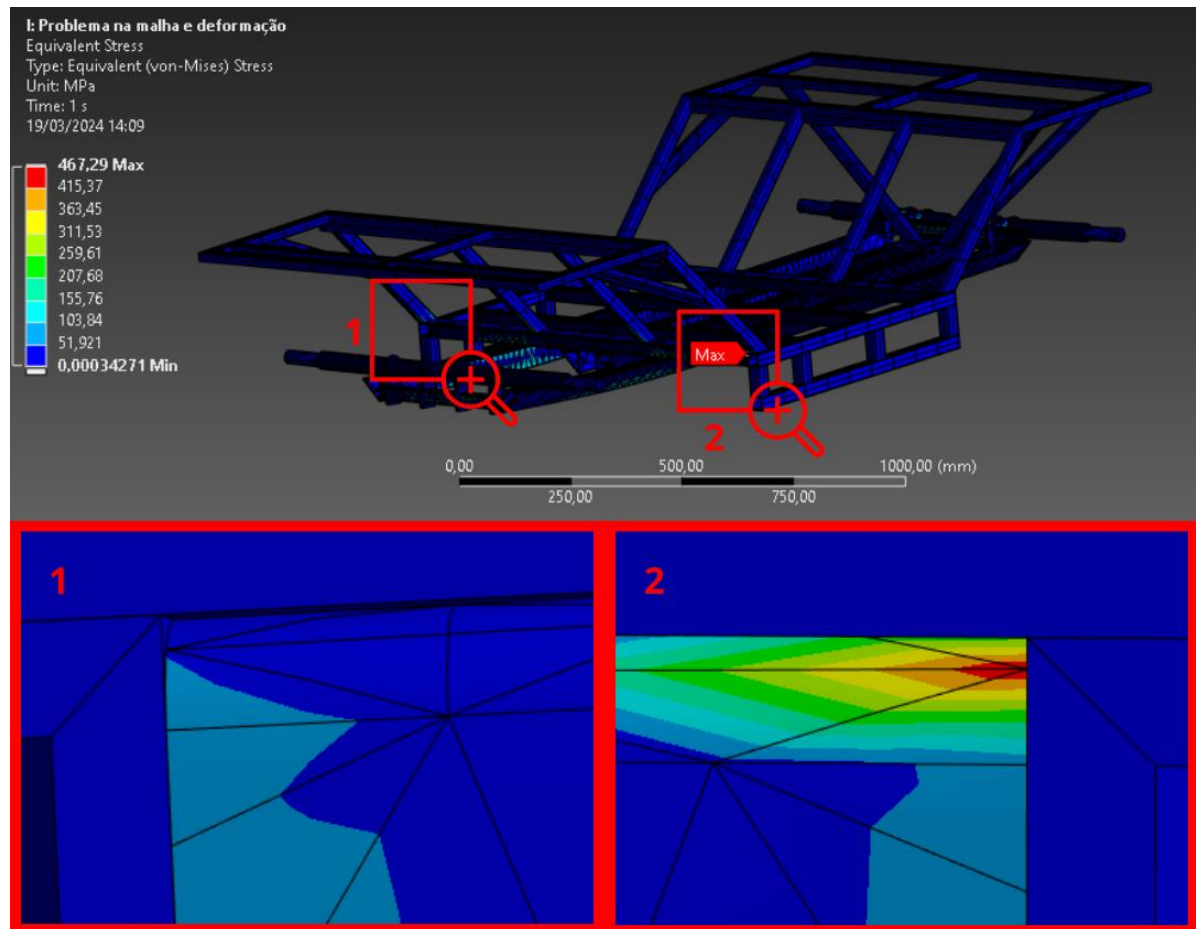
Em uma análise estática, ao utilizar a análise por elementos finitos é importante atentar-se sobre a região de trabalho que o material está sendo submetido (análise elástica ou elasto-plástica). Assim, fazendo uma primeira análise com a situação mais crítica empregada na estrutura, foi constatado que, neste trabalho, as tensões experimentadas não ultrapassaram o limite de escoamento dos materiais utilizados. Logo, a análise feita é puramente elástica.

Nesse tipo de estudo, deve-se observar as regiões cuja tensão máxima é mais crítica e atentar-se ao fator de segurança da estrutura com base no limite de escoamento do material utilizado. Ao verificar pontos críticos, pode-se melhorar o modelo para que ocorra redução na tensão ou redimensionar os componentes para que atendam a tensão a que são submetidos. Visto que o ideal é trabalhar dentro do regime elástico da estrutura, pontos não dimensionados como descrito, podem ser a causa de danos a mesma.

Aqui, serão apresentados os 2 tipos de análises que foram realizadas, comparando o resultado obtido para a estrutura em fibra de carbono e aço estrutural. A primeira análise consistiu em fixar a superfície superior dos tubos que são base para os assentos da carruagem e aplicar força nos eixos de roda. Já para a segunda análise fixou-se os eixos de roda e aplicou-se força na região dos assentos.

Durante a preparação e simplificação da estrutura para que seja possível realizar simulações precisas, erros podem surgir indicando valores de tensão extremamente elevados em regiões pontuais. É imprescindível que seja avaliado se há lógica em haver um esforço tão grande na região e como está o comportamento da estrutura nas regiões próximas ou simétricas submetidas ao mesmo esforço. Inicialmente, durante a preparação do modelo, falhas desse caráter ocorreram devido ao refinamento da malha no Ansys e ao modo que os componentes foram posicionados e travados dentro do Solidworks. Um exemplo das regiões da simulação com resultados errôneos pode ser visto na Figura 29, a seguir.

Figura 29 – Região da estrutura com resultados incondizentes.



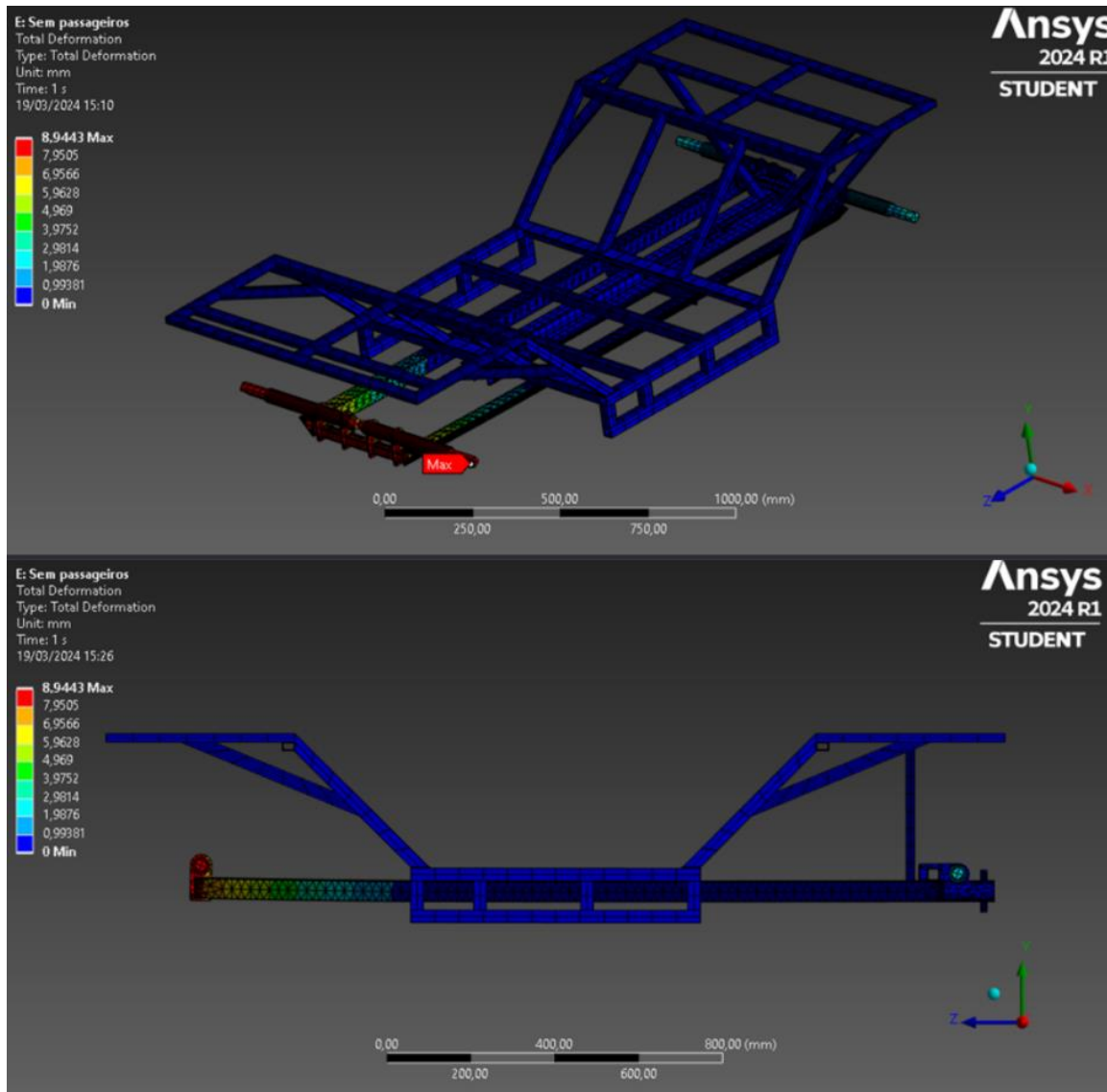
Fonte: Próprio autor.

Nota-se, pela coloração geral da estrutura e comparação com um ponto simétrico, que os níveis de tensão por toda estrutura não condizem com o apresentado no nó da ampliação número 2. Estes pontos não podem ser considerados como relevantes para tomadas de decisões.

Assim, com a fonte do erro identificada, corrigiu-se o erro alterando o perfil do tubo (adição de raio aos “cantos vivos”) e refinando a malha especialmente nos tubos apresentados. Além desse tubo, o mesmo comportamento foi observado em outros pontos da estrutura e a tentativa foi similar à citada, contudo, para manter o foco no objetivo de estudo, apenas esse exemplo foi trazido. O comprimento geral dos elementos de malha do restante da estrutura manteve-se inalterado pois a versão estudantil do software não foi capaz de realizar as simulações com sua refinação. Os resultados das simulações após a correção dos problemas serão apresentados a seguir.

As Figuras 30 a 37, apresentam os resultados das simulações da estrutura de compósito de fibra de carbono para a primeira análise mencionada. Já as Figuras 38 a 45 apresentam os resultados para a estrutura em aço estrutural.

Figura 30 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono sem passageiros.

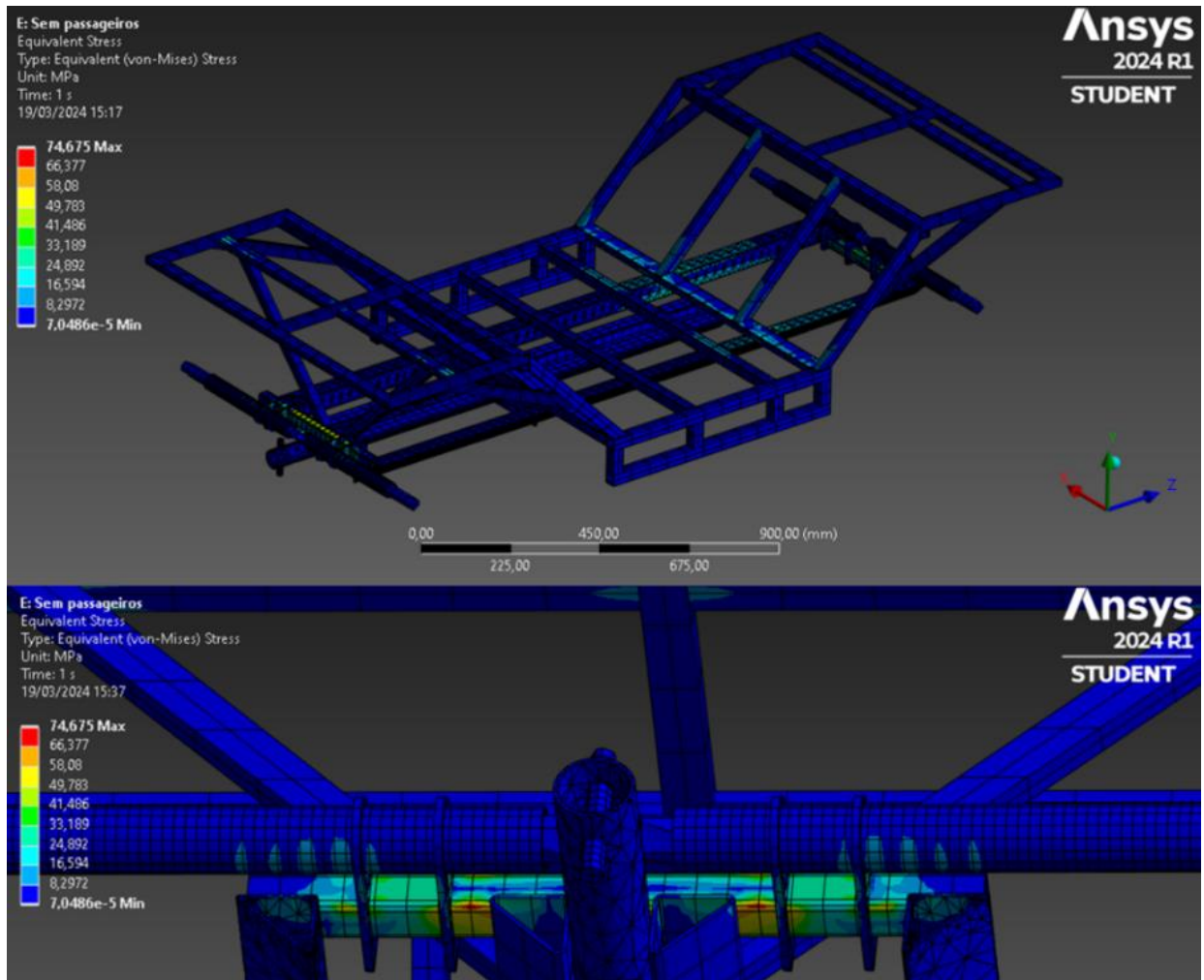


Fonte: Próprio autor.

Ao analisar a deformação da estrutura parada em uma superfície plana não inclinada e sem passageiros, nota-se que excetuando-se a região do eixo traseiro, a estrutura não sofre deformações significativas, restringindo-se entre aproximadamente 0 em sua maior extensão e 2 mm na extremidade do eixo dianteiro. Já nos pontos indicados com as cores mais quentes (traseira), a deformação

apresentada foi significativa mesmo sem a adição de massa de passageiros, atingindo valores próximos de 8,9 mm. Na Figura 30, observa-se uma pequena flexão das longarinas centrais na região traseira da estrutura.

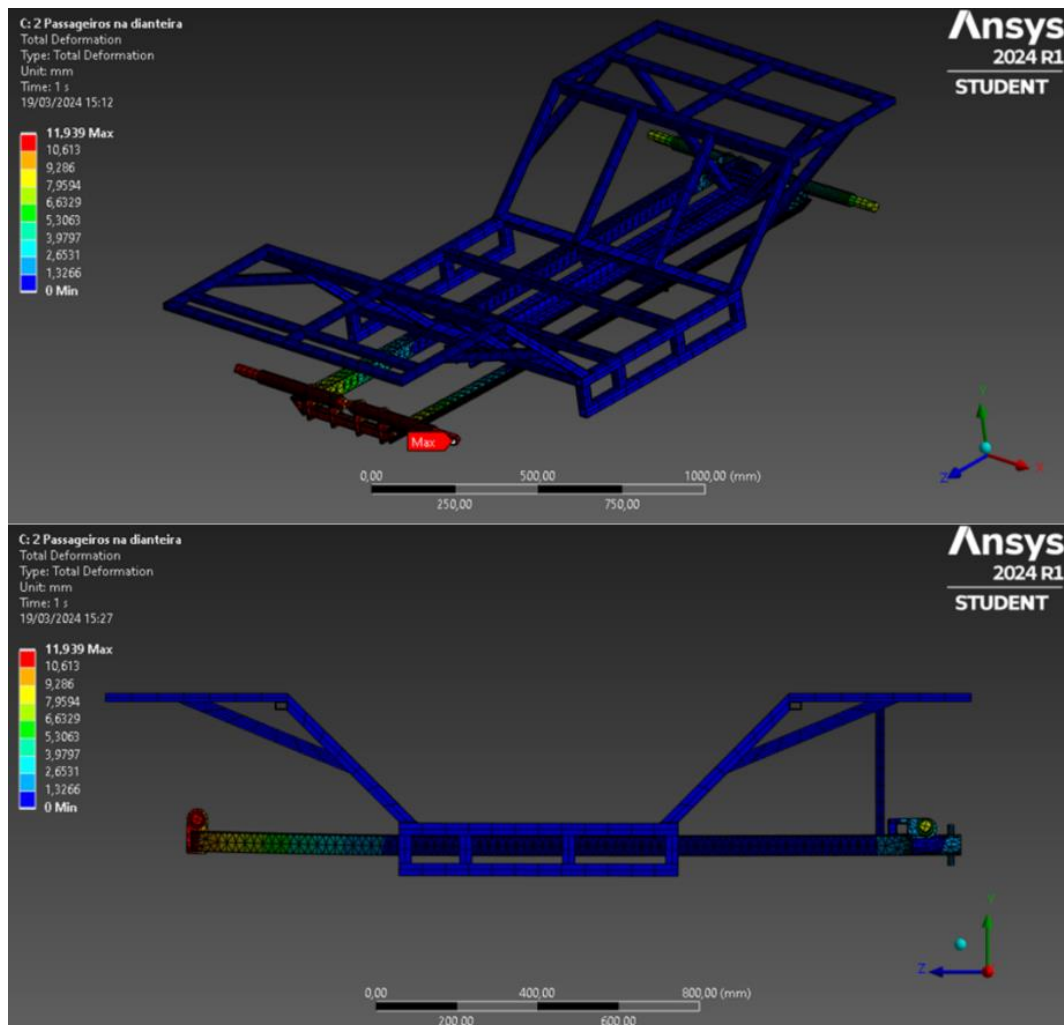
Figura 31 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono sem passageiros.



