

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**PAULO CARLOS PASSOS SOUZA**

**PROJETO ADAPTATIVO DA ESTRUTURA METÁLICA DE UMA  
BICICLETA**

**GUARAPUAVA**

**2023**

**PAULO CARLOS PASSOS SOUZA**

# **PROJETO ADAPTATIVO DA ESTRUTURA METÁLICA DE UMA BICICLETA**

*ADPTIVE DESIGN OS THE METALLIC STRUCTURE OF A BICYCLE*

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. David Lira Nuñez.

**GUARAPUAVA**

**2023**



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

**PAULO CARLOS PASSOS SOUZA**

**PROJETO ADAPTATIVO DA ESTRUTURA METÁLICA DE UMA  
BICICLETA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 22/06/2023

---

Professor Dr. David Lira Nuñez  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Professor Dr. Carlos Bernardo Gouvêa Pereira  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Professor Dr. Marcos Gonçalves Júnior  
Doutor  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**GUARAPUAVA**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar Deus por iluminar meus caminhos e me dar força para realizar meus sonhos.

Um agradecimento de forma especial ao meu pai e minha mãe, por todo o apoio e todo o sacrifício que fizeram para a realização do meu sonho, desde o início sempre me apoiaram e não mediram esforços para que fosse possível eu realizar, em toda minha vida estiveram ao meu lado e principalmente na minha formação, eles são minha base e o suporte indispensável para a realização deste trabalho, e aqui apresento minha gratidão. Agradeço ao meu irmão por sempre estar ao meu lado e me apoiar.

Aos meus amigos que sempre me motivaram e fizeram essa jornada melhor, mesmo longe, sempre deram um jeito de estarem presentes. E também os amigos que fiz durante minha graduação que serão para o resto da vida.

Gostaria de registrar também um agradecimento a minha namorada, que esteve presente na minha jornada, sempre me apoiando e sendo meu porto seguro.

Agradeço a Actus, por toda a experiência, conhecimentos e amizades que me foram proporcionados, o profissional que me tornei, grande parte é devido a Actus.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. David Lira Nuñez, por me guiar nessa trajetória desde o início da graduação, minha jornada na Actus e agora no trabalho de conclusão de curso.

## RESUMO

Este trabalho descreve um projeto adaptativo de uma estrutura metálica de alumínio 6061-t6 para bicicleta de montanha. O projeto foi desenvolvido com base no modelo original, que apresentou problemas de fratura. O objetivo do projeto adaptativo é identificar a causa raiz da falha e propor medidas para eliminá-la ou mitigá-la, utilizando a metodologia DFMEA. O escopo do projeto segue as diretrizes da Norma SAE J1739, começando com a criação de uma árvore de projeto e a elaboração do DFMEA, utilizando análises analíticas e numéricas. Para isso, foram utilizadas ferramentas CAD para modelagem e simulações FEA em diferentes cenários propostos pelo autor, a fim de compreender o comportamento da estrutura durante o uso. Simulações estáticas foram realizadas para obter a tensão máxima de Von Mises e validar a ocorrência de fratura dúctil. Para uma possível fratura por fadiga, o valor obtido foi comparado com uma estimativa da resistência limite de fadiga calculada pela equação de Marin. Os resultados indicaram que o cenário em que a roda traseira toca primeiro o solo e a carga é aplicada apenas no eixo dianteiro é o mais crítico para a região da falha. No entanto, a falha não foi causada por um erro de projeto, mas sim pelo processo de fabricação. Foram identificadas as possíveis causas da falha relacionadas ao processo de fabricação, e o DFMEA foi aplicado para otimizar a identificação da causa raiz de falhas em quadros de bicicleta.

Palavras-chave: bicicleta de montanha; simulação estática; DFMEA; equação de Marin.

## ABSTRACT

This study presents an adaptive project of a 6061-t6 aluminum alloy metal structure for a mountain bike. The project was developed based on the original model, which experienced fracture failure. The objective of the adaptive project is to identify the root cause of the design failure and propose actions to eliminate or mitigate the problem, using the DFMEA methodology. The project scope follows the guidelines of SAE J1739 Standard, starting with the creation of a design tree and the development of DFMEA with analytical and numerical analysis actions. CAD tools were used for modeling, and FEA simulations were conducted under different scenarios proposed by the author to understand the structure's behavior during usage. Static simulations were performed to obtain the maximum Von Mises stress in order to validate the occurrence of ductile fracture. For fatigue fracture, the obtained value was compared with the fatigue limit stress calculated using the Marin equation. The results of the study indicated that the scenario where the rear wheel touches the ground first and the load is applied only on the front axle is the most critical for the failure region. However, the failure was not caused by a design error but by the manufacturing process, which was rectified through simulations applying a force 30 times greater than the combined weight of the cyclist and bike. Possible causes of the failure arising from the manufacturing process were identified, and DFMEA was employed to optimize the root cause identification process for bike frame failures.

Keywords: mountain bike; static simulation; DFMEA; Marin equation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – DFMEA norma SAE J1739.....	21
Figura 2 – Impacto vertical .....	29
Figura 3 – Estágios da fratura .....	31
Figura 4 – Fator modificador de condição de superfície.....	35
Figura 5 – Fator de modificador de tamanho.....	36
Figura 6 – Diâmetro efetivo .....	36
Figura 7 – Fator Modificador de Carga.....	36
Figura 8 – Efeito da temperatura de operação .....	37
Figura 9 – Equação fator de temperatura diferente do ambiente .....	37
Figura 10 – Equação Fator de temperatura ambiente .....	38
Figura 11 – Efeito da confiabilidade .....	38
Figura 12 – Equação Fator de confiabilidade .....	38
Figura 13 – Nós e geometria.....	40
Figura 14 – Fluxo do Projeto .....	41
Figura 15 – Fluxo de Trabalho .....	42
Figura 16 – Local da falha evidenciado.....	43
Figura 17 – Apresentação da falha .....	44
Figura 18 – Dados geometria fornecidos .....	45
Figura 19 – Árvore de Projeto .....	48
Figura 20 – Considerações dimensionamento .....	52
Figura 21 – Centro de massa estimado .....	54
Figura 22 – Esboço .....	56
Figura 23 – Esboço 3D das dimensões macro do quadro.....	57
Figura 24 – Primeiro modelo de linhas.....	57
Figura 25 – Modelo Final de linhas .....	58
Figura 26 – Perfis para modelo .....	58
Figura 27 – Versão Final do gêmeo digital.....	59
Figura 28 – Treliza evidenciada .....	60
Figura 29 – Malha gerada .....	61

Figura 30 – Pontos de fixação.....	61
Figura 31 – Aplicação carga referente ao eixo traseiro .....	62
Figura 32 – Aplicação carga eixo dianteiro .....	63
Figura 33 – Resultado cenário 1 .....	64
Figura 34 – Resultado cenário 2 .....	64
Figura 35 – Resultado cenário 3 .....	65
Figura 36 – Resultado cenário 4 .....	66
Figura 37 – Resultado cenário 5 .....	66
Figura 38 – Destaque nó cenário 5 .....	67
Figura 39 – Resultado cenário 6 .....	68
Figura 40 – Destaque nó cenário 6 .....	68
Figura 41 – Resultado cenário 7 .....	69
Figura 42 – Resultado cenário 8 .....	69
Figura 43 – Resultado cenário 9 .....	70
Figura 44 – Resultados cenários propostos .....	71



## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do alumínio 6061 – T6 .....	18
Tabela 2 – Severidade norma SAE J1739 .....	24
Tabela 3 – Ocorrência norma SAE J1739.....	24
Tabela 4 – Detectabilidade norma SAE J1739.....	25
Tabela 5 – DFMEA.....	49
Tabela 6 – Ações recomendadas DFMEA .....	50
Tabela 7 – Estudos de caso .....	51
Tabela 8 – Coeficientes Equação de Marin.....	55
Tabela 9 – Nomenclatura tubos .....	59
Tabela 10 – Tabela de controle final .....	63
Tabela 11 – Resultados .....	70
Tabela 12 – Cenários propostos .....	71
Tabela 13 – Estratificação resultados cenários propostos .....	72
Tabela 14 – DFMEA V2 .....	73
Tabela 15 – Ações recomendadas DFMEA V2.....	76