Fonte: Próprio autor.

Em um estudo de tensões, os resultados obtidos indicam níveis baixos de tensão em toda a estrutura. Observa-se que os pontos que exigem mais esforços estão nas conexões dos tubos que são suportes dos assentos com a estrutura central (cor azul mais clara) e na transversina de fixação dos eixos dianteiros. Nesta última estão os pontos mais críticos para essa condição de simulação da estrutura (cor vermelha), atingindo a magnitude de 74,675 MPa.

Figura 32 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 2 passageiros na dianteira.



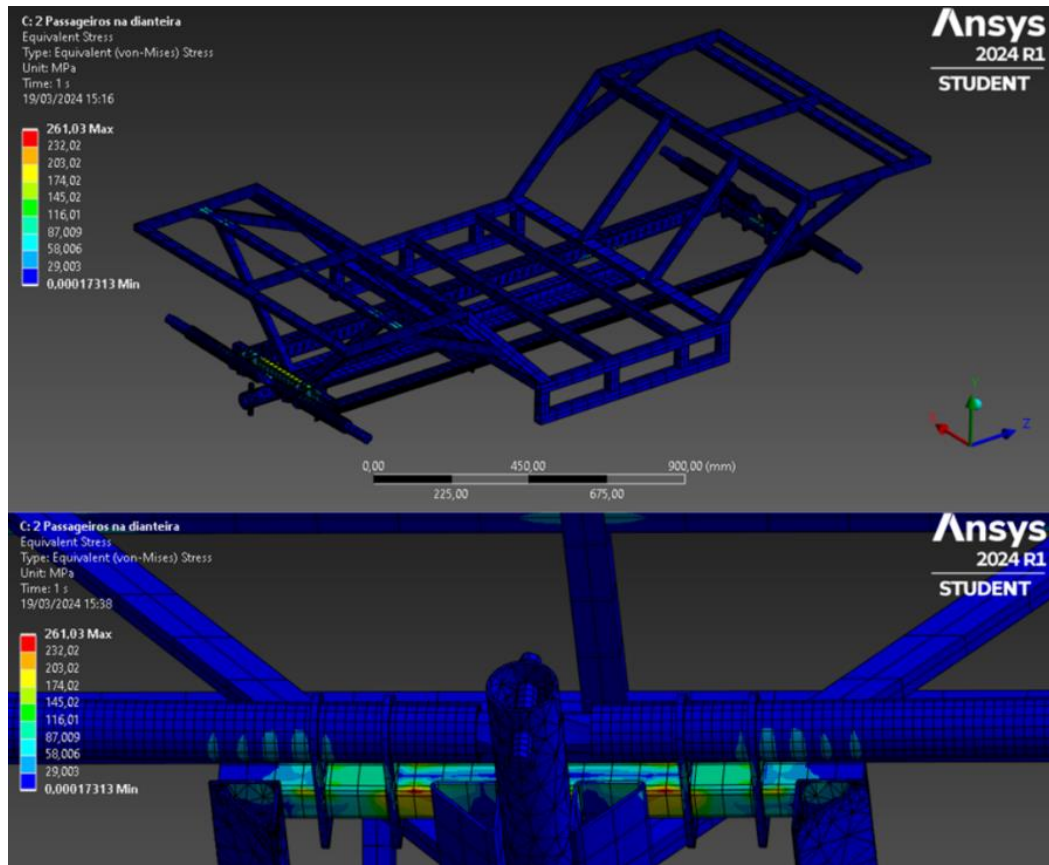
Fonte: Próprio autor.

Já na condição da estrutura parada em uma superfície plana não inclinada com dois passageiros nos assentos dianteiros, observa-se que do ponto de vista de deformações, a o comportamento continua similar ao estudo sem passageiros, contudo, com o aumento dos níveis de deformação na região dianteira. Em sua maior extensão, a estrutura não sofre grades deformações significativas, restringindo- se entre aproximadamente 0 (Azul mais escuro) e 2 mm. Como há maior carga aplicada na região dianteira e o deslocamento do centro de massa da estrutura, a intensidade da força aplicada no eixo dianteiro aumentou aproximadamente 3,5 vezes, o que fez com que a deformação nessa região atingisse aproximadamente 6,0 mm.

Ainda na análise de deformação, nos pontos indicados com as cores mais quentes (traseira), a deformação apresentada continua sendo a mais significativa,

atingindo valores aproximados de 11,939 mm. Nota-se a pequena flexão das longarinas centrais na região traseira da estrutura.

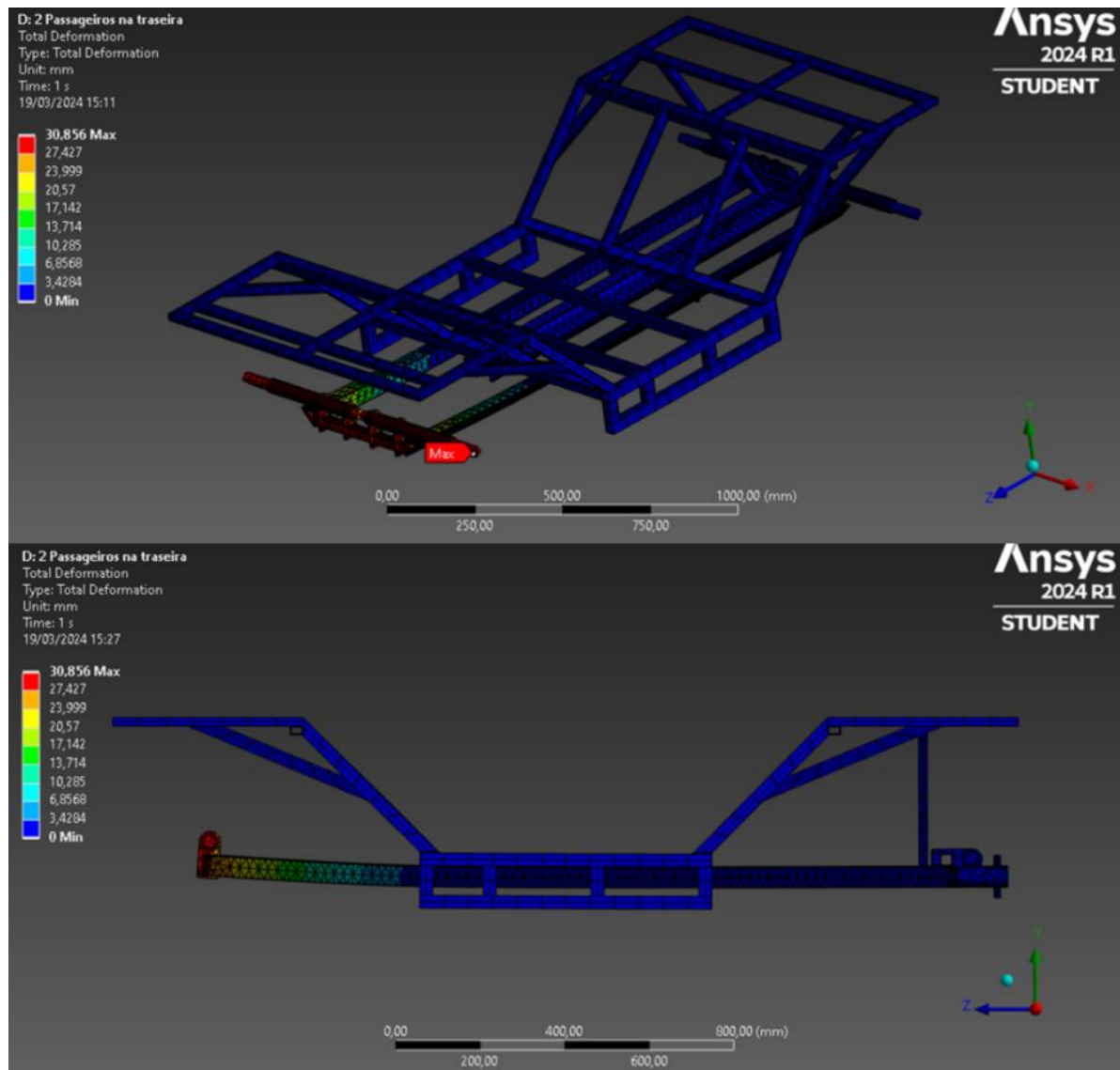
Figura 33 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 2 passageiros na dianteira.



Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado na Figura 33, os resultados obtidos permanecem indicando níveis baixos de tensão em quase toda a estrutura, porém houve um grande crescimento das tensões na região mais crítica (transversina de conexão da estrutura aos eixos dianteiros). O perfil de comportamento da estrutura nessa região é similar a condição encontrada sem passageiros e pode ser originado da combinação de esforços de flexão, entre as chapas que conectam a transversina aos mancais dos eixos e o ponto de conexão das longarinas centrais, e de torção que essas mesmas chapas causam na transversina devido ao seu posicionamento e o ponto de aplicação de força nos eixos. Os pontos mais críticos para essa condição de simulação da estrutura (cor vermelha), atingiram a magnitude de 261,03 MPa.

Figura 34 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 2 passageiros na traseira.



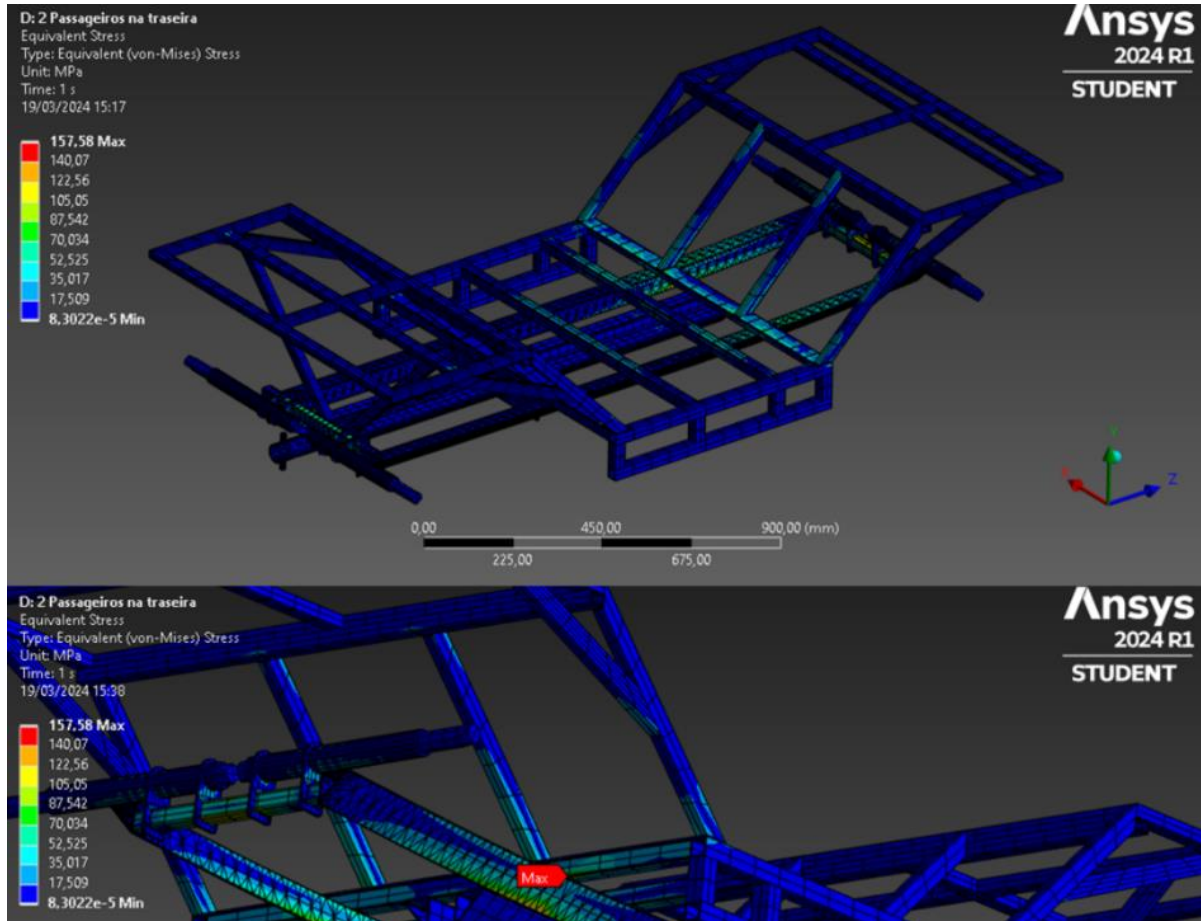
Fonte: Próprio autor.

Para estrutura em superfície plana não inclinada com dois passageiros nos assentos traseiros, observa-se que do ponto de vista de deformações, o comportamento continua similar a estudo sem passageiros, contudo, com crescimento extremamente elevado dos valores de deformação na região traseira. A maior extensão da estrutura não sofre grades deformações significativas (0 e 2 mm).

Como há maior carga aplicada na região traseira, que já apresentava os valores mais críticos até sem passageiros, a intensidade da força aplicada no eixo traseiro aumentou aproximadamente 3,5 vezes, o que fez com que a deformação nessa região atingisse aproximadamente 30,856 mm. Nota-se a expressiva flexão das

longarinas centrais na região traseira da estrutura. Entretanto, vale ressaltar que mesmo nessa condição a estrutura trabalha no regime elástico.

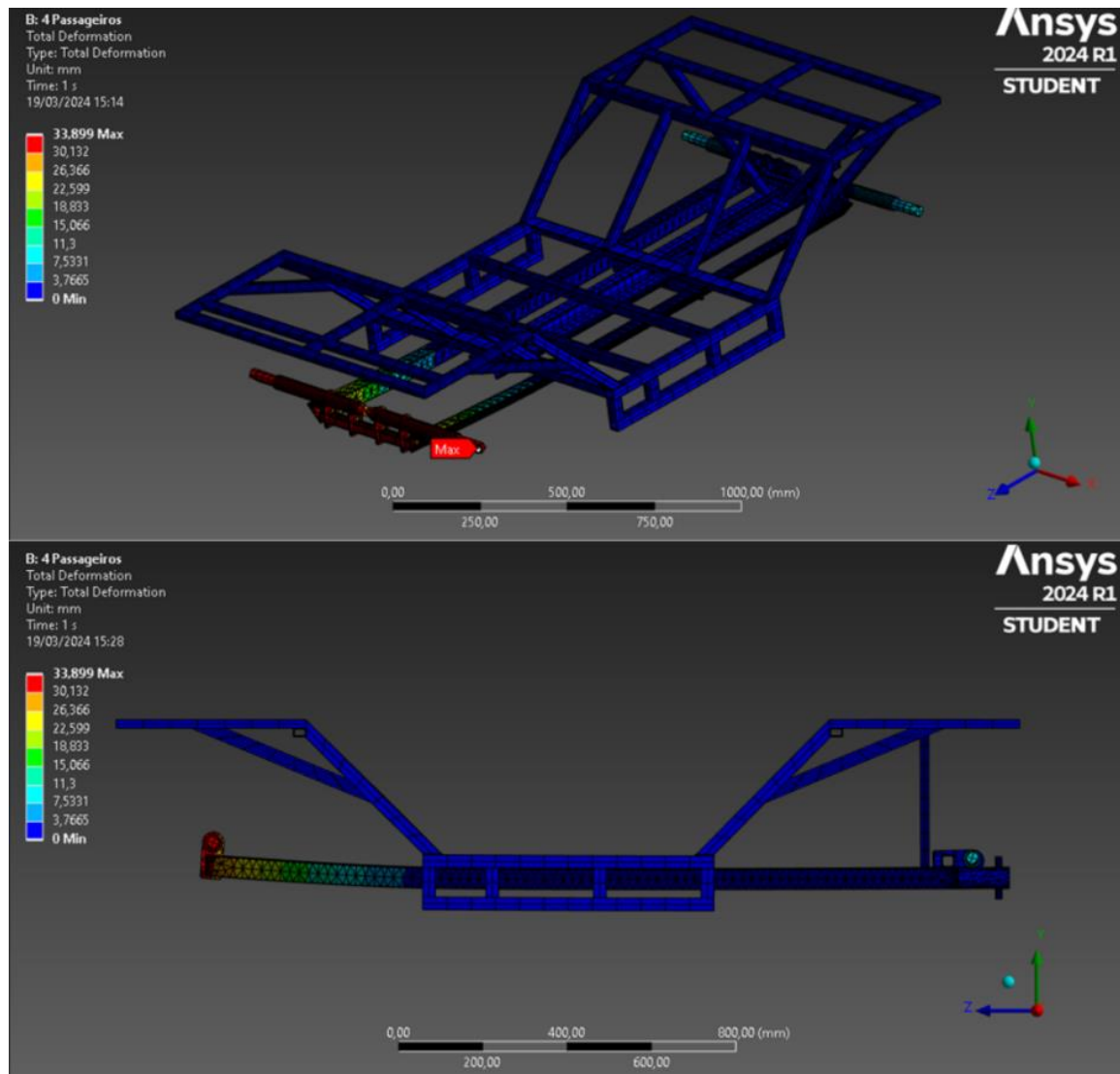
Figura 35 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 2 passageiros na traseira.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos na análise de tensão permanecem indicando níveis baixos de tensão na maior parte estrutura, porém, diferentemente das análises anteriores, a região mais crítica não está na transversina dianteira. O aumento da força aplicada nos eixos traseiros e o comprimento das longarinas centrais que ficam “em balanço” na região traseira fazem com que os níveis de tensão aumentem nos pontos indicados com as cores mais quentes na Figura 35. O ponto de tensão máxima, indicado pela seta vermelha, possui magnitude de aproximadamente 157,58 MPa.