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	Projeto Assistido por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Design</i> )
CAE	Engenharia Assistida por Computador (do inglês – <i>Computer-Aided Engineering</i> )
FMEA	Análise de Efeitos e Modos de Falhas (do inglês - <i>Failures Mode and Effect Analysis</i> )
RCM	Manutenção Centrada na Confiabilidade (do inglês - <i>Reliability Centered Maintenance</i> )
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
MTB	Bicicleta de montanha (do inglês – <i>Mountain bike</i> )
DFMEA	Análise dos Efeitos e Modos de Falha do Projeto (do inglês - <i>Design Failure Mode and Effects Analysis</i> )
$F$	Força
$m$	Massa
$a$	Aceleração
$v$	Velocidade
$v_0$	Velocidade Inicial
$t$	Tempo
$S$	Altura final
$S_0$	Altura Inicial
$S_e$	Limite de fadiga no local crítico
$S'_e$	Limite de fadiga de espécime de teste da viga rotativa
$k_a$	Fator de modificação de condição de superfície
$k_b$	Fator de modificação de tamanho
$k_c$	Fator de modificação de carga
$k_d$	Fator de modificação de temperatura
$k_e$	Fator de confiabilidade
$k_f$	Fator de modificação por efeitos variados
$S_{ut}$	Limite última a tração
$X$	Centro de Gravidade

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 JUSTIFICATIVA .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	14
1.2.1 Objetivos Gerais .....	14
1.2.2 Objetivos Específicos .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
2.2 CICLISMO .....	15
2.4 QUADROS DE BICICLETAS DE MONTANHA .....	15
2.5 MATERIAIS DOS QUADROS .....	15
2.5.1 Alumínio .....	16
2.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO EM QUADROS DE ALUMÍNIOS .....	18
2.6.1 Soldagem em Alumínio .....	18
2.7 NORMAS SAE J1739.....	20
2.8 TENSÕES E RESISTÊNCIAS.....	27
2.8.1 SOLICITAÇÕES DE CARGA .....	28
2.8.2 Fadiga .....	29
2.9 MÉTODOS DE ANÁLISE .....	32
2.9.1 Análise Experimental.....	32
2.9.2 Análise Analítica.....	33
2.9.3 Análise numéricas pelo Método dos Elementos Finitos .....	39
<b>3 ASPECTOS METODOLÓGICOS</b> .....	41
3.1 FLUXO DE TRABALHO .....	41
3.2 PLANEJAMENTO E ESCLARECIMENTO DA TAREFA.....	43
3.3 DESENVOLVIMENTO DE UM PRINCÍPIO DE SOLUÇÃO .....	45
3.4 DESENVOLVIMENTO DE ESTUDO SOB PONTO DE FALHA.....	46
3.5 DEFINIÇÃO DE MOTIVOS E PROCEDIMENTO PARA IDENTIFICAÇÃO.....	46
<b>4 CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</b> .....	47
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	80
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	81

## 1 INTRODUÇÃO

O ciclismo nos últimos anos se popularizou e com a pandemia do Covid-19 o esporte ganhou vários adeptos. A Associação Brasileira do Setor de Bicicletas realizou um levantamento junto às 40 empresas associadas, onde foi verificado um aumento de 118% nas vendas de bicicletas entre 15 de junho de 2020 e 15 de julho 2020, em relação ao mesmo período de 2019.

No ano de 2021 foram produzidas 465 mil unidades de mountain-bikes, sendo elas as mais fabricadas e a projeção para 2022 é um aumento de 17,4% na quantidade de bicicletas fabricadas, segundo Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares (Abraciclo).

Com o aumento produtivo repentino é importante que as empresas estejam com o setor de qualidade preparado para tal demanda para garantir a segurança dos usuários.

Nesse contexto, neste trabalho o modelo que será estudado é de uma marca que sofreu muitas falhas no ano de 2020 a 2022, cerca de 3% de sua produção apresentou trincas no mesmo local, segundo Pierre De Tarde (2022), gerente de desenvolvimento da Sense Bike.

A motivação deste trabalho é com relação ao grande número de falhas iguais encontradas nos quadros da marca, o que acarreta riscos para o atleta e o prejudica, pois com esse tipo de avaria, impossibilita o uso da bicicleta, e o acionamento da garantia é um processo demorado, o que gera um equipamento parado e inutilizável por um tempo indeterminado.

Um fator motivacional é que o autor possui um dos quadros que apresentou essa avaria. Dessa forma, a coleta de dados para análise estrutural fica mais acessíveis. Nesse contexto, o trabalho pretende abordar ferramentas relacionadas à análise de um produto usadas no desenvolvimento de projetos em Engenharia Mecânica, tais como: esforços em estruturas metálicas; Soldagem; Modelagem 3D; Simulação; Métodos análise na engenharia, entre outros.

Dentro os métodos de análise, o presente trabalho propõe o estudo de análise numérica, por meio da simulação computacional, não serão abordadas formas de análise experimental com o quadro da bicicleta e também não serão feitas análises analíticas, apenas equacionamentos afins de determinar variáveis. Assim, será realizado um estudo para levantar as possíveis causas raiz dessa falha.

No portal de reclamações ReclameAQUI os modelos do ano de 2020 e 2021 de alumínio são os principais modelos que apresentaram essa trinca e somente em dezembro de 2021 houve um pronunciamento da marca onde foi relatado que uns dos problemas foi um superaquecimento da solda em um dos processos de fabricação:

- Alteração dos tubos do *seat-stays*, para conectarem um pouco mais acima do tubo de selim, permitindo uma diferente posição da solda;
- As soldas da posição acima agora se encontram, tornando toda a área mais forte;
- A espessura do tubo de selim também foi aumentada, evitando fragilidade quando aplicada a solda e tratamentos térmicos;
- Também foram ajustados os parâmetros de solda e dos tratamentos térmicos T4 e T6;
- Instalação de um novo laboratório de testes para assegurar ainda mais a conformidade dos processos.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa tem como objetivo fundamentar, por meio da aplicação de ferramentas de análise de produtos mecânicos, os laudos emitidos sobre a causa da avaria na bicicleta mencionada. Essa documentação será essencial para a condução de estudos mais abrangentes relacionados às bicicletas.

Uma consultoria internacional da Universidade de Ciência e Tecnologia de Coimbra, em Portugal, já identificou uma única causa para o problema, porém essa conclusão demandou considerável tempo e investimento financeiro. Portanto, este trabalho tem como propósito investigar a causa raiz do problema, a fim de contestar a conclusão anterior. Caso a causa raiz seja confirmada, utilizaremos métodos numéricos e analíticos para comprovar sua validade, e também desenvolveremos métodos mais simplificados para solucionar esse tipo de problema, beneficiando assim fabricantes de quadros de bicicleta. Isso resultará em processos mais rápidos e econômicos, proporcionando vantagens tanto para os fabricantes quanto para os usuários da marca em questão.

## 1.2 OBJETIVOS

Para o correto entendimento da proposta que este trabalho pretende apresentar, são detalhados a seguir os objetivos geral e específicos.

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Identificar as possíveis causas de falha na fase de projeto do quadro de bicicletas e propor soluções no projeto original ou no processo de fabricação para mitigar ou eliminar avarias.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Alinhado ao objetivo principal, este trabalho tem alguns objetivos específicos principais, os quais são imprescindíveis para determinar as causas e propor soluções. Para alcançar o objetivo principal, esses objetivos específicos foram detalhados a seguir:

- Pesquisar projetos da estrutura de uma bicicleta de montanha;
- Aplicar a norma SAE J1739 como ferramenta para identificar modos de falha e sua causa raiz de projeto para quadros de bicicletas;
- Realizar análises de simulação e/ou analíticos para avaliar o estado do produto estudado;
- Definir planos de ação que eliminem ou mitiguem falhas em quadros de bicicleta.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é feita a revisão literária, abordando assuntos auxiliam na compreensão e entendimento do desenvolvimento do trabalho.

### 2.2 CICLISMO

O ciclismo surgiu a partir de 1890, foi nesta década que surgiram avanços na tecnologia da bicicleta, onde as competições acarretaram na motivação dos inventores em melhorar a velocidade e também o desempenho da pedalada. Foram desenvolvidos novos materiais, mais leves, mais rígidos e mais resistentes. Foi criada também a roda livre, sistema que permite que a pedalada não seja ininterrupta, o que gera descansos durante a pedalada em descidas ou trajetos com vento a favor.

Segundo Nabinger (2006) o desempenho dos ciclistas depende da técnica de pedalar, do preparo físico e do tipo de equipamento utilizado. O ciclismo é um esporte que utiliza a bicicleta e seu melhor desempenho depende de uma completa interação entre o ciclista e a bicicleta, pois consiste em uma modalidade totalmente técnica e competitiva.

### 2.4 QUADROS DE BICICLETAS DE MONTANHA

Calfee C. e David Kelly (2002), chegaram à conclusão que um quadro de bicicleta para ser ideal, para determinado ciclista, deveria se ajustar às suas dimensões antropométricas e ainda ser o mais leve possível e garantir rigidez, pois deve ter resistência mecânica para absorver as tensões que são empregadas no trajeto, permitir maior efetividade possível a partir da força empregada na pedalada, transformado em movimento. Além desses fatores, também suportar cargas contínuas, como impactos, torções e possuir acabamento atraente e resistente a corrosão (RIBEIRO, 2013).

### 2.5 MATERIAIS DOS QUADROS

O quadro é a estrutura central da bicicleta, na área de matérias houveram muitos avanços, existem diversos materiais que podem ser utilizados para os quadros,

sendo eles: aço, alumínio, fibra de carbono, titânio, polímeros e até madeira. Onde cada um tem suas peculiaridades e vantagens.

O aço foi um dos materiais mais utilizados na confecção de quadros, devido a ser baixo seu custo, e pela formação de ligas diferentes. Outra vantagem é que possui alta durabilidade, devido a sua rigidez, resistência e maior limite a fadiga. O principal aço utilizado na fabricação de quadros, segundo Vandermark (1997), é o aço AISI4130 que possui como características: fácil conformação e durabilidade. Na atualidade, o aço e suas ligas são utilizados em bicicletas mais simples, de uso urbano e para carga, devido as suas desvantagens com o elevado peso e suscetibilidade à oxidação.

O titânio e suas ligas são de grande interesse industrial uma vez que combina propriedades como tenacidade, deformação, condutividades térmica e elétrica, vantagens estruturais como por exemplo dureza, leveza (BRAGA; FERREIRA; CAIRO, 2007). Mesmo com todas essas vantagens, o titânio é pouco utilizado na produção de quadros devido ao alto custo e dificuldade na confecção e manutenção.

Por outro lado, a fibra de carbono é o material mais utilizado no ciclismo competitivo devido a apresentar uma estrutura com alta rigidez, alta resistência a tração, alto modulo de elasticidade e principalmente baixo peso. De acordo com Burke (2003) uma bicicleta com maior rigidez permite que a energia fornecida pelo ciclista, através do pedal, seja transferida para roda de trás com maior eficiência, gerando assim melhor desempenho.

O material mais usado para fabricação de quadros de bicicletas é o alumínio, que é detalhado a continuação.

### 2.5.1 Alumínio

Medeiros (2008) citou que para obter um tubo de alumínio com a mesma rigidez que um tubo de aço é necessário utilizar três vezes mais materiais. Portanto, conclui-se que para quadros de liga de alumínio são necessários tubos com grande diâmetro e espessura para garantir a resistência e não haver perda de energia.

Em comparação ao aço, o alumínio possui menor módulo de elasticidade, o que significa que ele tem a possibilidade de amortecer certos impactos, sem transferir o choque totalmente ao ciclista, entretanto isso está ligado ao fato de o alumínio ser susceptíveis a falhas por fadiga, isso é um fator que reduz muito sua durabilidade,



visto que o mountain bike é um esporte que a estrutura está sempre sendo solicitada ciclicamente, portanto para a confecção de um modelo de quadro de alumínio é necessário grande estudo em relação a sua geometria e dimensões, afim de ter um modelo com boa rigidez e durabilidade.

O uso do alumínio em quadros possui várias vantagens, como:

- Baixo custo;
- Fácil produção;
- Resistencia a corrosão;
- Maior vida útil em relação ao aço.

#### 2.5.1.1 Ligas de Alumínio

O alumínio sendo utilizado na forma genuína gera uma estrutura não resistente, devido a isso são utilizadas ligas de alumínio, onde o alumínio é combinado a outros elementos para melhorar suas propriedades e garantir uma melhor estrutura. São utilizadas pequenas porções de outros elementos, no máximo 10%. As ligas mais comuns em quadros são: liga de alumínio 6061 e 7005.

##### a) Liga de alumínio – AISI 6061

A liga de alumínio 6061 é uma liga que possui em sua composição: Magnésio (aproximadamente 1,0%), silício (aproximadamente 0,5%) e outros materiais que podem ser incluídos (zinco, manganês, cobre, ferro titânio e cromo) segundo MATWEB (2022). Esses materiais geram mudanças em sua resistência. A liga de alumínio possui geralmente boa soldabilidade (KAUFMAN, 2004). Outro fator que muda suas propriedades é seu tratamento térmico, para o alumínio AISI 6061 existem três temperas:

- 6061-O: é uma liga de recozido e é a que apresenta menor tensão de escoamento das três.
- 6061-T4: é um tratamento térmico com envelhecimento natural que é cerca de duas vezes mais resistente ao escoamento que o 6061-O.

- 6061-T6: é realizado um envelhecimento artificial que é cerca de 2,5 vezes mais resistente ao escoamento do que 6061-O.

A Tabela 1 abaixo apresenta os dados da liga de alumínio 6061-T6.

**Tabela 1 – Propriedades mecânicas do alumínio 6061 – T6**

<b>Propriedades mecânicas do alumínio 6061 - T6</b>	
Módulo de elasticidade	68.9 GPa
Coefficiente de Poisson	0.33
Densidade	2700 kg/m <sup>3</sup>
Tensão Limite de Escoamento	276 MPa
Tensão Limite de Ruptura mínima	310 MPa

**Fonte: Adaptado de MATWEB (2022).**

O material utilizado no quadro estudado é o alumínio 6061-T6, e as propriedades referentes a ele foram utilizadas para cálculos e simulações.

## 2.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO EM QUADROS DE ALUMÍNIOS

Para a confecção de alguns modelos quadros de alumínio, é necessário o processo de hidroformagem e posteriormente a soldagem dos tubos originados. A hidroformagem é um processo de conformação, o processo consiste em deformar o tubo no formato de uma matriz através da pressão de um líquido (CIA DO PEDAL, 2012). Os modelos fabricados por hidroformagem necessitam maior investimento prévio para aquisição de moldes, visto que esse processo consiste em introduzir os tubos de alumínio em um molde, onde após esse processo, é injetado fluido sob alta pressão, expandindo o material, que toma a forma do molde o qual está inserido. Esse processo gera algumas partes as quais compõe o quadro, após, é necessário o processo de soldagem que é abordado no próximo tópico.

### 2.6.1 Soldagem em Alumínio

Soldabilidade se refere à facilidade com que uma liga pode ser soldada, produzindo uma junta com adequada resistência mecânica, resistência à corrosão e outras propriedades quando necessárias (PÓVOA, 1988).

Para soldar alumínio podem ser utilizados, solda com eletrodo revestido, MIG, TIG e Plasma. Onde esses processos apresentam vantagens, desvantagens e limitações, sendo escolhido de acordo com a qualidade exigida para a junta a ser soldada (REIS 1996). Segundo (ALTSHULLER, 1998) as soldas MIG e TIG são os mais utilizados para solda em alumínio.

A soldagem é o processo que tem como objetivo realizar a junção dos componentes do quadro, alguns tubos são obtidos por meio da hidroformagem e outros por extrusão. Um dos processos de fabricação comumente utilizados na obtenção das ligas de alumínio, no estado semiacabado em perfis sólidos ou tubulares de diversas geometrias, é a extrusão (WEINGAERTNER; SCHROETER, 1991).