Figura 36 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 4 passageiros.

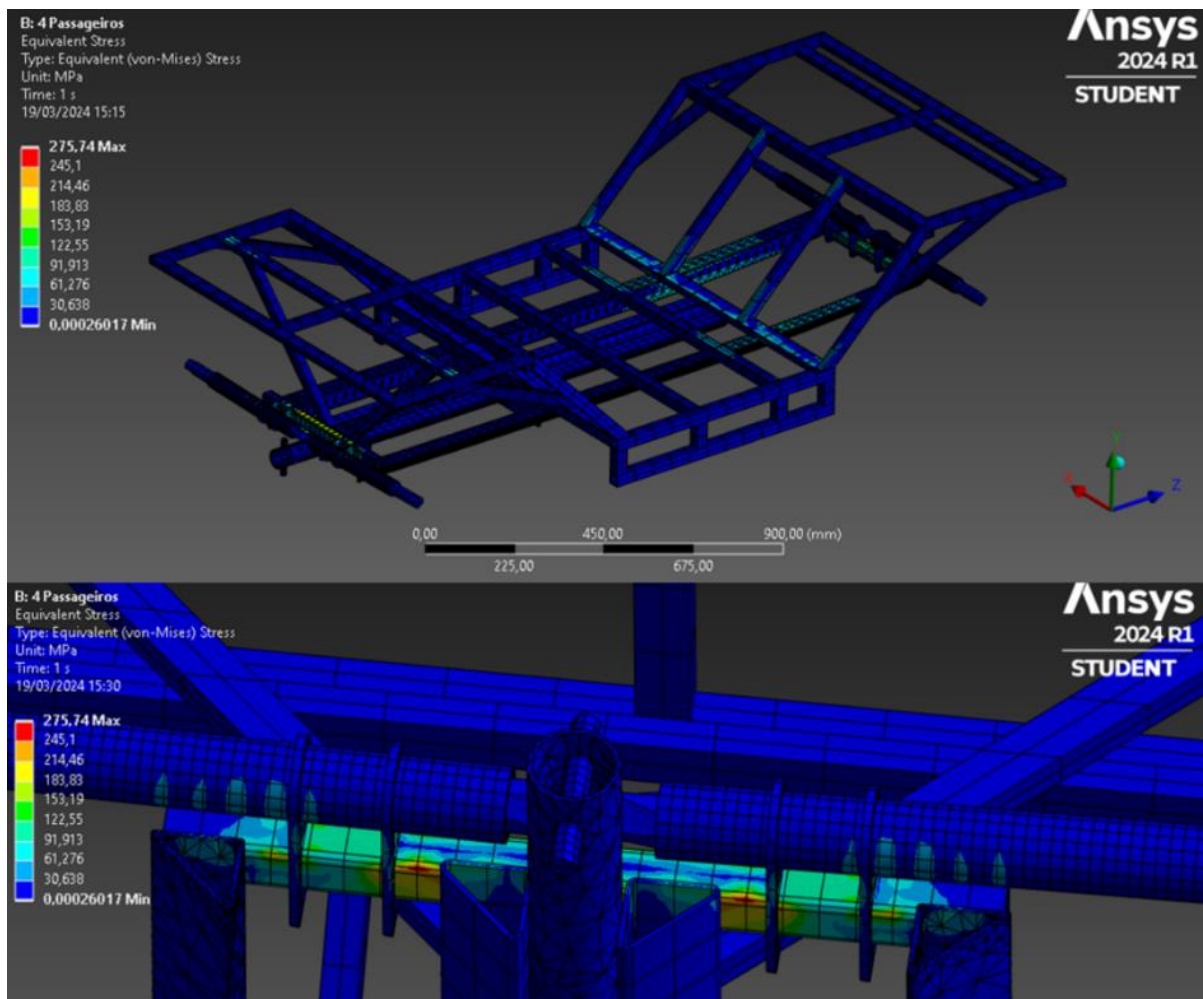


Fonte: Próprio autor.

O caso da estrutura parada em uma superfície plana não inclinada com quatro passageiros é o mais crítico estudado. Com a carruagem com lotação máxima a força de entrada nas rodas dianteira e traseira supera todas as anteriormente apresentadas, como apresentado na tabela 5. Do ponto de vista de deformações, em sua maior extensão, a estrutura não sofre grandes deformações significativas, restringindo-se entre aproximadamente 0 (Azul mais escuro) e 2 mm, exceto nas longarinas principais e regiões próximas aos eixos. Nos pontos indicados com as cores mais quentes (traseira), a deformação apresentada continua sendo a mais significativa, atingindo valores aproximados de 33,9 mm. Com essa alta deformação, nota-se a flexão das

longarinas centrais na região traseira da estrutura até mesmo com a simulação em escala real. Embora não seja tão alto quanto o valor do eixo traseiro, no eixo dianteiro as deformações atingiram 6,5 mm.

Figura 37 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em fibra de carbono com 4 passageiros.

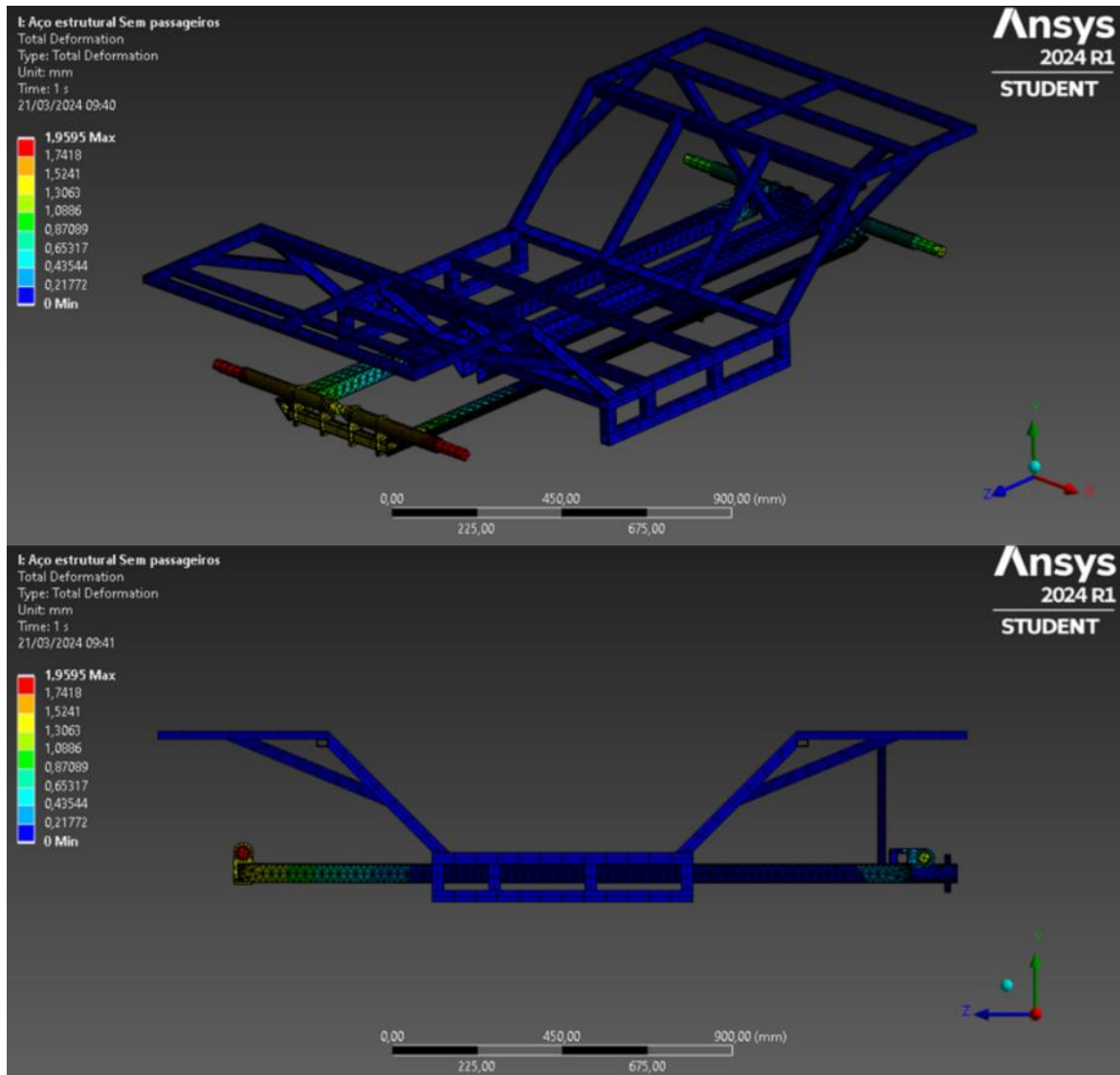


Fonte: Próprio autor.

Os valores de tensão obtidos permanecem indicando níveis baixos de tensão na maior parte da estrutura, porém houve um grande crescimento das tensões nas mesmas regiões mais críticas indicadas nos casos de 2 passageiros na dianteira e 2 passageiros na traseira. Como o esforço foi maior, tanto na dianteira, quanto na traseira, esse era resultado esperado. Os pontos mais críticos para essa condição de simulação da estrutura (cor vermelha), atingiram a magnitude de 275,7 MPa aproximadamente.

As figuras a seguir apresentam os resultados das simulações da estrutura em aço estrutural.

Figura 38 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural sem passageiros.

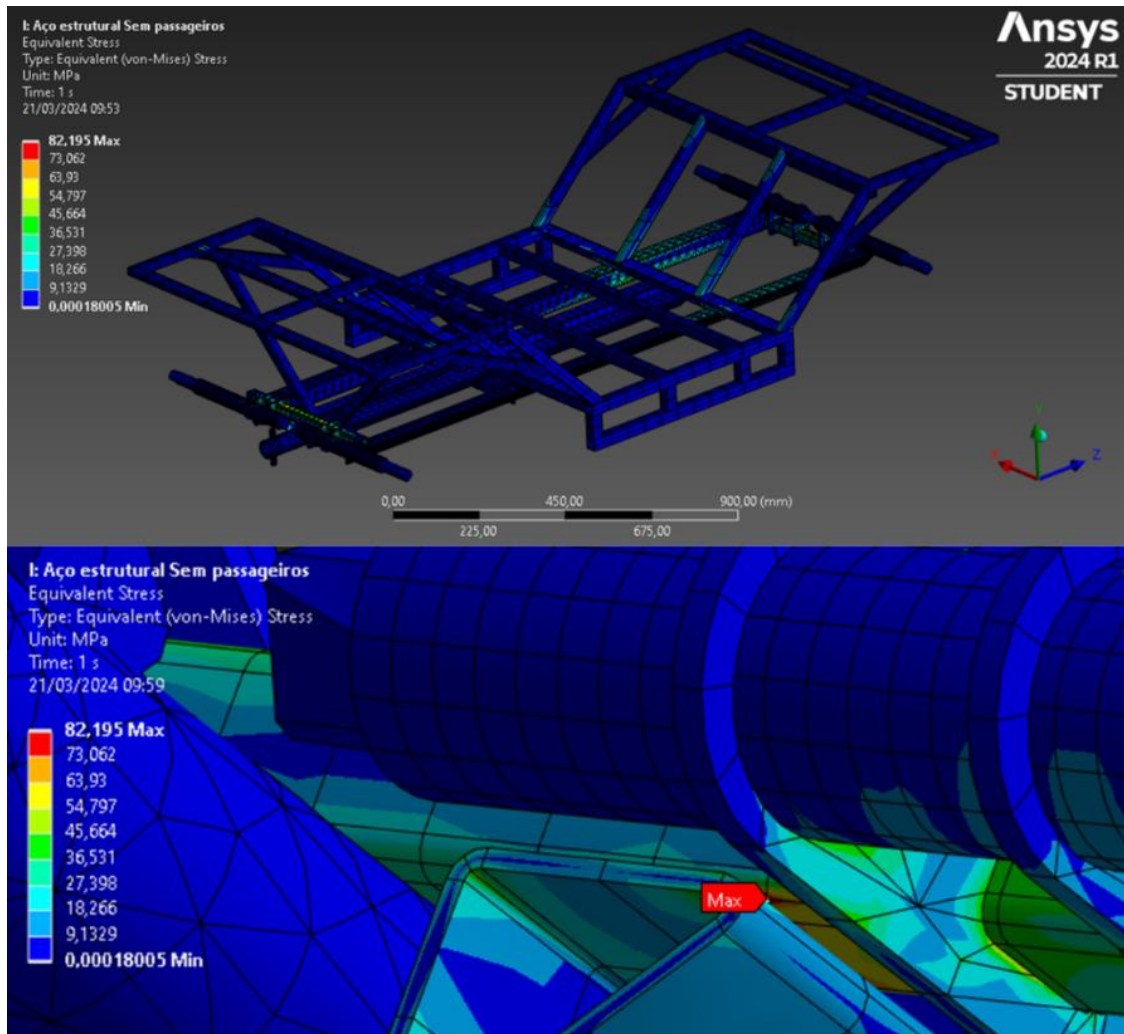


Fonte: Próprio autor.

Ao analisar a deformação da estrutura de aço parada em uma superfície plana não inclinada e sem passageiros, nota-se que excetuando-se as regiões dos eixos traseiros e dianteiros, a estrutura não sofre deformações significativas, restringindo-se entre aproximadamente 0 e 0,85 mm (Regiões em azul). Nos pontos indicados em verde (dianteira) e nas cores mais quentes (traseira), a deformação apresentada,

embora maior, continua baixa, atingindo valores próximos de 1,96 mm. Na Figura 38, observa-se que a flexão das longarinas centrais na região traseira da estrutura é praticamente imperceptível.