A camada de alumina é gerada naturalmente pelo material em contato com o oxigênio do ar, a remoção para soldagem pode ser feita de 3 formas distintas (ALCAN, 1993): por ação mecânica, limpeza química ou ataque catódico.

1. Processo de ação mecânica: Consiste no esmerilhamento ou escovamento da peça;
2. Limpeza química: É feita pela aplicação de bases e ácidos alternadamente, a temperaturas variadas, intercaladas por lavagem com água;
3. Ataque catódico: Consiste em alternar o sentido da corrente elétrica de soldagem.

A porosidade é um dos principais problemas e mais recorrentes na soldagem do alumínio, estes poros reduzem além dos pontos mencionados anteriormente, também reduz a resistência mecânica da junta soldada. He et al. (2018) avaliaram os efeitos da porosidade nas propriedades mecânicas da liga de alumínio 2A97-T3 e concluíram que a resistência à tração com relação ao modelo sem poros, reduziu cerca de 30% e a ductilidade reduziu de 14,3% para 2%.

Segundo Alcan (1993) a elevada condutividade térmica, o alto coeficiente de expansão linear e a necessidade de maior aporte de calor podem causar consideráveis distorções durante a soldagem se não forem utilizadas as velocidades de trabalho mais altas possíveis.

Visto que o processo de soldagem interfere negativamente nas resistências da estrutura soldada, temos a geração da Zona Termicamente Afetada (ZTA), que é a região próxima a que foi soldada, onde nesse ponto a temperatura chega quase de

sua fusão e é resfriada para temperatura ambiente rapidamente, semelhante ao efeito da têmpera, basicamente consiste em uma região não fundida do metal de base que ter sua microestrutura e/ou propriedades alteradas durante o ciclo de soldagem, onde as temperaturas durante a soldagem foram maiores que a temperatura crítica do material e inferiores à sua temperatura de fusão (PAULO VILLANI, 2005). Durante esse processo, ocorre a mudança dos tamanhos dos grãos, o que altera sua resistência, podendo alterar sua dureza ou tenacidade.

## 2.7 NORMAS SAE J1739

A Sociedade de Engenheiros de Automóveis (SAE - *Society of Automotive Engineers*) tem em seu portfólio a norma J1739 referente ao processo de FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), onde possui a vertente de processo (PFMEA - *Process of Failure Mode and Effects Analysis*) e de produto (DFMEA - *Design Failure Mode and Effects Analysis*) a norma possui sua última versão publicada no ano de 2021 (NUNEZ, 2017).

O DFMEA tem como objetivo principal analisar as potenciais falhas de um projeto que está sendo elaborado, o DFMEA é utilizado como orientador do projeto, prevendo possíveis anomalias do produto, abrindo oportunidade para melhorias no produto, alinhado com a redução de falhas potenciais. DFMEA é uma ferramenta na qual é analisado os modos de falhas, efeitos e causas associadas. Essa análise tem como objetivo potencializar a síntese do conhecimento, onde se baseia na experiência, ocorrências registradas ou sabidas e tecnologias potenciais (DIAS et al., 2011).

A norma SAE J1739 apresenta um modelo base para uso da ferramenta DFMEA, onde em alguns casos são adaptados para as necessidades da empresa a qual utiliza, a Figura 1 apresenta o modelo base disponibilizado pela norma.

**Figura 1 – DFMEA norma SAE J1739**

DESIGN FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (DFMEA) BLANK FORM

DESIGN FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (DFMEA)																
System / Subsystem / Component Name: _____							DFMEA Number: _____									
Model Year / Program(s): _____							Revision Date: _____									
DFMEA Owner (Design Resp.): _____							Key Date: _____									
Core Team / Facilitator: _____							Original Completion Date: _____									
Support Team: _____																
Item / Function / Requirement	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S E V	Potential Cause(s) of Failure	Current Design Controls Prevention	O C C	Current Design Controls Detection	D E T	R P N	Recommended Action	Responsibility & Target Completion Date	Action Results				
												Actions Taken & Effective Date	S E V	D E T	R P N	

Fonte: Adaptado de SAE J1739 (2009).

Para construção do DFMEA é necessário a divisão de sistemas e subsistemas do produto, segundo Walter Dick, Lou Carey e James O. Carey (2015), a árvore de falha é uma estratégia eficaz para tomada de decisão e análise em projetos.

O DFMEA proposto pela norma possui colunas de:

- Sistema;
- Subsistema;
- Função;
- Modo de Falha;
- Efeito;
- Severidade;
- Causas/Mecanismos de falha;
- Ocorrência;
- Controles de prevenção e detecção;
- Detecções;
- RPN (Número de Prioridade de Risco);
- Ações Recomendadas;
- Nova Severidade;
- Nova Ocorrência;
- Nova Detecção; e
- Novo RPN (Número de Prioridade de Risco).

Segundo SAE J1739 existem ao mínimo 5 modos de falha no DFMEA:

1. Perda total da função requerida (e.g., componente inoperante);
2. Perda parcial da função requerida (e.g., perda de desempenho);
3. Perda intermitente da função requerida (e.g., devido a condições naturais como: umidade, temperatura.);
4. Degradação da função requerida (e.g., desgaste natural com o passar do tempo) e;
5. Perda não intencional da função requerida (e.g., operação na hora errada, falha provocada de forma não intencional, operação desqualificada).

Onde a partir do modo de falha, a norma abre para definições de perda de função, visto que o objetivo é encontrar o motivo pelo qual não é mais possível utilizar a função requerida. Sendo estes modos de falhas (NUNEZ, 2017):

- Deformação
  - Tração;
  - Compressão;
  - Cisalhamento.
- Fratura
  - Material dúctil;
  - Material frágil;
  - Fadiga;
  - Dilatação térmica.
- Desgaste
  - Mecânico (atrato);
  - Corrosão (químico);
  - Abrasão (presença de partículas mais duras);
  - Adesivo (falta de lubrificação);
  - *Fretting* (micro movimentos por vibração);
  - Cavitação.
- Incrustação
  - Processo (material usado no processo);
  - Ambiente (material proveniente do meio ambiente).

De acordo com a norma, a classificação do efeito da falha, possui a classificação predeterminedada com relação ao impacto da mesma, sendo listado os possíveis efeitos (NUNEZ, 2017):

- Nenhum efeito discernível;
- Ruído, e.g., desalinhamento/fricção, chiado/catraca, ruído transmitido por fluido;
- Aparência ruim, e.g., desbotamento da cor;
- Odor desagradável, sensação áspera, aumento de esforços;
- Operação prejudicada, intermitente, incapaz de operar, incompatibilidade eletromagnética;
- Vazamento externo resultando em perda de desempenho, operação irregular, instável;
- Incapaz de operar a máquina;
- Custo elevado de manutenção;
- Baixa capacidade de produção;
- Máquina inoperável;
- Temperatura elevada;
- Operação complexa;
- Comprometimento da operação;
- Comprometimento da produção;
- Vazamento de produto;
- Contaminação do meio ambiente;
- Paradas intermitentes;
- Paradas desnecessárias;
- Não atende uma regulamentação (Norma);
- Falta de segurança.

A partir do efeito da falha, é determinado o coeficiente relacionado a severidade da falha, onde a norma fornece uma base, a qual pode ser adaptada para a real necessidade da empresa que está realizando o projeto do produto, a Tabela 2 apresenta os coeficientes base da norma SAE J1739.

**Tabela 2 –Severidade norma SAE J1739**

<b>Severidade</b>	<b>Critério: Gravidade ou Severidade (SEV) do Efeito</b>	<b>Peso</b>
Segurança e/ou conformidade regulatória (muito alta)	Modo de falha potencial, afeta a operação segura do elemento e/ou envolve o não cumprimento da regulamentação de forma esperada.	10
	Modo de falha potencial, afeta operação segura do elemento e/ou envolve o não cumprimento da regulamentação, mas avisa antes de acontecer	9
Função primária (alta)	Perda da função primária (elemento inoperável, mas não afeta a segurança de operação).	8
	Degradação da função primária (elemento operável, mas com nível reduzido de desempenho).	7
Função secundária (moderada)	Perda da função secundária (elemento operável, mas funções secundárias inoperáveis).	6
	Degradação da função secundária (elemento operável, mas funções secundárias em nível reduzido de desempenho).	5
Descontentamento (baixa)	Aparência ou ruído não desejado. O elemento opera, mas algumas das suas partes não estão em conformidade. Defeito percebido pela maioria de seus usuários (>75%).	4
	Aparência ou ruído não desejado. O elemento opera, mas algumas das suas partes não estão em conformidade. Defeito percebido por muitos usuários (+/- 50%).	3
	Aparência ou ruído não desejado. O elemento opera, mas algumas das suas partes não estão em conformidade. Defeito percebido apenas por usuários especialistas (<25%).	2
Sem efeito	Nenhum efeito perceptível.	1

**Fonte: Adaptado de SAE J1739(2009).**

O coeficiente atribuído a ocorrência é relacionado a probabilidade de ocorrer a falha durante a vida do produto, sendo levado em consideração previsibilidades relacionadas ao controle de prevenção que o tópico de modo de falha possui. A Tabela 3 apresenta as predefinições base da norma.

**Tabela 3 – Ocorrência norma SAE J1739**

<b>Ocorrência</b>	<b>Critério: Ocorrência (OCC) das Causas do Modo de Falha</b>	<b>Peso</b>
Muito alta	Acontece por ser uma nova tecnologia ou projeto inovador que não possui histórico científico e/ou técnico.	10
Alta	A falha é inevitável por ser um projeto novo, com aplicações inéditas ou adaptações, quando levado a condições de operação/ciclo de trabalho.	9
	A falha é provável por ser um projeto novo, com aplicações inéditas ou adaptações, quando levado a condições de operação/ciclo de trabalho.	8
	A falha é incerta por ser um projeto novo, com aplicações inéditas ou adaptações, quando levado a condições de operação/ciclo de trabalho.	7



Moderada	Falhas frequentes que podem ser associadas a projetos semelhantes ou por meio de simulação e testes	6
	Falhas ocasionais e que podem ser associadas a projetos semelhantes ou por meio de simulação e testes	5
	Falhas isoladas e que podem ser associadas a projetos semelhantes ou por meio de simulação e testes.	4
Baixa	Apenas falhas isoladas associadas a projetos quase idênticos ou por meio de simulações e testes.	3
	Nenhuma falha é observada quando associada a projetos quase idênticos ou por meio de simulação e testes.	2
Mínima	A falha é eliminada por meio de um Controle Preventivo.	1

**Fonte: Adaptado de SAE J1739(2009).**

A detectabilidade está atribuído a classificação ao controle detectivo do projeto, a características de atribuição de controles de detecção em produtos é levado em consideração apenas ações que podem ser realizadas antes do lançamento do mesmo, tendo como principal objetivo mitigar falhas, alinhado a validação e verificação do projeto. A Tabela 4 apresenta a classificação base fornecida pela norma.

**Tabela 4 – Detectabilidade norma SAE J1739**

<b>Detectabilidade</b>	<b>Critério: Probabilidade de detecção pelo controle de projeto</b>	<b>Peso</b>
Incerteza absoluta	Nenhum tipo de controle detectivo para o projeto. Não é possível detectar ou não pode ser analisado	10
Difícil de detectar	Os controles detectivos para análise do projeto têm uma capacidade de detecção fraca por não serem aplicáveis às condições reais do produto (e.g. análise numérica, analítica ou experimental, equações, ensaios destrutivos, normas, etc.)	9
Pós-congelamento do projeto e antes da sua fabricação	Verificação/validação do produto após o congelamento do projeto e antes da fabricação, por meio de métodos de análise de engenharia para aprovação/reprovação (testar o sistema ou subsistema com critérios de aceitação, por exemplo, recomendações de especialistas, publicações, etc.)	8
	Verificação/validação do produto após o congelamento do projeto e antes da fabricação, por meio testes de falhas em protótipos (testar sistema ou subsistema até a falha ocorrer, forçando falha, etc.)	7
	Verificação/validação do produto após o congelamento do projeto e antes da fabricação, por meio da análise de degradação (verificar o sistema ou subsistema após testes de durabilidade, por exemplo, verificação da integridade de funções requeridas)	6
Antes de congelar o projeto	Validação do produto (testes de confiabilidade, desenvolvimento ou testes de validação) antes de congelar o projeto, usando análises de	5

	aprovação/reprovação (e. g. uso de critérios de aceitação de desempenho, verificações de funções, etc.)	
	Validação do produto (testes de confiabilidade, desenvolvimento ou testes de validação) antes de congelar o projeto, usando análises de falha em protótipo (por exemplo, tendência de dados, valores antes/depois, análise estatístico, avaliando fornecedor de peças, etc.)	4
	Validação do produto (testes de confiabilidade, desenvolvimento ou testes de validação) antes de congelar o projeto, usando análises de degradação (por exemplo, tendência de dados, valores antes/depois, análise estatístico, avaliando fornecedor de peças, etc.)	3
Análise Virtual - Correlacionada	Os controles de análise para detecção de falhas no projeto, possuem uma forte capacidade de detectabilidade antes do congelamento do projeto. A análise, é altamente recomendada e replicada de outros projetos similares.	2
Detecção não aplicável	A causa da falha ou modo de falha não pode ocorrer porque são totalmente evitadas por meio de controle preventivo, e.g. soluções de projeto, normas ou boas práticas de projeto, uso de materiais comuns e muito conhecidos, etc.	1

**Fonte: Adaptado de SAE J1739(2009).**

A detectabilidade segundo a norma pode ser ramificada em 3 áreas se tratando do lançamento de um produto, sendo elas (NUNEZ, 2017):

- Análise numérica:
  - Engenharia auxiliada por computador (CAE - *Computer Aided Engineering*);
  - Simulação por Método dos Elementos Finitos (FEM - *Finite Element Method*);
  - Simulação por Dinâmica dos fluidos computacionais (CFD - *Computational Fluid Dynamics*);
  - Animação do produto usando o projeto assistido por computador (CAD - *Computer Aided Design*)
  - Verificação de processos e formas de manufatura (CAM - *Computer Aided Manufacturing*)
- Análise analítica (equações, formular, teoremas, critérios, etc.)
- Análise experimental:
  - Testes em bancadas ou com protótipos físicos.

A partir dos coeficientes determinados, é feita a multiplicação da Severidade, Ocorrência e Detectabilidade de cada modo de falha, originando o RPN (Número de

Prioridade de Risco), o qual determina quais são os pontos mais críticos do projeto levando em consideração esses três tópicos (NUNEZ, 2017).

O escopo dessa norma contempla ferramentas para controle, prevenção e detecção de falhas de projeto, onde é realizada a classificação de severidade, ocorrência e detectabilidade de cada subsistema do projeto a ser elaborado, onde o escopo dessa norma determina ações a serem realizadas, podendo ser dimensionamentos, análises analíticas ou numéricas com o objetivo de ajuste do projeto para eliminar/mitigar falhas ainda no ambiente de projeto, antes mesmo da fabricação e comercialização, são analisadas tensões as quais são aplicadas no sistema, seu comportamento, afim de determinar a resistência, e em alguns trabalhos analisados o coeficiente de segurança.

## 2.8 TENSÕES E RESISTÊNCIAS

Durante a prática do mountain bike, diversas tensões são empregadas no quadro, como é um esporte cíclico, essas cargas se repetem o que gera fadiga, portanto nos próximos tópicos serão explicados e exemplificados cargas, tensões e o conceito de fadiga.