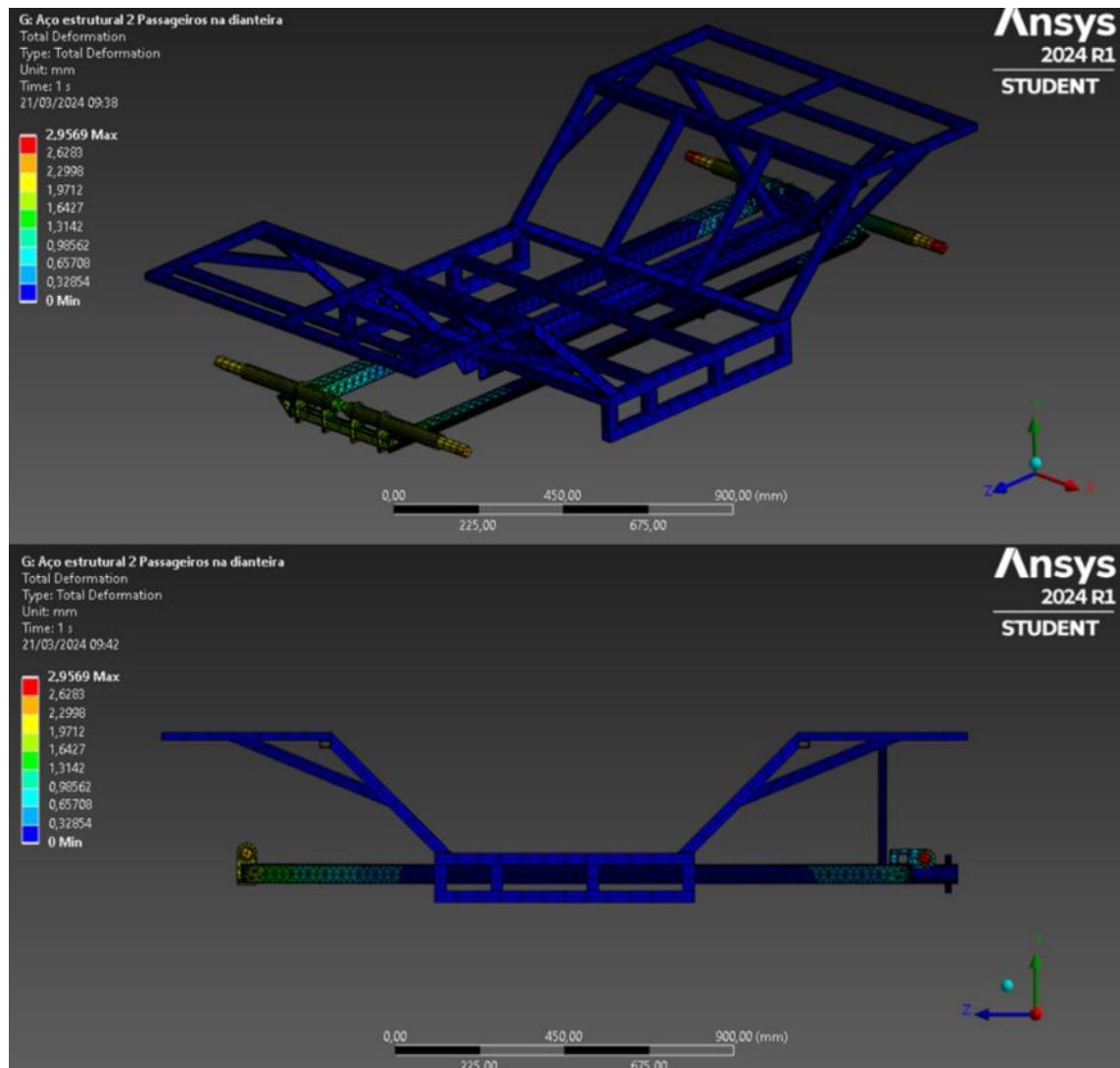
Figura 39 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural sem passageiros.



Fonte: Próprio autor.

Em um estudo de tensões, os resultados obtidos indicam níveis baixos de tensão em toda a estrutura. Observa-se que os pontos que exigem mais esforços estão nas conexões dos tubos que são suportes dos assentos com a estrutura central (cor azul mais clara), nas longarinas triangulares centrais e na transversina de fixação dos eixos dianteiros. Nesta última estão os pontos mais críticos para essa condição de simulação da estrutura (cor vermelha), atingindo a magnitude de aproximadamente 82,2 MPa.

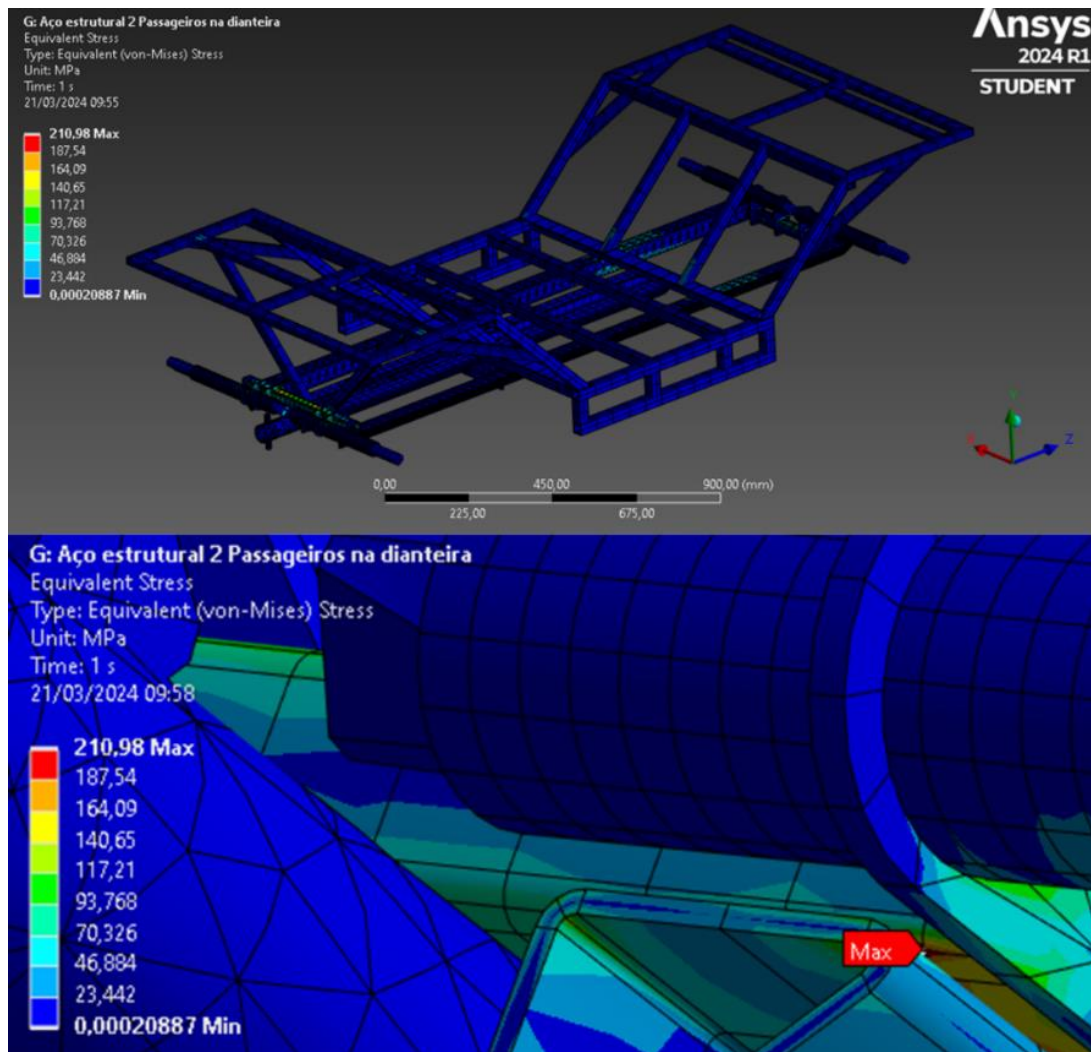
Figura 40 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 2 passageiros na dianteira.



Fonte: Próprio autor.

Na condição da estrutura parada em uma superfície plana não inclinada com dois passageiros nos assentos dianteiros, observa-se que do ponto de vista de deformações, o comportamento continua similar a estudo sem passageiros, contudo, com o aumento dos níveis de deformação na região dianteira. Em sua maior extensão, a estrutura não sofre grades deformações significativas, restringindo-se entre aproximadamente 0 (Azul mais escuro) e 0,3 mm. Como a intensidade da força aplicada no eixo dianteiro aumentou, a deformação nessa região passa a ser maior que a deformação na traseira, atingindo aproximadamente 2,96 mm. Nota-se que a flexão das longarinas centrais da estrutura é praticamente imperceptível em escala real.

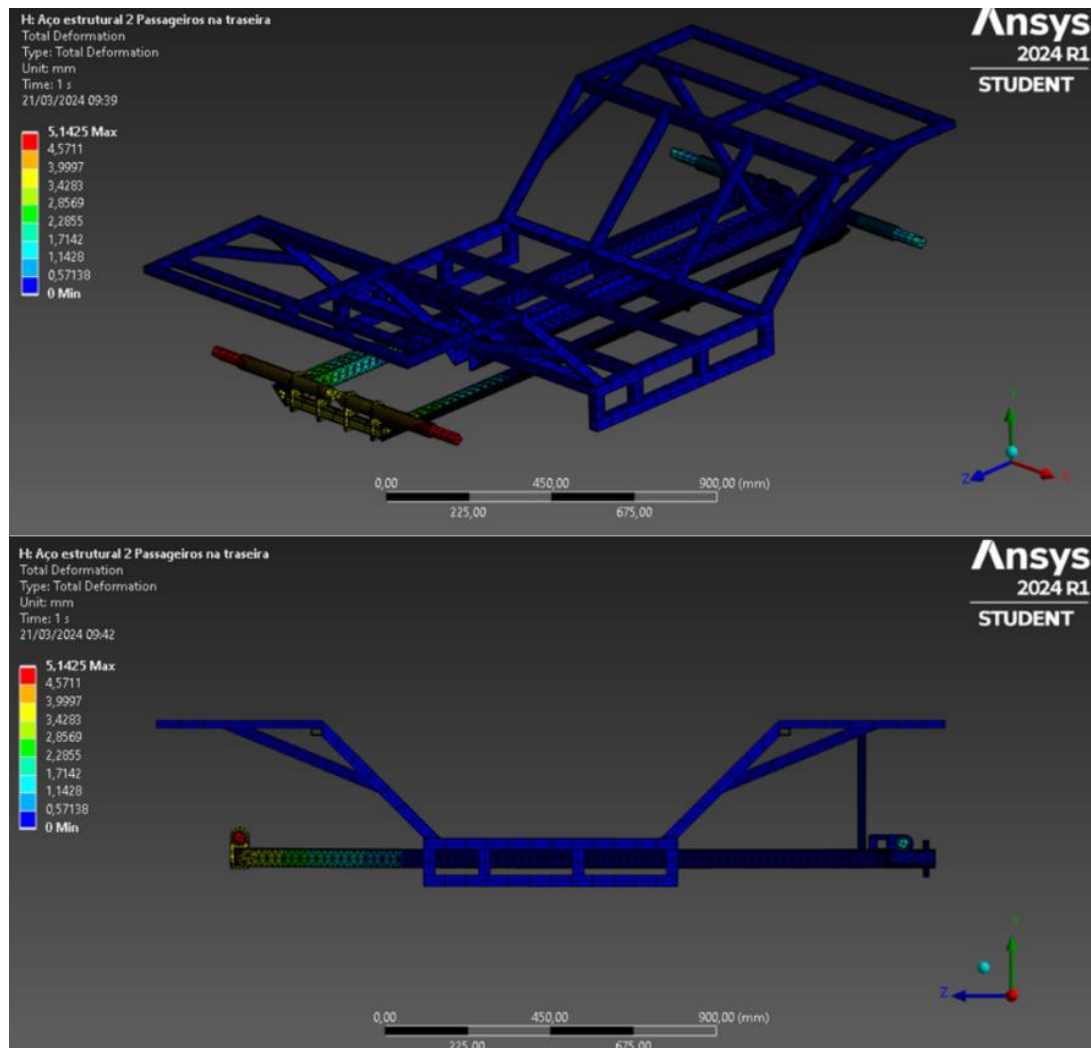
Figura 41 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 2 passageiros na dianteira.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos de tensão de Von Mises, similarmente ao caso anterior, permanecem indicando níveis baixos de tensão na maior parte da estrutura, porém houve um grande crescimento das tensões na região mais crítica, originados pela mesma combinação dos efeitos de flexão e torção na transversina de conexão da estrutura aos eixos dianteiros. Os pontos mais críticos para essa condição de simulação da estrutura (cor vermelha), atingiram a magnitude de 210,98 MPa.

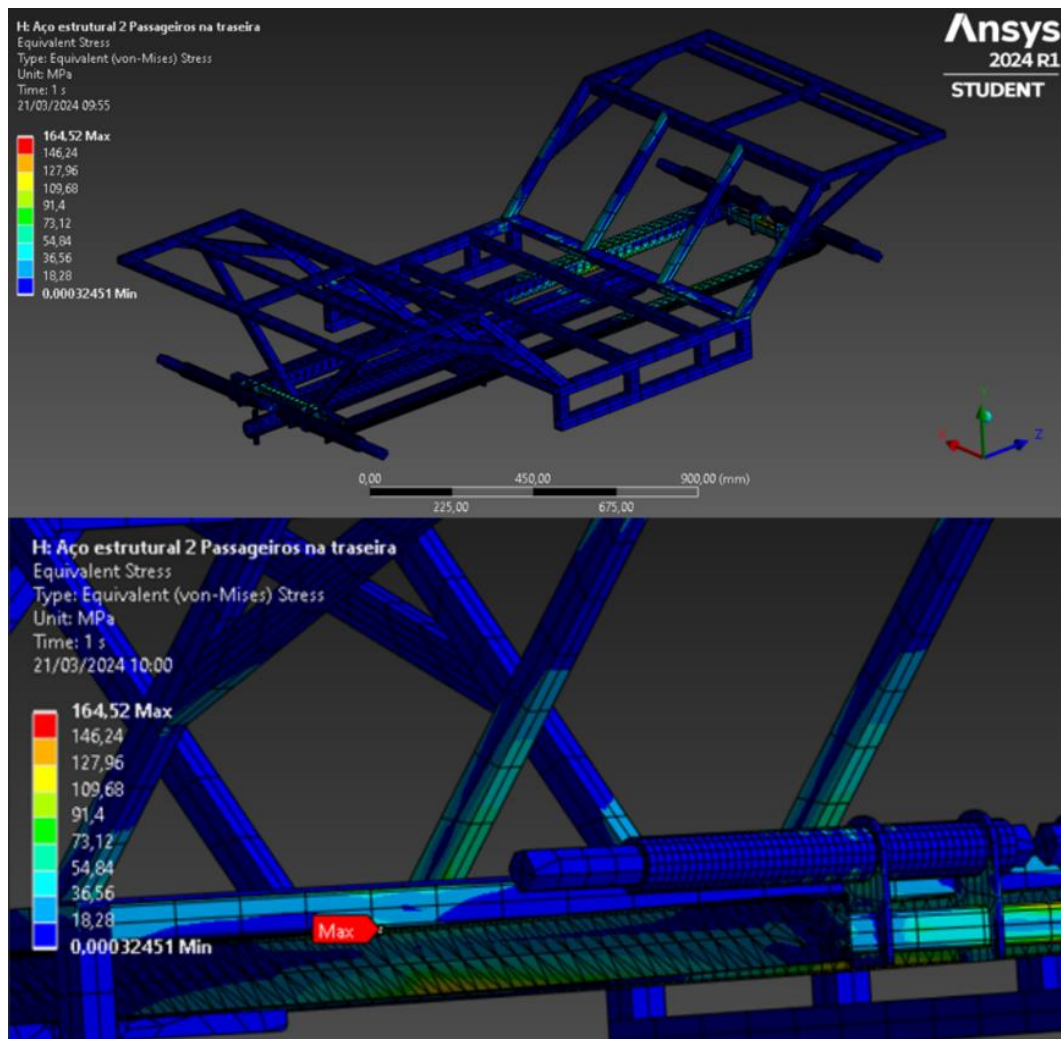
Figura 42 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 2 passageiros na traseira.



Fonte: Próprio autor.

Para estrutura em superfície plana não inclinada com dois passageiros nos assentos traseiros, do ponto de vista de deformações, há um crescimento elevado dos valores de deformação na região traseira quando comparado ao estudo sem passageiros, partindo de aproximadamente 1,96 mm e atingindo 5,14 mm. Contudo, a maior parte da extensão da estrutura não sofre grades deformações significativas (entre 0 e 0,57 mm).