- **Tensão Normal:** Tensões normais são aquelas que atuam na direção normal à superfície de um componente, que no caso do trabalho, são os tubos que compõem o quadro (NORTON, 2004). Basicamente a tensão normal é uma força reativa a partir da carga empregada, sempre perpendicular à superfície. É positiva quando traciona o quadro, e é negativa quando o comprime.
- **Tensão de von Mises:** De acordo com a teoria de von Mises, um sólido dúctil vai escoar quando a densidade da energia de distorção alcançar um valor crítico para cada material (KIM e SANKAR, 2009). O critério de tensão de von Mises máxima é baseado na teoria de von Mises-Hencky, e é conhecida como teoria da energia de cisalhamento ou teoria da energia de distorção máxima. A teoria afirma que um material dúctil começa a escoar no local onde a tensão de von Mises se torna igual ao limite de tensão. Na maioria dos casos, o limite de escoamento é usado como limite de tensão, onde limite de escoamento é uma propriedade que também depende da temperatura;

- **Flambagem:** A flambagem é quando o quadro ou componente mecânico sofre uma flexão transversal devido a uma compressão axial, quando mais esbelta a estrutura, mas ela irá sofrer flambagem. Peças comprimidas de grande altura podem flambar, fato que é sensivelmente reduzido se a altura for pequena (MANOEL HENRIQUE CAMPOS BOTELHO, 1998);
- **Coeficiente de segurança:** O coeficiente de segurança é o fator requerido para que o sistema projetado tenha segurança para uso. Esse fator varia de projeto para projeto, basicamente consiste na relação entre a resistência do material ao escoamento e a tensão devido a uma carga que será empregada na estrutura. A relação entre a carga-limite e a carga admissível é utilizada para definir o coeficiente de segurança (BEER, 2006); e
- **Concentração de tensões:** Quando um componente estrutural contém uma descontinuidade, como, um furo ou uma mudança brusca na seção transversal, podem ocorrer valores altos de tensões localizadas próximas da descontinuidade (BEER, 2006). Concentrações de tensões são pontos da estrutura onde as tensões irão se acumular, ou seja, pontos onde serão empregados maior esforço, esses pontos se dão por: geometria, processo de fabricação ou material. Sendo esses pontos de concentração de tensão, criados propositalmente para garantir que a estrutura principal irá suportar ou criados sem ser projetados, portanto necessitam de atenção para que não comprometam a estrutura.

### 2.8.1 SOLICITAÇÕES DE CARGA

Durante a prática do mountain bike existem solicitações de esforços que serão empregadas a estrutura do quadro, sendo elas segundo Peterson (1986).

**Arranque:** Quando o ciclista emprega força máxima para sair da inércia, quando o ciclista está apoiado apenas nos pedais e guidão. Onde com os dados de força nos pedais e a aceleração, utilizando equacionamento de equilíbrio estático e dinâmico, é possível encontrar as forças que são empregadas nos pedais e guidão.

**Impacto horizontal:** É um impacto basicamente como uma colisão frontal, esses impactos no mountain bike são constantes, alguns exemplos são, subidas em meio fio, pedras e troncos de árvores que estão no percurso. "*Requirements for*

*Bicycles" do Bureau of National Affairs (BNA)* é um manual que se refere as normas regulamentaras que são empregadas a testes de carregamentos compressivos com cargas horizontais. Esse tipo de impacto os principais componentes solicitados é o quadro, suspensão e as gancheiras.

Força nos pedais: Um ciclista de elite imprime cerca de 300W de potência média (LINDSEY, 2022). Onde esse carregamento cíclico (pois cada pedalada gera uma deformação de um lado), gera torções no quadro.

Impacto vertical: Esse impacto se dá por situações de saltos sobre obstáculos ou quedas, onde as forças em sua maioria são empregadas nos pedais e no guidão.

Esse carregamento pode ser equacionado por meio da massa do conjunto ciclista-bicicleta e pela aceleração, esse tipo de impacto é um dos mais agressivos a estrutura do quadro, pois é um impacto muitas das vezes com alta carga e acontece de forma cíclica, esse tipo de impacto está representado na Figura 2.

**Figura 2 – Impacto vertical**



**Fonte: Olimpíadas (2021).**

### 2.8.2 Fadiga

Segundo Correa (2005) a fadiga é um dos principais motivos de falha de componentes mecânicos. A falha por fadiga se dá pelo esforço cíclico ao qual o material é submetido.

Segundo Andersen et al. (1996) a fadiga é um processo progressivo, onde a estrutura possui um defeito estrutural permanente, que quando submetido a tensões nominais de deformações cíclicas de intensidade inferior a tensões de escoamento, vem a falhar.

A fadiga basicamente é caracterizada pela diminuição na capacidade do material em suportar cargas, devido a exposição a carregamentos cíclicos durante certo período de tempo. A falha por fadiga ocorre de forma lenta e gradual, devido a tensão estar na fase elástica. Segundo Colim (2006), a falha por fadiga é consequência de esforços cíclicos, onde esses esforços produzem e propagam as trincas. O início de uma trinca ou falha por fadiga pode ser verificada normalmente na superfície do corpo, devido a ser a região onde há maior concentração de tensão.

O processo de fadiga é dividido em alguns estágios, sendo eles, segundo Andersen et al. (1996):

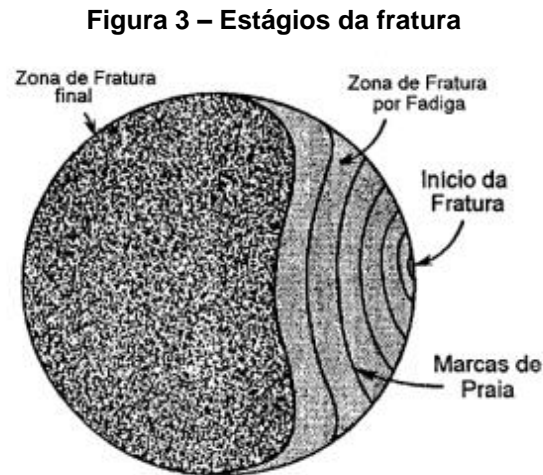
1. Deformação plástica cíclica anterior a iniciação de trinca por fadiga;
2. Iniciação de um ou mais micro trincas;
3. Propagação ou coalescência de micro trincas para formar uma ou mais micro trincas;
4. Propagação de uma ou mais micro trincas;
5. Falha.

Em geral, três condições simultâneas são requeridas para ocorrer a falha por fadiga, sendo elas: tensão cíclica, tensão de tração e deformação plástica. Aonde chega-se que o processo de fadiga ocorre com iniciação da trinca e propagação da trinca, podemos classificar a evolução dos processos:

1. Nucleação (início da trinca);
2. Propagação da trinca (depende do material, carregamento, entre outros fatores);
3. Falha funcional ou catastrófica.

A presença de trincas ou entalhes, atuam como concentrador de tensão, onde fragilizam o material. O entalhe atua como um ponto de concentração de tensão para

o impacto em alta velocidade, segundo Callister (2008). A Figura 3 apresenta a propagação de uma trinca.



Fonte: REED-HILL (1982)

Alguns fatores ou situações podem alterar a resistência a fadiga, segundo Callister (2008) eles são:

- Superfície do material: Diferentes tratamentos dados a superfície podem diminuir a resistência a fadiga dos materiais;
- Tratamento de superfície: Marcas superficiais, devido às operações de usinagem, podem limitar a vida em fadiga;
- Meio: O meio em que o material está submetido também pode vir a alterar a resistência a fadiga, pois corrosão no material facilita a etapa de formação e propagação de trincas; e
- Variáveis de projeto: Materiais que possuem entalhes ou qualquer tipo de concentrador de tensão tem sua resistência a fadiga diminuída.

Durante o ciclismo o quadro e os demais componentes são responsáveis por suportar cargas cíclicas, sendo elas de compressão e tração.

O comportamento relacionado a fadiga em juntas soldadas de alumínio, é afetada por fatores como:

1. Propriedade material base;
2. Grandeza das tensões aplicadas;
3. Modo aplicação da carga;

4. Meio ambiente;
5. Concentração de tensões;
6. Tratamento após soldagem.

Alguns destes fatores são determinados por meio do projeto, os demais são dependentes do processo de fabricação.

## 2.9 MÉTODOS DE ANÁLISE

Para realizar análises durante as etapas de projeto, como elaboração do projeto e fabricação, existem algumas formas de estar validando o projeto, a fim de garantir que as exigências sejam cumpridas.