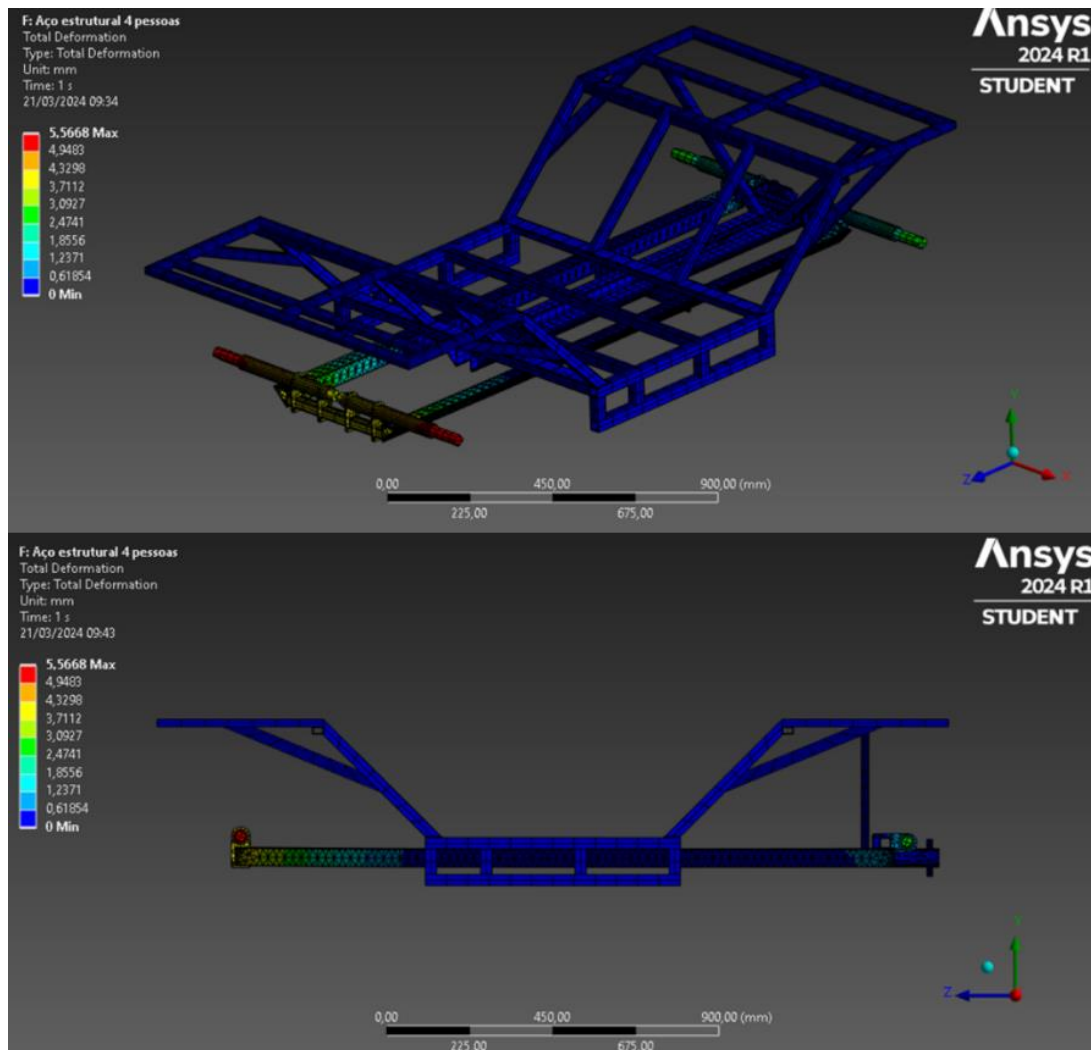
Figura 43 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 2 passageiros na traseira.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos na análise de tensão permanecem indicando níveis baixos de tensão na maior parte estrutura, porém, diferentemente das análises anteriores e similar ao mesmo caso com a estrutura em fibra de carbono, a região mais crítica está nas longarinas centrais. O aumento da força aplicada nos eixos traseiros e o comprimento das longarinas centrais que ficam “em balanço” na região traseira fazem com que haja um maior momento e os níveis de tensão aumentem nos pontos indicados com as cores mais quentes na Figura 43. O ponto de tensão máxima, indicado pela seta vermelha, possui magnitude de aproximadamente 164,52 MPa, superando o mesmo caso em fibra de carbono.

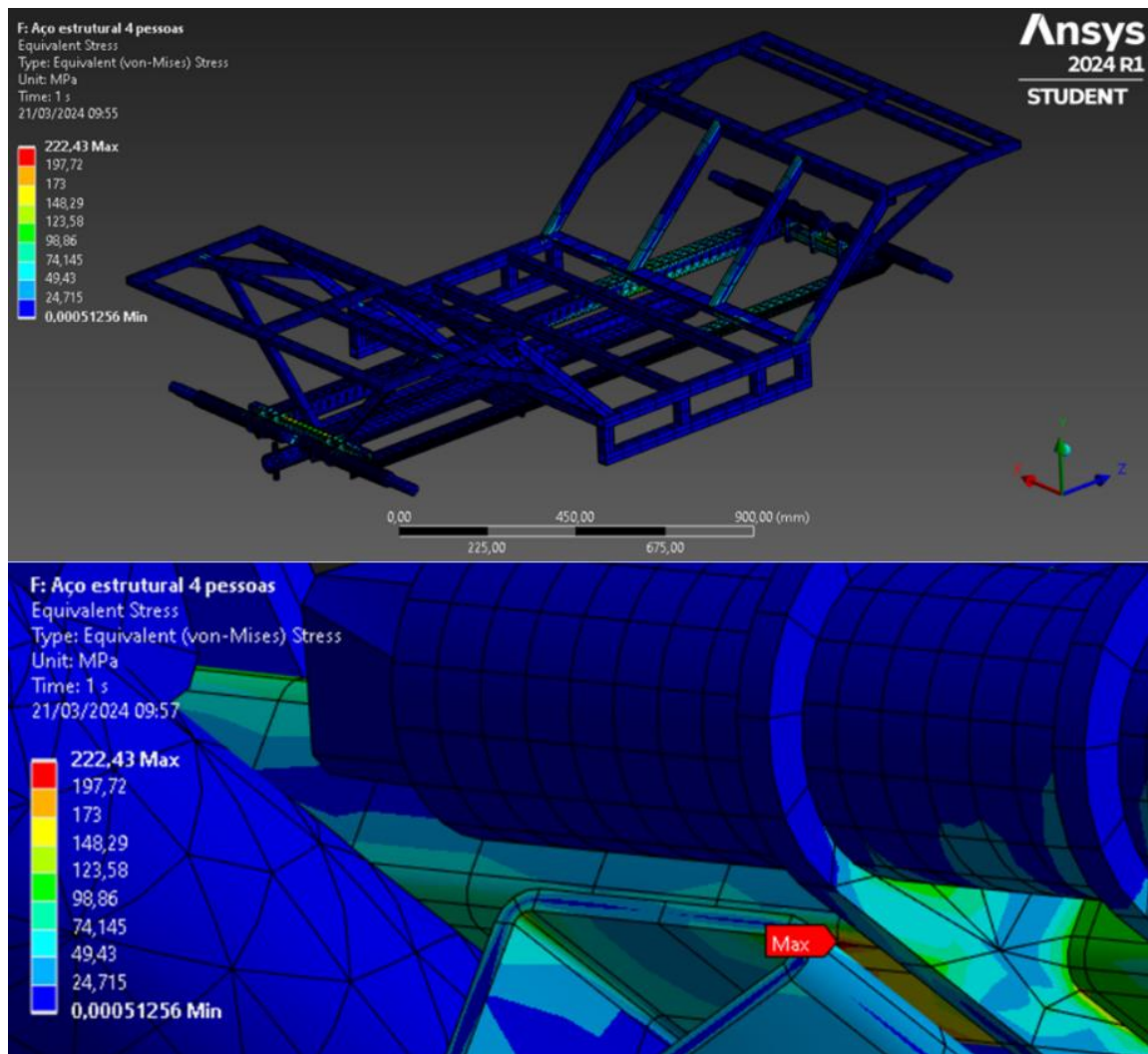
Figura 44 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 4 passageiros.



Fonte: Próprio autor.

No caso mais crítico, com 4 passageiros, do ponto de vista de deformações, em sua maior extensão, a estrutura não sofre grandes deformações significativas (entre 0 e 0,62mm), exceto nas longarinas principais e regiões próximas aos eixos. Nos pontos indicados com as cores mais quentes (traseira), a deformação apresentada continua sendo maior, atingindo valores aproximados de 5,57 mm. Com essa deformação, nota-se uma leve flexão das longarinas centrais na região traseira com a simulação em escala real. Embora não seja tão alto quanto o valor do eixo traseiro, no eixo dianteiro as deformações atingiram 2,30 mm.

Figura 45 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura em aço estrutural com 4 passageiros.

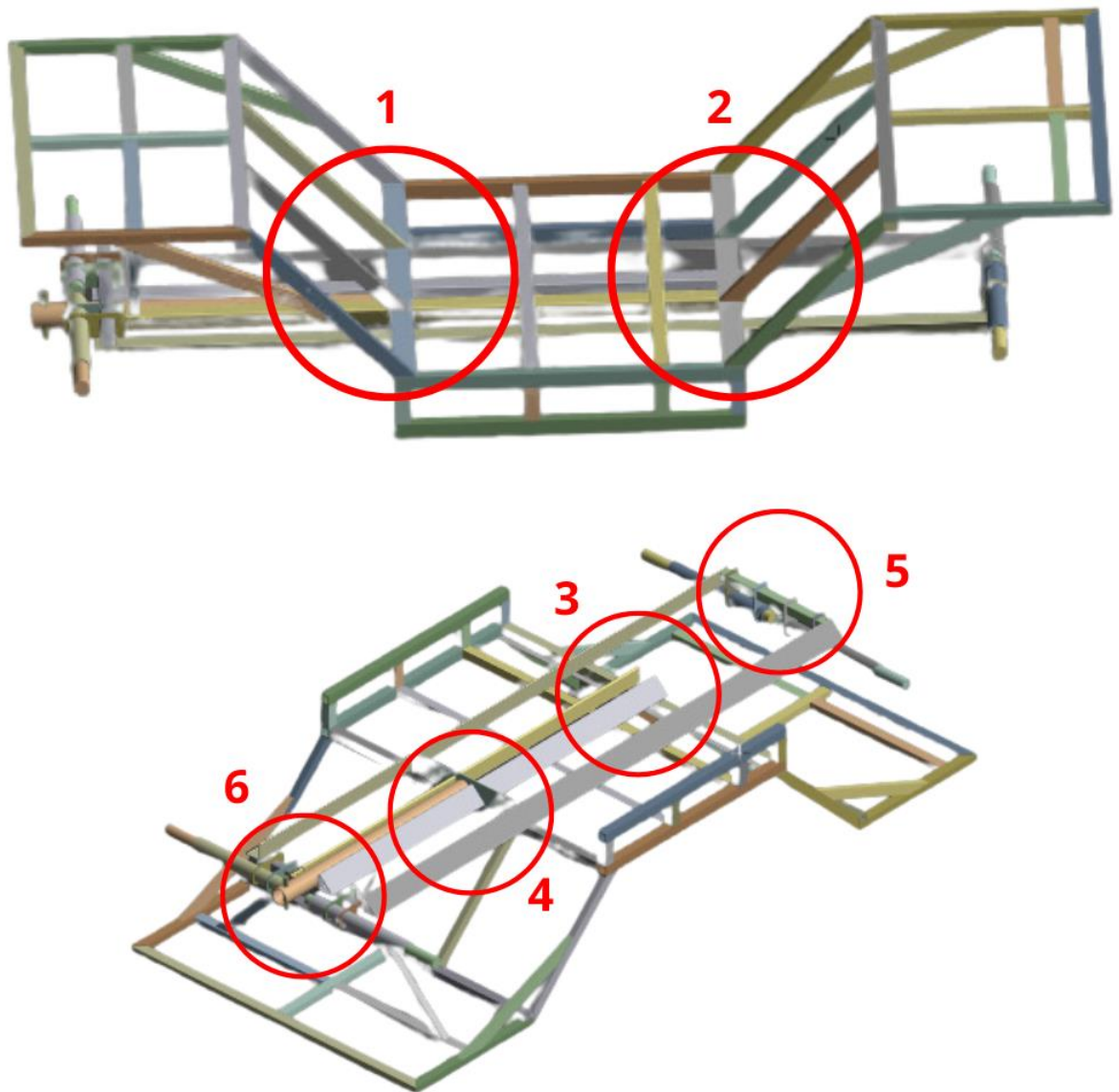


Fonte: Próprio autor.

Os valores de tensão obtidos permanecem indicando níveis baixos de tensão na maior parte da estrutura, porém houve um grande crescimento das tensões nas mesmas regiões mais críticas indicadas nos casos de 2 passageiros na dianteira e 2 passageiros na traseira. Os resultados obtidos foram similares ao caso da estrutura em fibra de carbono. Os pontos mais críticos para essa condição de simulação da estrutura (cor vermelha), atingiram a magnitude de 222,43 MPa aproximadamente.

Algumas regiões da estrutura, cuja análise é de interesse desse estudo, foram selecionadas para que o estudo dos valores de tensão fosse realizado. As regiões de estudo estão indicadas na Figura 46 e as correspondentes tensões descritas na Tabela 6, para cada um dos casos estudados.

Figura 46 – Regiões para estudo de tensão.



Fonte: Próprio autor.

Em que, as regiões indicadas pelos números 1 e 2 correspondem as conexões entre o módulo central e os tubos inclinados dos módulos dianteiro e traseiro respectivamente. As regiões 3 e 4 são os pontos de contato das longarinas de perfil triangular com as transversinas do módulo central. Por fim, as regiões 5 e 6 correspondem ao conjunto de fixação dos eixos traseiro e dianteiro ao chassi.

Tabela 6 – Tensão máxima nos pontos de estudo.

Simulação	Região	$\sigma_{\max}$ (MPa)	
		Aço estrutural	Compósito de fibra de carbono
Sem passageiros	Região 1	17,7	14,4
	Região 2	32,2	27,4
	Região 3	62,9	39,8
	Região 4	11,4	10,9
	Região 5	50,4	37,4
	Região 6	82,2	74,7
2 passageiros na dianteira	Região 1	18,3	21,0
	Região 2	38,7	37,4
	Região 3	76,9	53,4
	Região 4	27,1	27,5
	Região 5	61,1	49,4
	Região 6	211,0	261,0
2 passageiros na traseira	Região 1	50,2	47,8
	Região 2	85,1	93,8
	Região 3	164,5	157,6
	Região 4	15,0	20,4
	Região 5	132,5	129,6
	Região 6	93,7	90,3
4 Passageiros	Região 1	50,7	54,5
	Região 2	91,6	103,8
	Região 3	178,6	151,0
	Região 4	31,3	37,7
	Região 5	143,1	141,8
	Região 6	222,4	275,7

Fonte: Próprio autor.

Em que, $\sigma_{\max}$, corresponde a tensão máxima em cada região.

Com os dados da tabela acima, fica claro que as tensões máximas em qualquer uma das regiões ou casos não ultrapassa o limite de escoamento do aço nem o limite de resistência a tração da fibra de carbono.

Na condição “sem passageiros”, para ambos os materiais, os esforços se concentraram mais nas regiões 3, 5 e 6, nas transversinas de apoio dos eixos dianteiros e traseiros e no contato das longarinas centrais com o módulo central. Os valores calculados para a estrutura em aço foram maiores em todas as regiões, com destaque para as regiões 3 e 5, cuja discrepância de valores foi maior.

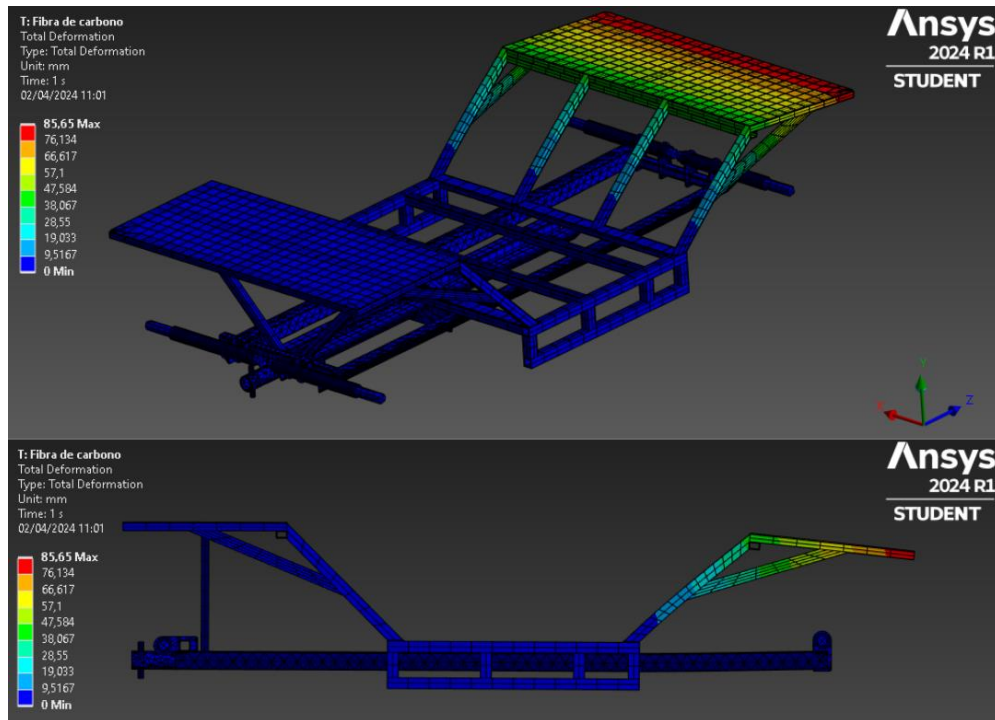
Com 2 passageiros na dianteira, os esforços também se concentraram mais nas regiões 3, 5 e 6, com um aumento na região 4 observado para a estrutura de aço. Embora com comportamento similar, nesta condição, houve regiões em que os níveis de tensão foram maiores para a fibra de carbono, como visto nas regiões 1 e 6, o que ocorre devido a nova distribuição de massa do conjunto estrutura-passageiros, com centro de massa mais próximo da dianteira, que fez com que aumentasse a força aplicada nos eixos dianteiros.

Com 2 passageiros na traseira, os esforços se concentraram mais nas regiões 2, 3, 5 e 6, com elevado crescimento na região 3 em ambos os materiais. Nesta condição, houve regiões em que os níveis de tensão foram maiores para a fibra de carbono, como visto nas regiões 2 e 4, o que ocorre devido a nova distribuição de massa, com centro de massa mais próximo da traseira, que fez com que aumentasse a força aplicada nos eixos traseiros. Diferente das simulações anteriores, a região mais crítica passou a ser a região 3.

Por fim, na condição de 4 passageiros, os esforços se concentraram mais nas regiões 3, 5 e 6, porém, com elevado crescimento nas demais regiões para ambos os materiais. Nesta condição, houve regiões em que os níveis de tensão foram maiores para a fibra de carbono, como visto nas regiões 2, 4 e 6. Nota-se que, nos dois estudos, dentre as regiões selecionadas, a região 4 é a que tem menor acúmulo de tensões.

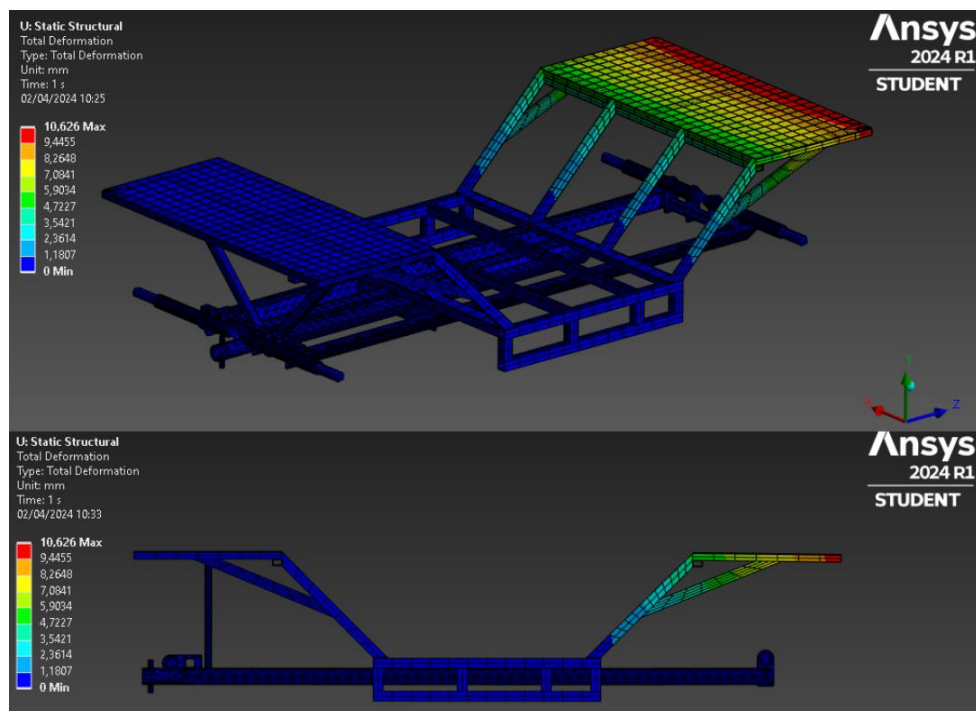
A segunda análise feita nas estruturas, aplicando carga nos assentos, foi realizada apenas na condição mais crítica (4 passageiros). Assim, nas Figuras 47 e 48 estão os resultados das simulações de deformação da estrutura e nas Figuras 49 e 50 os resultados de tensão para os dois materiais.

Figura 47 – Deformação total com forças aplicadas nos assentos da estrutura em Fibra de carbono com 4 passageiros.



Fonte: Próprio autor.

Figura 48 – Deformação total com forças aplicadas nos assentos da estrutura em aço estrutural com 4 passageiros.

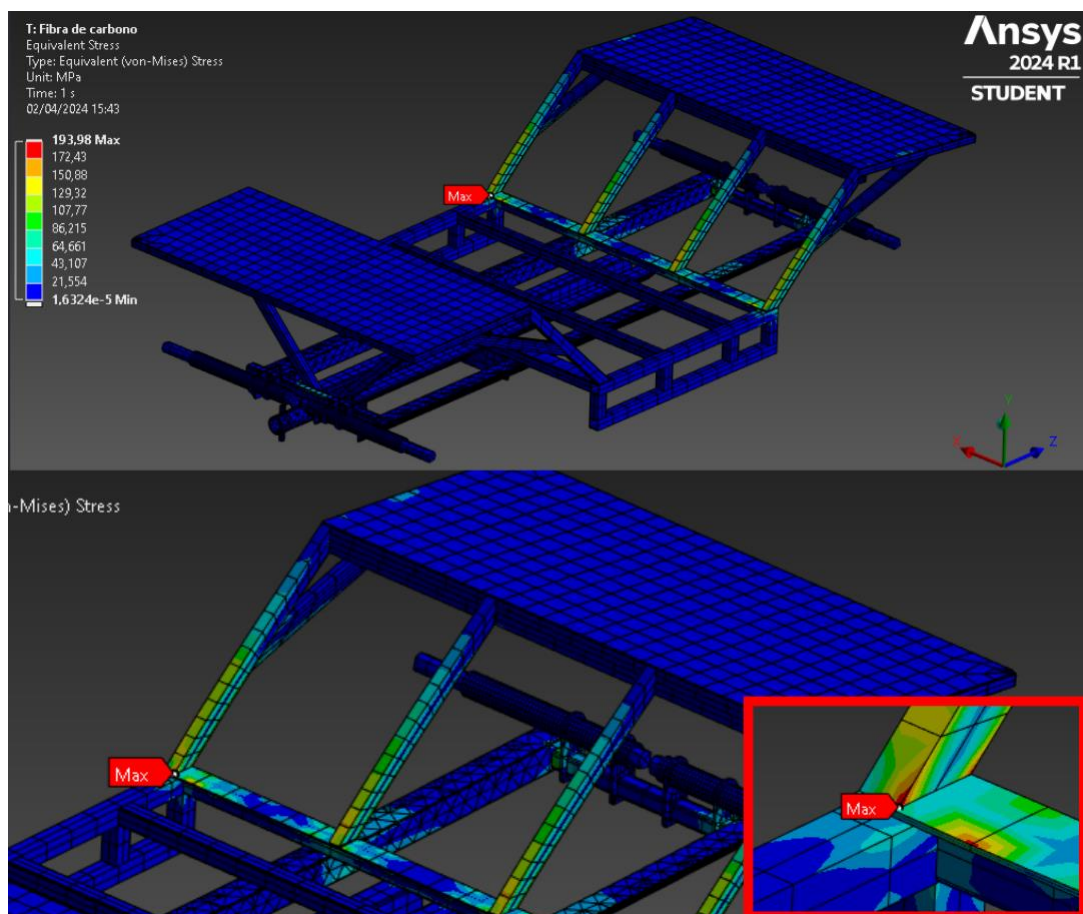


Fonte: Próprio autor.

Ambas as figuras apresentadas estão em escala real para melhor comparativo. Para estrutura em fibra de carbono, no caso mais crítico, em sua maior extensão, a estrutura apresenta deformações que variam entre 0 e 9,52 mm, porém na região da traseira, a deformação máxima chega a aproximadamente 85,65 mm. Os pontos indicados com as cores mais quentes, a deformação é visivelmente acentuada, influenciando na inclinação dos assentos.

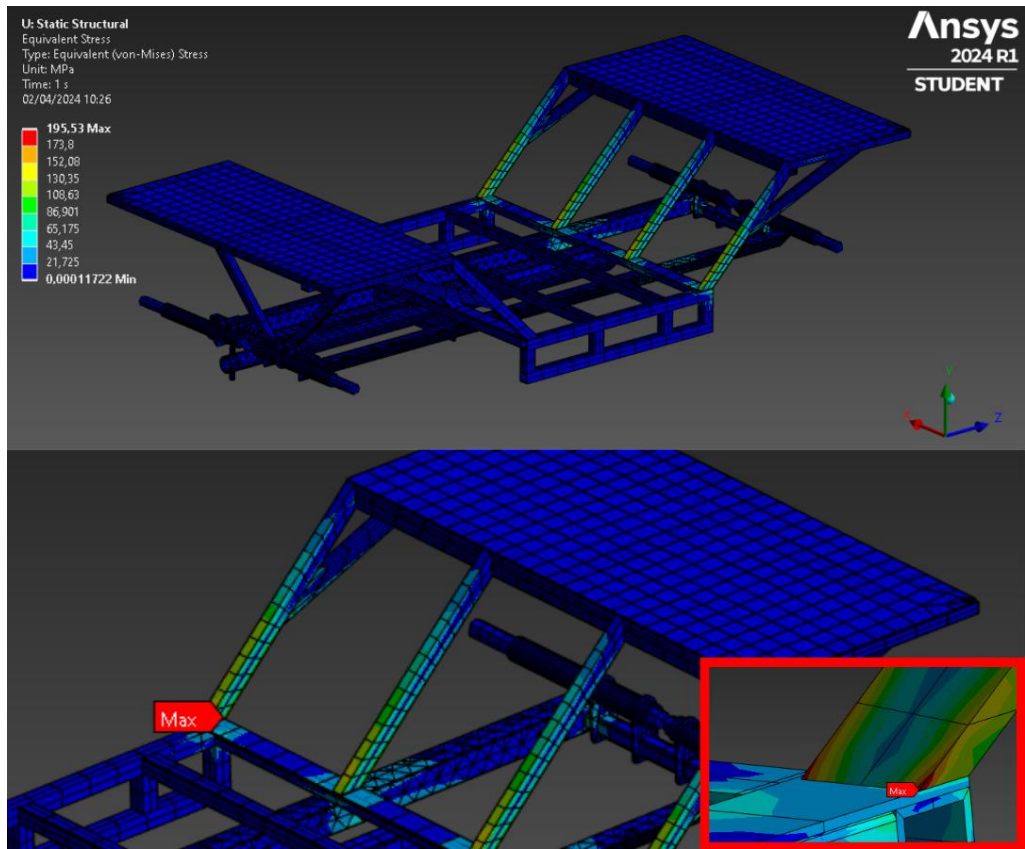
Já para estrutura em aço estrutural, no caso mais crítico, observa-se que a deformação máxima é expressivamente menor (8,06 vezes). Em sua maior extensão, a estrutura continua sem sofrer grandes deformações (entre 0 e 1,18 mm), exceto na região da traseira em que a deformação máxima chega a aproximadamente 10,63 mm.

Figura 49 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos assentos da estrutura em fibra de carbono com 4 passageiros.



Fonte: Próprio autor.

Figura 50 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos assentos da estrutura em aço estrutural com 4 passageiros.



Fonte: Próprio autor.

Para esse segundo estudo, foram coletadas as tensões máximas nas regiões ilustradas na Figura 46 e seus valores podem ser vistos na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 – Tensão máxima nos pontos de estudo para as simulações com esforços nos assentos.

Simulação	Região	σ_{max} (MPa)	
		Aço estrutural	Compósito de fibra de carbono
4 Passageiros	Região 1	12,1	7,5
	Região 2	195,5	194,0
	Região 3	125,2	127,6
	Região 4	10,5	11,1
	Região 5	102,7	130,9
	Região 6	52,3	62,5

Fonte: Próprio autor.

Para os dois materiais, os esforços se concentraram mais nas regiões 2, 3 e 5, com as tensões mais altas na conexão do módulo traseiro com o módulo central, representado pela região 5. Os resultados obtidos indicam níveis baixos de tensão na maior parte estrutura e os valores foram próximos em ambos os estudos.

A localização da região de concentração de tensões e os níveis de deformação na traseira podem ser atribuídos a ausência de apoio do módulo traseiro nas longarinas centrais. Isso faz com que haja um maior momento e os níveis de tensão aumentem nos pontos indicados com as cores mais quentes nas Figuras 49 e 50. A diferença é notória quando se compara com o observado na fixação do módulo dianteiro, visto que existem tubos que apoiam as longarinas centrais e aumentam a rigidez nessa região.

Na Tabela 8, estão apresentados os valores de tensão e deformação máximos para os estudos com esforços nos eixos e nos assentos em ambos os materiais.

Tabela 8 – Valores de tensão e deformação máximos.

Simulações	$\sigma_{\max}$ (MPa)		Deformação máxima (mm)	
	Aço estrutural	Compósito de fibra de Carbono	Aço estrutural	Compósito de fibra de Carbono
1 - Força nos eixos	222,4	275,7	5,57	33,90
2 - Força nos assentos	195,5	194,0	10,63	85,62

Fonte: Próprio autor.

Como observado nas figuras e pelos dados da tabela acima, fica claro que as tensões máximas não ultrapassam o limite de escoamento do aço estrutural nem a tensão de ruptura da fibra de carbono e, portanto, não indica deformação plástica nem falha nas estruturas na situação mais crítica do estudo estático.

Os fatores de segurança das estruturas de aço estrutural e fibra de carbono com base no limite de escoamento do aço, 350 MPa, e limite de resistência a tração da fibra de carbono, 3550 MPa, foram respectivamente 1,57 e 12,88. Desse modo, ambas as estruturas respeitam a condição de integridade de fator de segurança mínimo de 1,5.

As deformações foram altas para as estruturas em ambos os materiais, com deformações máximas de 10,63 mm para o aço estrutural e 85,62 mm para fibra de carbono, e deformações elásticas equivalentes máximas (ϵ) de aproximadamente 0,002 mm/mm e 0,015 mm/mm respectivamente. Visto que os limites de deformação elástica para a fibra de carbono e aço estrutural são respectivamente 0,015 mm/mm e 0,002 mm/mm, foi atingindo o limite para ambos os materiais. Devido a elevada deformação, a estrutura não atende ao critério de rigidez. Logo, modificações devem ser propostas na estrutura para que ela atenda aos dois critérios.

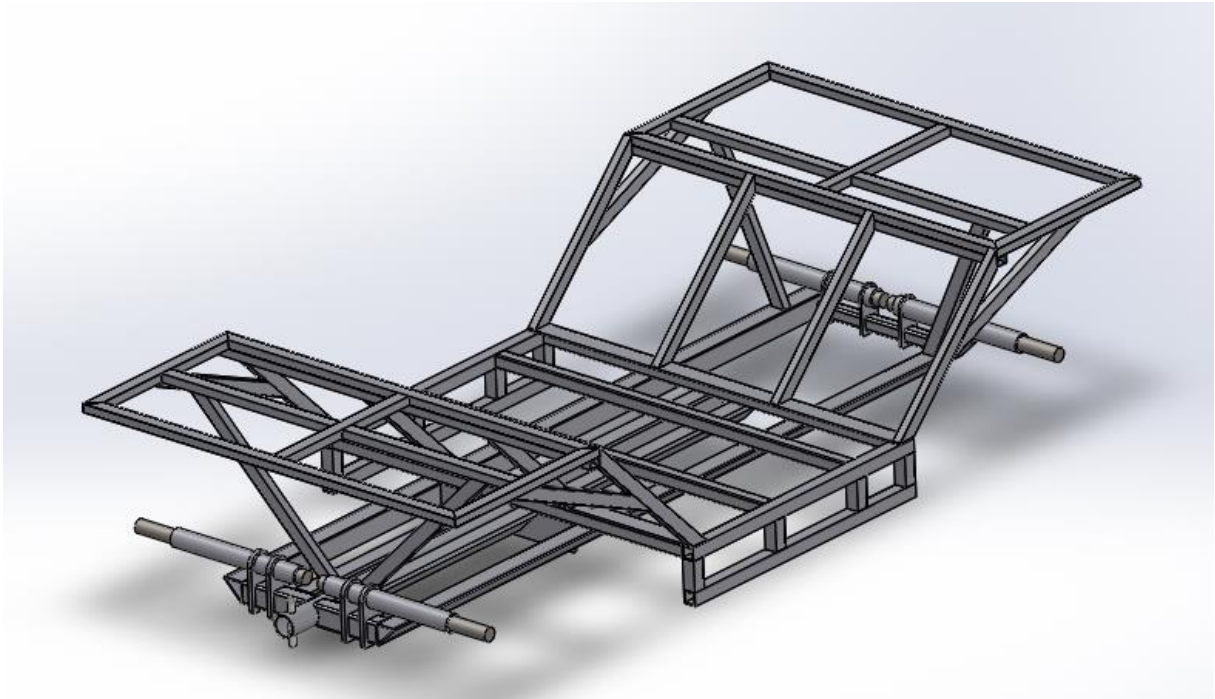
4.3. MODIFICAÇÕES NO CHASSI

Decorrente do abordado na seção anterior, ou seja, do número de passageiros que a carruagem suporta, as condições de contorno atribuídas e os resultados obtidos, estudou-se a realização de modificações no projeto do chassi. Essas modificações visam deixar a estrutura melhor dimensionada, com um fator de segurança mínimo de 1,5, aprovando a estrutura na condição de integridade e com deslocamentos menores atendendo a condição de rigidez.

A modificação do projeto estudada consistiu em uma modificação da estrutura, com a alteração de posicionamento e inclusão de elementos estruturais do chassi, assim como leves alterações nos perfis de alguns tubos, visando aumentar sua rigidez e reduzir a tensão em pontos concentradores. Tais mudanças acarretam a alteração da massa do chassi e da posição do seu centro de massa. Logo, os cálculos das forças de entrada aplicadas nas simulações serão refeitos para o novo modelo.