### 2.9.1 Análise Experimental

O método de análise experimental é um método onde o quadro ou estrutura é empregado em ensaios, simulando as mais diversas situações, sendo elas tração, torção, compressão, impactos, fadiga, etc.

Esse método tem como objetivo de comprovar o projeto, se a estrutura suporta as cargas para as quais foi projetado, testa sua durabilidade com ensaios cíclicos e também serve para validar a qualidade da matéria prima a qual será utilizada, garantir que um determinado lote possui as especificações que foi projetado.

Como este método é agressivo, ou seja, muitas das vezes acaba avariando ou fraturando a estrutura, é empregado em protótipo a fim de validar o projeto, com quadros os quais não serão comercializados ou em corpos de prova para validação do lote fornecido.

- **Ensaio de tração:** Consiste em um ensaio onde o quadro é “esticado” em suas extremidades, a fim de obter características tanto do projeto quanto do material que foi utilizado. Uma amostra é deformada, em geral até sua fratura, por uma carga de tração que é aumentada gradativamente e é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo de um corpo de prova (Callister 2008).
- **Ensaio de compressão:** Este ensaio consiste na aplicação de cargas axiais de compressão, comprimindo a estrutura, a força é compressiva e o corpo de prova se contrai ao longo da direção da tensão (Callister 2008). Não é um dos ensaios mais utilizados na área dos quadros de bicicleta, visto que o pior



cenário é o de tração, portanto esse ensaio é mais utilizado visando obter resultados relacionados a flambagem.

- **Ensaio de impacto:** Existem diversos tipos de ensaios de impacto, onde cada tipo tem suas características, este ensaio consiste na aplicação de cargas pontuais para que possa ser determinado a quantidade de energia que será absorvida pelo material ou projeto. Sendo Charpi um deles, o ensaio Charpi é um dos ensaios mais realizados devido a ser simples e mais econômico com relação aos demais, este ensaio consiste na aplicação de uma carga por um martelo pendular elevado a uma altura específica, onde os resultados são obtidos por meio das diferenças de alturas iniciais e finais. Este ensaio tem como objetivo determinar o comportamento do material de acordo com determinada temperatura. A energia absorvida pelo corpo de prova é medida através da diferença de altura no início e no final do ensaio (Callister 2008).
- **Ensaio de Fadiga:** O ensaio de fadiga é realizado para simular e obter resultados a partir de situações cíclicas. Pode ser tanto como de tração, como de compressão. Com frequência são conduzidos ensaios que utilizam ciclos alternados de compressão e tração (Callister 2008). Este ensaio tem como objetivo obter um gráfico tensão x log do número de ciclos até sua falha (Callister 2008).

### 2.9.2 Análise Analítica

Atualmente com a vasta gama de softwares disponíveis e com a confiabilidade os quais apresentam, as análises analíticas são utilizadas para definição de dimensionamentos, ou definições de variáveis para serem aplicadas em simulações computacionais, onde são definidos os esforços por meio de equacionamentos e aplicados em simulações para compreensão do comportamento do projeto, esse processo otimiza a criação de projetos, devido serem aplicadas equações físicas para definição de variáveis.

Segundo Hsu (2005) a segunda lei de Newton é um dos pilares da física clássica além disso, possui aplicações em outras áreas. A segunda lei de Newton é também conhecida como a lei fundamental do movimento, a aceleração de um objeto é diretamente relacionada e proporcional a força resultante exercida sobre ele, sendo

inversamente proporcional a massa do objeto. Essa Lei é expressa pela equação matemática dada pela fórmula exposta na Equação (1).

$$F = m * a \quad (1)$$

Segundo Serway e Jewett (2018), a segunda lei é um dos princípios da dinâmica, pois ela descreve como as forças afetam o movimento de um objeto. De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2019), a Segunda Lei de Newton é fundamental para a compreensão da dinâmica dos corpos, onde os autores citam que uma aplicação da segunda lei é quando o objeto está em queda livre e a força resultante é igual ao peso do objeto.

A queda livre é amplamente observada durante o dia, segundo Halliday e Resnick (2009), a queda livre é um movimento uniformemente acelerado onde o objeto é abandonado a uma certa altura e experimenta uma aceleração constante em direção ao solo, ou seja, esse movimento resulta em uma trajetória de inclinação constante. Essa observação é a interpretação da gravidade e a gravidade na superfície terrestre é de aproximadamente  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

A função horária da velocidade é fundamental para descrever o comportamento do objeto estudado com relação a sua velocidade de movimento, de acordo Young e Freedman (2009), a função horária da velocidade descreve como a velocidade de um objeto varia em função do tempo. De acordo com RA Serway e JW Jewett (2018), a função horária da velocidade é demonstrada pela Equação (2).

$$v = v_0 + at \quad (2)$$

Onde  $v$  é a velocidade do objeto no tempo  $t$ ,  $v_0$  é a velocidade inicial e  $a$  é a aceleração, segundo Halliday, Resnick e Walker (2016), a função horária da velocidade é a equação que relaciona a velocidade de um objeto com o tempo referente ao início do movimento até o tempo desejado.

Evangelista Torricelli é amplamente conhecida visto sua contribuição para física, suas descobertas e experimentos revolucionaram o entendimento e compreensão de fenômenos, segundo Halliday, Resnick e Walker (2016), Torricelli foi um aluno e colaborador de Galileu Galilei. A partir da função horária da velocidade, e combinações de outras equações, visando a aplicabilidade em situações as quais não

estão disponíveis as variáveis para utilizar as fórmulas, a equação de Torricelli é a equação da velocidade final independente do tempo, segundo Serway e Jewett (2018) a equação popularmente conhecida como equação de torricelli é uma ferramenta fundamental para calcular a velocidade final de um objeto que está em queda livre sem a variável tempo. Essa equação relaciona velocidade final ( $v$ ), velocidade inicial ( $v_0$ ), aceleração gravitacional ( $a$ ) e altura de queda ( $S - S_0$ ), segundo Halliday (2023) a fórmula é dada pela Equação (3).

$$v^2 = v_0^2 + 2a(S - S_0) \quad (3)$$

Em alguns casos não é possível determinar por ensaios o limite de resistência a fadiga, visto a geometria ou objeto a ser analisado, existem alguns fatores que afetam a essa questão, segundo Richard Budynas; J. Keith Nisbett (2016) Marin identificou a esses fatores e os quantificou, elaborando coeficientes que devem ser utilizados na equação que ficou conhecida como equação de Marin, que é dada pela Equação (4).

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \quad (4)$$

Onde Marin (1962) determina que os coeficientes têm como objetivo ajustar o limite de resistência a fadiga, e esses coeficientes são:

- $k_a$  = fator de modificação de condição de superfície, definido pela Equação (5);

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (5)$$

Sendo os coeficientes “a” e “b” definidos e apresentados na Figura 4.

**Figura 4 – Fator modificador de condição de superfície**

Acabamento superficial	Fator a		Expoente b
	$S_{ut}$ , kpsi	$S_{ut}$ , Mpa	
Retificado	1,34	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	2,70	4,51	-0,265
Laminado a quente	14,4	57,7	-0,718
Forjado	39,9	272,	-0,995

Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)

- $k_b$  = fator de modificação de tamanho, definido de acordo com seu diâmetro e característica de tipo de carregamento, sendo torção, flexão ou carregamento axial, apresentando uma equação diferente, a Figura 5 apresenta as equações para o fator de modificação de tamanho.

**Figura 5 – Fator de modificador de tamanho**

$$k_b = \begin{cases} (d/0,3)^{-0,107} = 0,879d^{-0,107} & 0,11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0,91d^{-0,157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7,62)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0,157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Para carregamento axial não há efeito de tamanho, assim

$$k_b = 1$$

Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)

Para aplicações onde possui seção vazada ou retangulares, apresenta diferença para cálculo do diâmetro efetivo, a Figura 6 apresenta essas diferenças para determinação de diâmetro efetivo, sendo a (6-24) para seções circulares e a (6-25) para retangulares.