Tendo em vista que o estudo do comportamento da estrutura com a alteração de carga já foi apresentado no modelo inicial e o objetivo é atender a situação mais crítica de uso da carruagem, as simulações serão realizadas apenas na condição de 4 passageiros. Quanto as modificações na estrutura, a alteração proposta nesse trabalho consistiu em adicionar dois tubos de travamento entre longarinas principais e o módulo traseiro, alterar a posição da transversina do eixo dianteiro, assim como seu perfil de tubo e os fixadores dos eixos. A nova estrutura foi modelada no sobre o modelo inicial do chassi no software Solidworks® e simulada no Ansys Student conforme já apresentado. Dado o exposto, na Figura 51, a seguir, será apresentada a nova configuração do chassi.

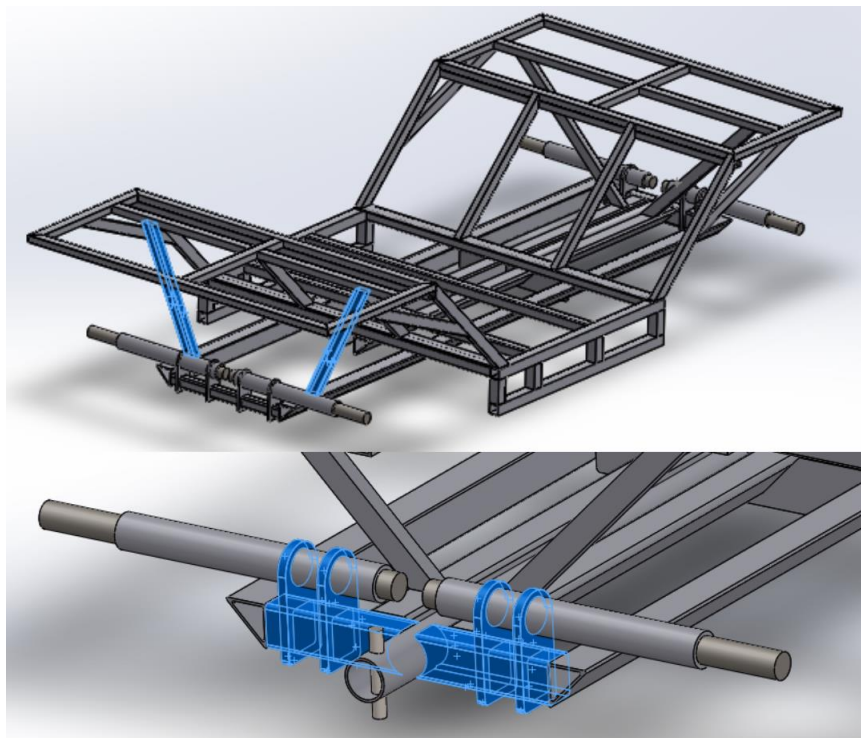
Figura 51 – Configuração estrutural do chassi modificada.



Fonte: Próprio autor.

As alterações mencionadas estão destacadas e azul na Figura 52, a seguir.

Figura 52 – Correções no modelo do chassi.



Fonte: Próprio autor.

Essas modificações ocasionaram uma pequena alteração da posição do centro de massa da estrutura e consequentemente da força de entrada em cada uma das rodas. Os novos valores de força de entrada nos eixos das rodas, em Newtons, podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9 – Forças de entrada nos eixos de roda da carruagem corrigida.

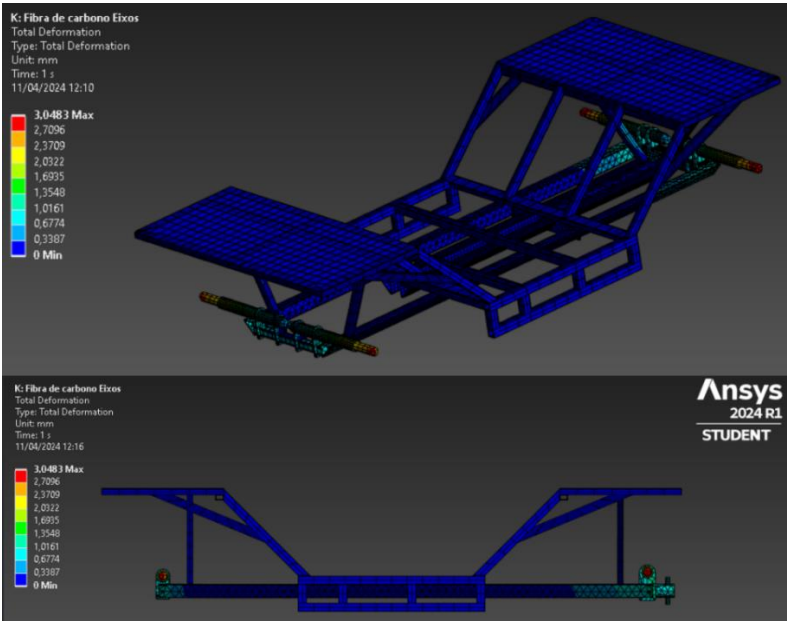
Forças nas rodas (N)		Material da estrutura	
		Aço estrutural	Compósito de fibra de carbono
4 passageiros	D _E	1124	967
	D _D	1124	967
	T _E	1188	1043
	T _D	1188	1043

Fonte: Próprio autor.

Em que D_E corresponde a roda dianteira esquerda, D_D a roda dianteira direita, T_E a roda traseira esquerda e T_D a roda traseira direita. As Figuras 53 a 60, apresentam os resultados das simulações das estruturas de fibra de carbono e estrutura em aço estrutural.

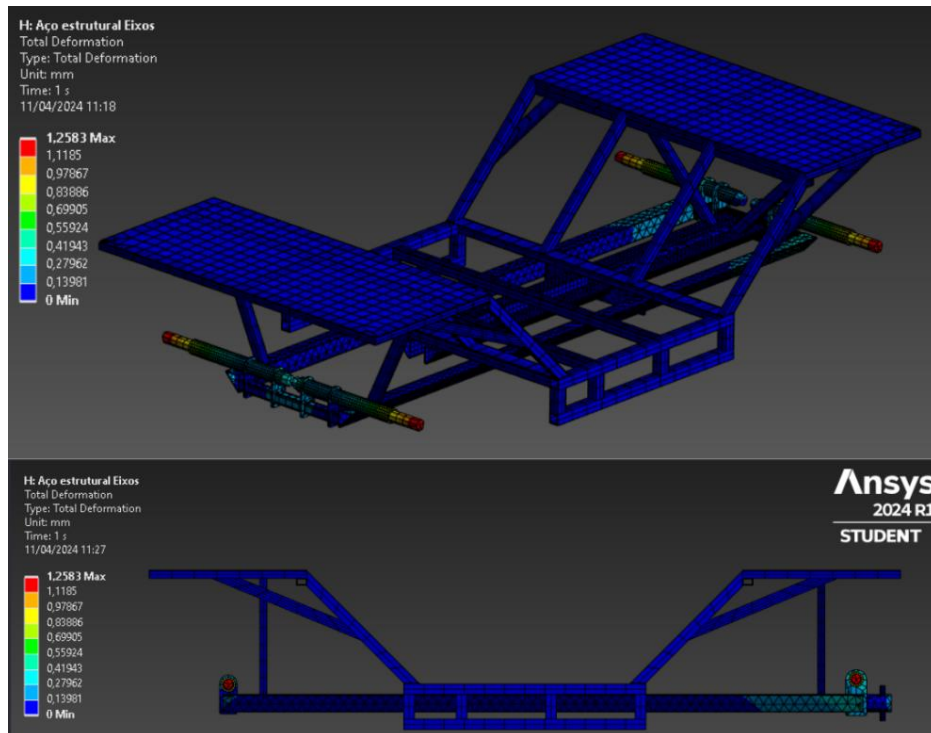
Simulação das forças aplicadas nos eixos das rodas:

Figura 53 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura corrigida em fibra de carbono.



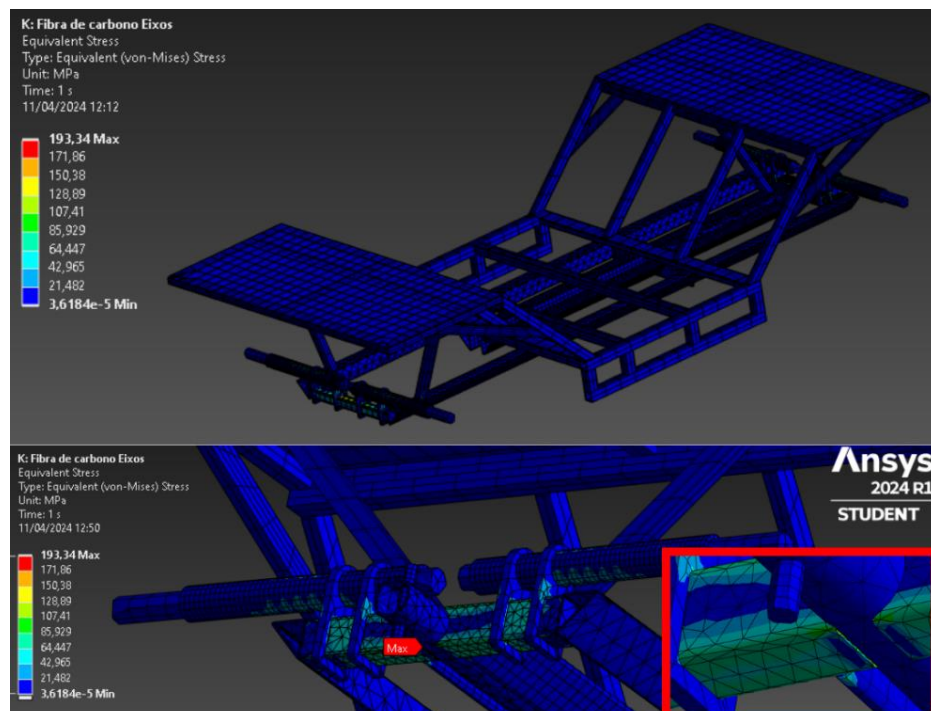
Fonte: Próprio autor.

Figura 54 – Deformação total com forças aplicadas nos eixos da estrutura corrigida em aço estrutural.



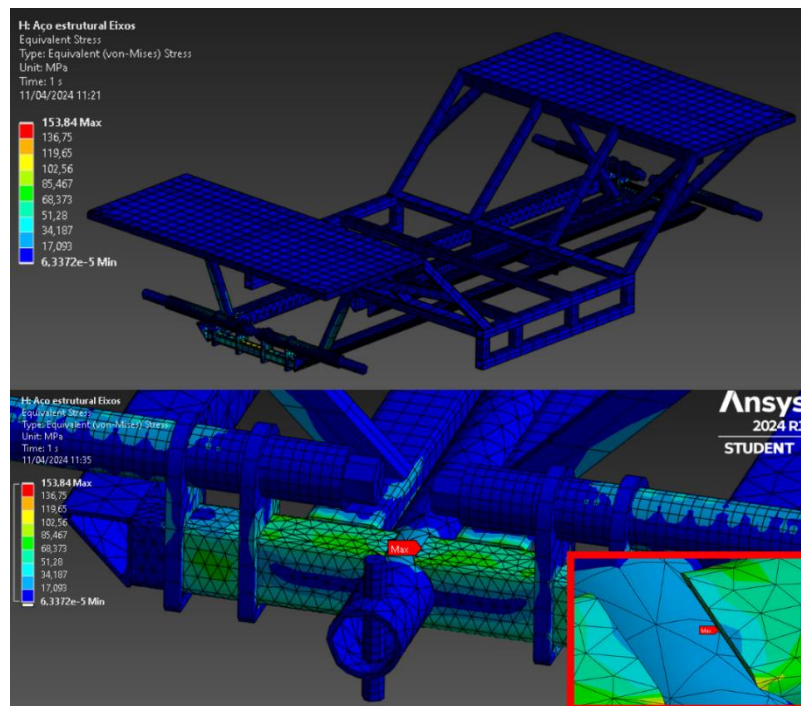
Fonte: Próprio autor.

Figura 55 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura corrigida em fibra de carbono.



Fonte: Próprio autor.

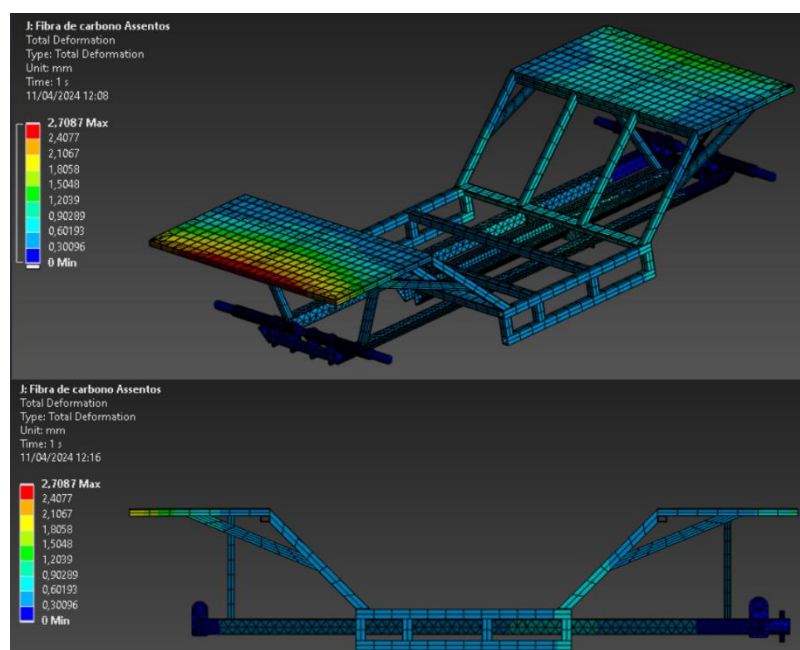
Figura 56 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos eixos da estrutura corrigida em aço estrutural.



Fonte: Próprio autor.

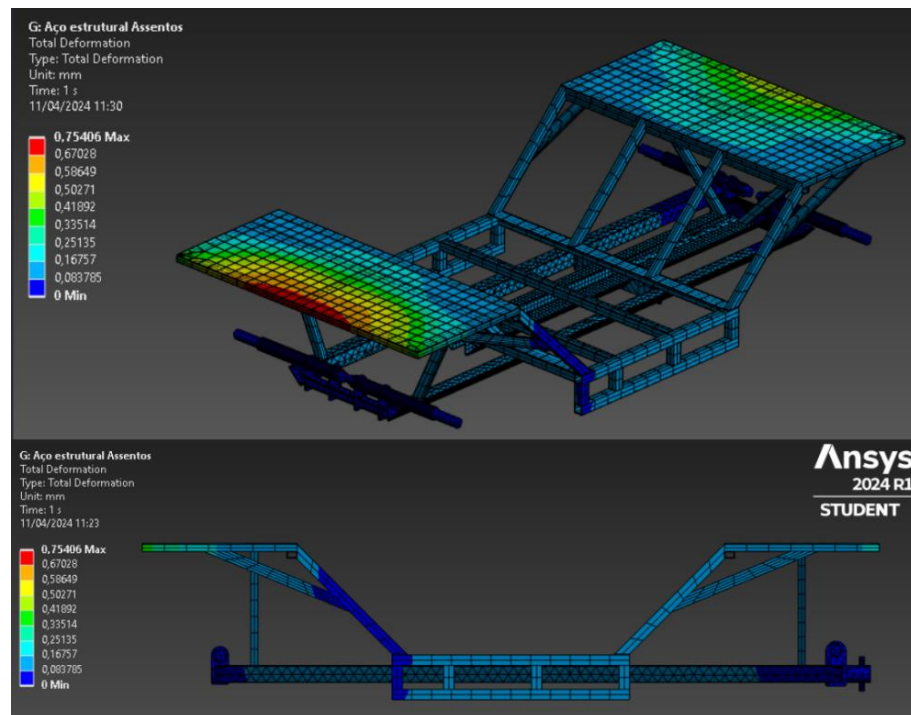
Simulação das forças aplicadas nos assentos:

Figura 57 – Deformação total com forças aplicadas nos assentos da estrutura corrigida em fibra de carbono.



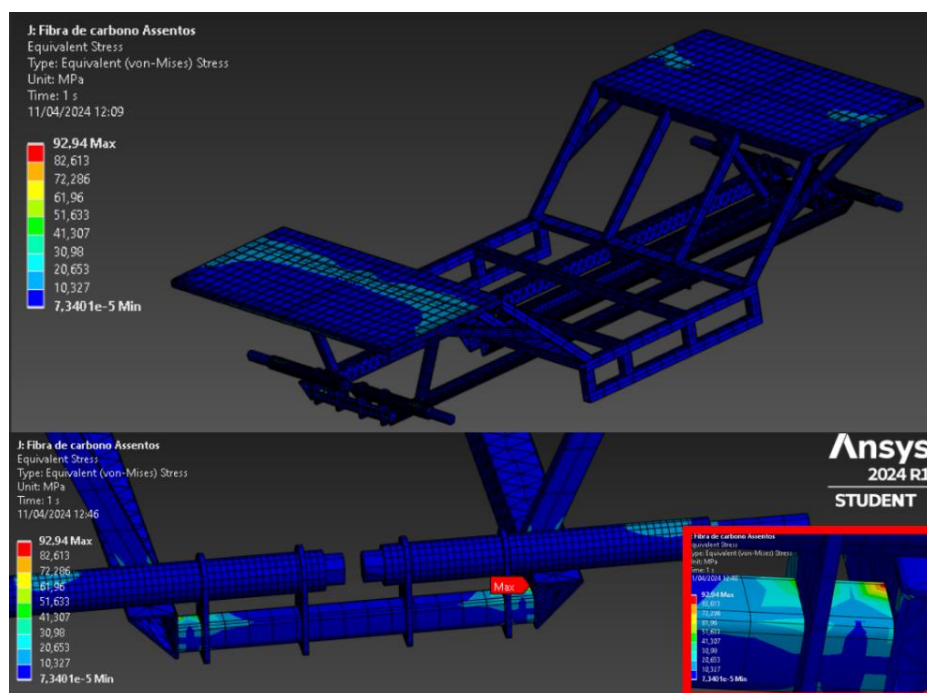
Fonte: Próprio autor.

Figura 58 – Deformação total com forças aplicadas nos assentos da estrutura corrigida em aço estrutural.



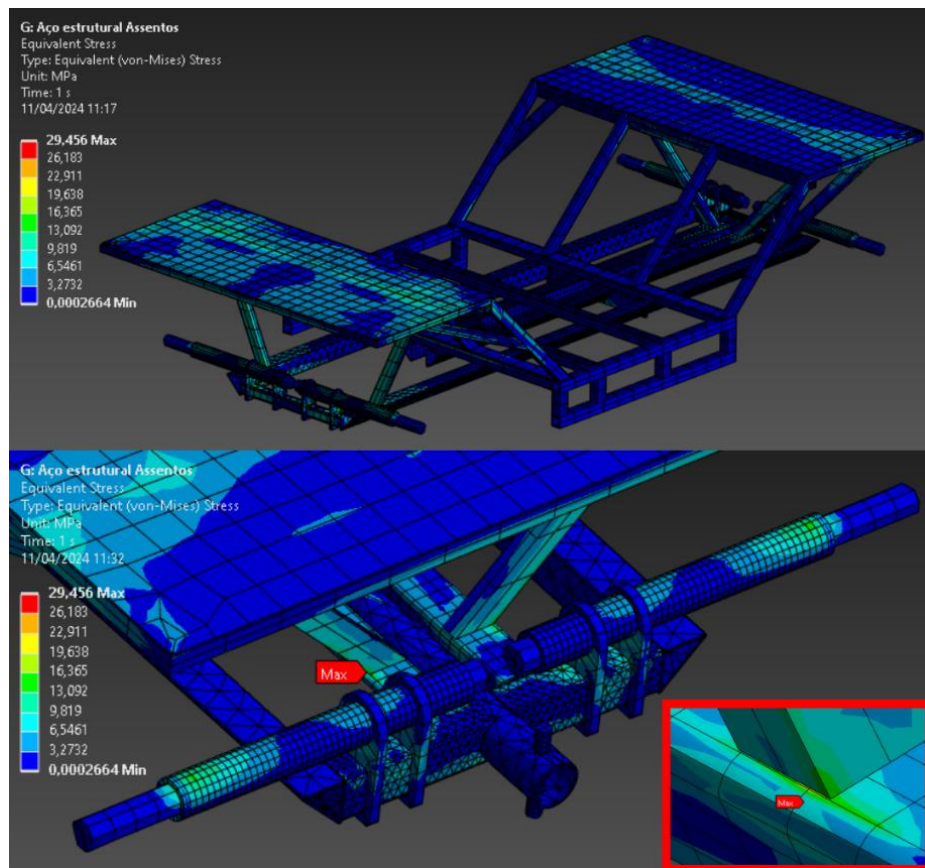
Fonte: Próprio autor.

Figura 59 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos assentos da estrutura corrigida em fibra de carbono.



Fonte: Próprio autor.

Figura 60 – Tensão equivalente (Von-misses) com forças aplicadas nos assentos da estrutura corrigida em aço estrutural.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 10, estão apresentados os valores de tensão e deformação máximos para cada estudo apresentado no modelo corrigido.

Tabela 10 – Valores de tensão e deformação máximos para estrutura corrigida.

Simulações	$\sigma_{\max}$ (MPa)		$u_{\max}$ (mm)	
	Aço estrutural	Compósito de fibra de carbono	Aço estrutural	Compósito de fibra de carbono
1 - Força nos eixos	153,84	193,34	1,26	3,05
2 - Força nos assentos	29,46	92,94	0,75	2,71

Fonte: Próprio autor.

Em que, $u_{\max}$ corresponde a deformação máxima na estrutura.

Conforme apresentado nas figuras e nos dados da tabela acima, fica claro que as tensões máximas não ultrapassam os limites de escoamento do aço estrutural, nem atingem o limite de resistência a tração da fibra de carbono. Logo, indica ausência de deformação plástica e de falha na estrutura na situação mais crítica do estudo estático.

As Tabelas 11 e 12, a seguir, quantificam os resultados das modificações comparados com o mesmo caso na estrutura anterior.

Tabela 11 – Comparação da tensão máxima entre as estruturas.

Simulações		$\sigma_{1\max}$ (MPa)	$\sigma_{2\max}$ (MPa)	% de redução
Aço estrutural	1 - Força nos eixos	222,40	153,84	31%
	2 - Força nos assentos	195,50	29,46	85%
Compósito de fibra de carbono	1 - Força nos eixos	275,70	193,34	30%
	2 - Força nos assentos	194,00	92,94	52%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Comparação da deformação máxima entre as estruturas.

Simulações		$u_{1\max}$ (mm)	$u_{2\max}$ (mm)	% de redução
Aço estrutural	1 - Força nos eixos	5,57	1,26	77%
	2 - Força nos assentos	10,63	0,75	93%
Compósito de fibra de carbono	1 - Força nos eixos	33,90	2,40	93%
	2 - Força nos assentos	85,62	2,71	97%

Fonte: Próprio autor.

Em que, $\sigma_{1\max}$ e $u_{1\max}$ correspondem respectivamente a tensão máxima de Von Misses e a deformação máxima na estrutura inicial e $\sigma_{2\max}$ e $u_{2\max}$, correspondem respectivamente a tensão máxima de Von Misses e deformação máxima na estrutura modificada.

Os dois materiais apresentaram redução significativa dos valores de tensão após a implementação das alterações. Os fatores de segurança das estruturas de aço estrutural e fibra de carbono foram respectivamente 2,28 e 18,36. Nessa condição, ambas as estruturas respeitam a condição de integridade de fator de segurança mínimo de 1,5, estando superdimensionada a estrutura de fibra de carbono.

A redução da deformação máxima foi ainda maior, variando entre 77% e 97% para os casos estudados. Desse modo, com deformações máximas de 1,26 mm para

o aço estrutural e 2,71 mm para fibra de carbono, e deformações elásticas equivalentes máximas (ϵ) iguais a 0,0009 mm/mm e 0,0037 mm/mm respectivamente, a estrutura passa a atender também ao critério de rigidez para ambos os materiais.

5 CONCLUSÃO

Através das análises realizadas nesse trabalho, ficou evidente a importância da análise estática no desenvolvimento de projetos mecânicos como a carruagem da alegria. Através desse estudo, no qual foi obtido o comportamento estático em diferentes condições de carga da estrutura de um ciclo-riquixá, cujo modelo foi construído no software solidworks®, e o método dos elementos finitos aplicado através do software Ansys®, foi possível compreender também a importância da escolha correta da matéria prima de um projeto. Ademais, esse tipo de estudo se mostra de extrema relevância ao poupar tempo e dinheiro investidos em prototipagem que pode ser otimizado em uma estrutura mais assertiva.

Logo, a análise estática realizada é uma etapa muito importante na validação do projeto. Aqui, foi explorado o comportamento da geometria estrutural proposta, similar a carruagem da alegria, variando-se o número de passageiros, sua distribuição nos assentos do meio de transporte e realizando um comparativo entre estruturas de fibra de carbono e aço estrutural. Assim, foi observado que o chassi simulado respondeu bem aos esforços aplicados em ambos os materiais. Os fatores de segurança obtidos foram 1,57 e 12,88 para o aço e fibra de carbono respectivamente respeitando o critério de integridade, com as tensões máximas obtidas sendo menores que o limite de escoamento de cada material e garantindo um fator de segurança mínimo de 1,5. Contudo, as deformações elevadas, 10,63 mm e 85,82 mm indicaram uma resposta ruim quanto da rigidez do modelo estudado.

Com a variação dos esforços devido ao número de passageiros e sua disposição nos assentos, conclui-se que os principais esforços estão nas transversinas que conectam as longarinas principais aos eixos de roda e nas regiões de conexão dos módulos dianteiro e traseiro com o módulo central.

Para a carruagem de fibra de carbono, nas condições “sem passageiros”, “2 passageiros na dianteira” e “4 passageiros”, a tensão máxima ocorreu na transversina do eixo dianteiro e a deformação máxima ocorreu no eixo traseiro. Na condição de “2 passageiros na traseira”, a tensão máxima ocorreu no módulo central, na conexão do módulo traseiro com as longarinas principais e o deslocamento máximo nos eixos traseiros.

Já para a carruagem de aço estrutural, nas condições “sem passageiros” e “4 passageiros”, a tensão máxima ocorreu na transversina do eixo dianteiro e a

deformação máxima ocorreu no eixo traseiro. Na condição de “2 passageiros na dianteira”, a tensão máxima ocorreu na transversina do eixo dianteiro e a deformação máxima ocorreu nos eixos dianteiros. Por fim, na condição de “2 passageiros na traseira”, a tensão máxima ocorreu no módulo central, na conexão do módulo traseiro com as longarinas principais e o deslocamento máximo nos eixos traseiros. Isso ocorre devido a variação da carga aplicada em cada uma das rodas de acordo com a distribuição de massa sobre a carruagem.

Embora tenha ocorrido proximidade nos valores de tensão obtidos na estrutura para ambos os materiais e valores satisfatórios, a estrutura em compósito de fibra de carbono (superdimensionada quanto a tensão) apresentou deslocamentos muito mais elevados. Essa deformação seria suficiente para alterar a inclinação dos assentos traseiros, prejudicando a ergonomia e reduzindo o conforto nos passeios. Assim, a qualidade da experiência foi comprometida pela falta de rigidez da estrutura na região traseira.

Dado o exposto, as modificações propostas para o chassi, de adição de travamentos entre as longarinas principais e o módulo traseiro e com a alteração da conexão dos eixos dianteiros com as longarinas principais, visaram redução de tensões na dianteira e aumento da rigidez na traseira do chassi. Os resultados obtidos foram positivos. O chassi respondeu bem aos esforços aplicados em ambos os materiais, com tensões máximas menores que o limite de escoamento do aço e o limite de resistência a tração da fibra de carbono. Os fatores de segurança obtidos foram 2,28 e 18,36 para o aço e fibra de carbono respectivamente, respeitando o critério de integridade. As deformações máximas reduziram substancialmente, passando para 1,26 mm e 2,71 mm indicando uma rigidez aceitável. Com essa melhoria significativa, promove-se mais segurança e conforto para o ciclo-riquixá.

Por fim, é fundamental destacar que, embora indispensável, a análise estática não é o único estudo que deve ser realizado em uma análise estrutural. Para respostas mais assertivas e concretas sobre o dimensionamento da estrutura, faz-se de grande valia que se realize também uma análise dinâmica sobre a estrutura de interesse. Ademais, ficam como sugestões para trabalhos futuros, a possibilidade de estender os estudos considerando a solda nas uniões dos tubos para estrutura em aço, e alterar os acoplamentos dos tubos da estrutura em compósito de fibra de carbono para maior caracterização do sistema, visto que não é um conjunto soldado. Também, faz-se de grande valia acrescentar ao estudo esforços devido a tração motriz do ciclo-riquixá.

REFERÊNCIAS

ALCOFORADO, F. As revoluções nos meios de transporte desde a pré-história à era contemporânea e sua evolução futura. Disponível em:

<<https://pt.linkedin.com/pulse/revolu%C3%A7%C3%B5es-nos-meios-de-transporte-desde-pr%C3%A9-hist%C3%B3ria-alcoforado>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

ASAP, C. T. O Envelhecimento da população. ASAP Saúde, 21 set. 2021.

Disponível em: <<https://asapsaude.org.br/jornada-de-gsp/o-envelhecimento-da-populacao/3672/>>. Acesso em: 16 abr. 2024

AZEVEDO, A. L. M. DOS S. IBGE - Educa | Jovens. Disponível em:

<<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18318-piramide-etaria.html>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

BERNARDES, P. H. O.; AVILA, S. M.; SHZU, M. A. M. Universidade de Brasília - UnB Faculdade UnB Gama - FGA Curso de Engenharia Automotiva. Monografia—Brasília: Universidade de Brasília, 2015.

CANUT, F. A. Análise estrutural do chassi de um veículo fórmula SAE pelo método de elementos finitos. Projeto de Graduação—Brasília: Universidade de Brasília, 28 nov. 2014.

CHANDRA, M. R.; SREENIVASULU, S.; HUSSAIN, S. A. Modeling and Structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections. v. 2, n. 4, p. 7, 2012.

Ciclo-riquixá. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ciclo-riquix%C3%A1&oldid=67331681>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

FURTADO, D. Análise estrutural de chassi de veículos automotivos. Monografia—Brasília: Universidade de Brasília, 2013.

GILLESPIE, T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. USA: Society of Automotive Engineers Inc, 1992.

HAPPIAN-SMITH, J. An Introduction to Modern Vehicle Design. 1. ed. Woburn: Butterworth Heinemann, 2002.

IGOR, R. Empty Yellow Pedicab Rickshaw Bicycle On The Old Medieval Stone Bridge. Disponível em: <<https://www.istockphoto.com/br/foto/bicicleta-pedicab-rickshaw-%C3%A0-espera-de-turista-gm1344897101-423120077>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

KAWANAMI, S. Riquixá: O meio de transporte que surgiu no Japão durante o Período Meiji | Curiosidades do Japão. Disponível em:

<<https://www.japaoemfoco.com/riquixa-o-meio-de-transporte-que-surgiu-no-japao-durante-o-periodo-meiji/>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

LEBRÃO, G. Fibra de Carbono. Revista Plástico Sul, p. 3, out. 2008.

LIMA, V. F.; ARRUDA, F. N.; GUERRA, K. K. A temática da acessibilidade às pessoas com deficiência no sistema de transporte público urbano de Fortaleza. p. 7, [s.d.].

Materiais Compósitos. E-Disciplinas USP. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4141306/mod_resource/content/1/PMT3100_2017-Un19-Compositos-v4.0.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2024.

NOORBHASHA, N. Computational analysis for improved design of an SAE BAJA frame structure. Dissertação—Las Vegas: University of Nevada, dez. 2010.

OLIVEIRA, F. C. G. DE. Contribuição ao desenvolvimento de uma estrutura veicular tipo spaceframe usando o método dos elementos finitos e métodos heurísticos de otimização numérica. Dissertação—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 27 abr. 2007.

OLIVEIRA, L. C. DE et al. Propriedades mecânicas de um compósito de fibra de carbono e aramida considerando diferentes condições de fabricação. Revista de engenharia e tecnologia, v. 12, n. 1, 18 mar. 2020.

Painel de Indicadores – PNS. 2021. Disponível em: <<https://www.pns.iciet.fiocruz.br/painel-de-indicadores-mobile-desktop/>>. Acesso em: 16 abr. 2024

QUEIROZ, E. F. N. Estudo de rigidez torcional em um chassi space frame do tipo Baja SAE. Trabalho de Conclusão de Curso—Amazonas: Universidade do Estado do Amazonas, 10 dez. 2018.

RAO, S. S. The Finite Element Method in engineering. 4. ed. [s.l: s.n.].

SHIGLEY, J. E.; MISCHEKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projeto de Engenharia Mecânica. 7. ed. Porto alegre: Bookman, 2005.

SOARES, F. S. et al. Desenvolvimento de um chassi automotivo para um veículo elétrico de pequeno porte. Revista de Iniciação Científica da ULBRA, v. 1, n. 10, 19 dez. 2012.

SOUZA, R. M. DE. O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Belém: Universidade Federal do Pará, maio 2003.

TEZA, R. V. Análise da proposta de modelo de bandeja de suspensão traseira em fibra de carbono para veículo BAJA. Trabalho de Conclusão de Curso—Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

Brasil, Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos (2004) Decreto Federal nº 5.296, Brasília, DF.

KAPP, E. Z. DALLEPIANE, B. Z. ASSMANN, J. Mobilidade urbana: Modais de transporte e sua evolução. Trabalho técnico científico – Ijuí: Colégio Tiradentes de Brigada Militar, 2017.