**Figura 6 – Diâmetro efetivo**

$$d_e = 0,370d \quad (6-24)$$

$$d_e = 0,808 (hb)^{1/2} \quad (6-25)$$

Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)

- $k_c$  = fator de modificação de carga, sendo diferenciado por meio da natureza do carregamento, a Figura 7 apresenta o coeficiente modificador de carga;

**Figura 7 – Fator Modificador de Carga**

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexão} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torção} \end{cases} \quad (6-26)$$

Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)

- $k_d$  = fator de modificação de temperatura, este depende da temperatura operacional, se está abaixo, acima ou igual a temperatura ambiente, a Figura 8 apresenta relação utilizada para determinação do coeficiente, relacionando temperatura de operação e a razão entre a resistência de tração na temperatura de operação e resistência à tração à temperatura ambiente;

**Figura 8 – Efeito da temperatura de operação**

Temperatura, °C	$S_T/S_{RT}$	Temperatura, °F	$S_T/S_{RT}$
20	1,000	70	1,000
50	1,010	100	1,008
100	1,020	200	1,020
150	1,025	300	1,024
200	1,020	400	1,018
250	1,000	500	0,995
300	0,975	600	0,963
350	0,943	700	0,927
400	0,900	800	0,872
450	0,843	900	0,797
500	0,768	1000	0,698
550	0,672	1100	0,567
600	0,549		

**Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)**

A partir da tabela foi gerada uma curva polinomial de quarta ordem a qual descreve o comportamento do fator segundo a temperatura, a Figura 9 apresenta a equação.

**Figura 9 – Equação fator de temperatura diferente da ambiente**

$$k_d = 0,975 + 0,432(10^{-3})T_F - 0,115(10^{-5})T_F^2 + 0,104(10^{-8})T_F^3 - 0,595(10^{-12})T_F^4 \quad (6-27)$$

em que  $70 \leq T_F \leq 1000^\circ\text{F}$ .

**Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)**

Para definição do coeficiente de objetos de estudo os quais trabalham em temperatura utiliza-se a razão entre a a resistência de tração na temperatura de operação e resistência à tração à temperatura ambiente, a Figura 10 apresenta a equação a qual utiliza-se para tais casos.

**Figura 10 – Equação Fator de temperatura ambiente**

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (6-28)$$

Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)

- $k_e$  = fator de confiabilidade, este fator varia de acordo com os dados que possui do objeto de estudo ou de confiabilidade que é desejada, a Figura 11 apresenta a tabela e seus valores para transformação para determinar o coeficiente de confiabilidade;

**Figura 11 – Efeito da confiabilidade**

Confiabilidade, %	Variante de transformação $z_a$	Fator de confiabilidade $k_e$
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)

Onde a partir da confiabilidade é possível inserir na equação definida por Haugem e Wirching (1997) mostrando certo desvio padrão abaixo de 8%, assim a equação se apresenta na Figura 12.

**Figura 12 – Equação Fator de confiabilidade**

$$k_e = 1 - 0,08z_a \quad (6-29)$$

Fonte: Elementos de máquinas de Shigley (2016)

- $k_f$  = fator de modificação por efeitos variados, este é um fator o qual é difícil de se determinar, ele leva em consideração questões como tensões residuais, corrosão, frequência cíclica, pulverização e entre outras características, sendo complexo de ser determinado para alguns casos, para fins em sua maioria dos casos didáticos é fornecido em exercícios ou é considerado valor 1;
- $S'_e$  = limite de fadiga de espécime de teste da viga rotativa;

- $S_e$  = limite de fadiga no local crítico de uma peça de máquina na geometria e condição de uso.

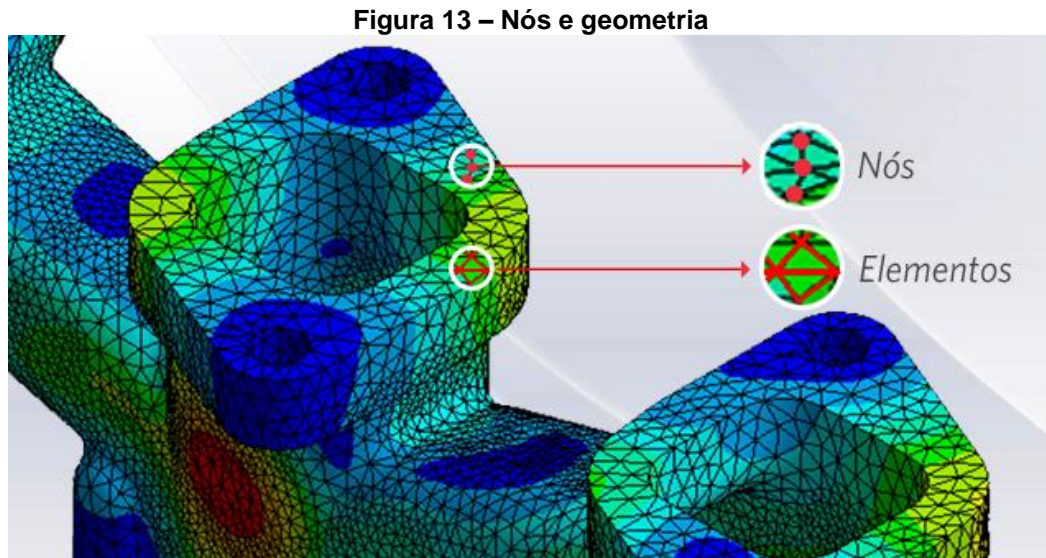
A Equação de Marin tem como seu escopo a definição de fatores de modificação do limite de resistência a fadiga, onde esses fatores são dependentes de condições de projeto, materiais, ambiente (Marin, 1962). Marin determinou esses fatores a partir de análises experimentais de carregamentos cíclicos em diversos cenários, alterando superfície, carregamentos, temperaturas, etc. Foi obtida a equação conhecida como a Equação de Marin, onde relaciona esses fatores modificadores do limite de resistência a fadiga, obtendo como resultado uma tensão de resistência local crítica na estrutura. Essa equação possibilita realizar análises de fadiga sem utilizar testes experimentais e simulações numéricas de alta complexidade que demandam elevado poder computacional, onde pela equação é obtido um resultado com confiabilidade de tensão, podendo ser utilizado para verificação de falhas por fadiga em simulações estáticas.

### 2.9.3 Análise numéricas pelo Método dos Elementos Finitos

Segundo Fish e Belytschko (2009) o método dos elementos finitos (FEM do inglês *Finite Element Method*) foi desenvolvido nos anos 1950 pela indústria aeroespacial. Os principais envolvidos foram a Boeing e a Bell Aeroespacial. Onde os maiores avanços surgiram após o ano de 1968, quando a NASA por meio do início de um projeto de elementos finitos, gerou o NASTRAM, software que revolucionou as análises, onde possibilitava uma análise tridimensional em vigas e elementos de casca, atualmente usado em programas de Engenharia Assistida por Computador (CAE do inglês *Computer-aided engineering*) e especificamente em plataformas de Análise de Elementos Finitos (FEA do inglês *Finite Element Analysis*). Alguns programas que possuem essa ferramenta são: NX Nastran, Solid Edge e FEMAP da Siemens, ANSYS, entre outros.

O método tem como objetivo dividir o objeto analisado em diversos elementos, que possuem forma variada, de acordo com o software utilizado ou configuração aplicada, podendo ser: triangulares, quadrilaterais, tetraédricos ou hexaédricos, onde esses elementos são conectados por nós. Esta estrutura é chamada de malha de

elementos finitos, ou simplesmente malha (FISH; BELYTCHKO, 2007). A Figura 13 apresenta os nós e os elementos que compõe a malha.



Fonte: MIRLIENNA (2016).

As simulações numéricas são uma das ferramentas a serem usadas seguindo o DFMEA da norma SAE J1739 para ações de controle, prevenção e detecção de falhas do equipamento ainda no ambiente de projeto; com essas análises é possível simular o comportamento que a estrutura terá, ainda sem realizar a fabricação, otimizando o tempo de projeto e custos do mesmo. Por fim, a junção de análises analíticas de situações para definir as cargas e as aplicações nas simulações numéricas são as principais ferramentas da norma para elaboração de projetos, podendo definir pontos críticos e já elaborar planos de ações para eliminar/mitigar falhas com menor custo alinhado a agilidade do processo.

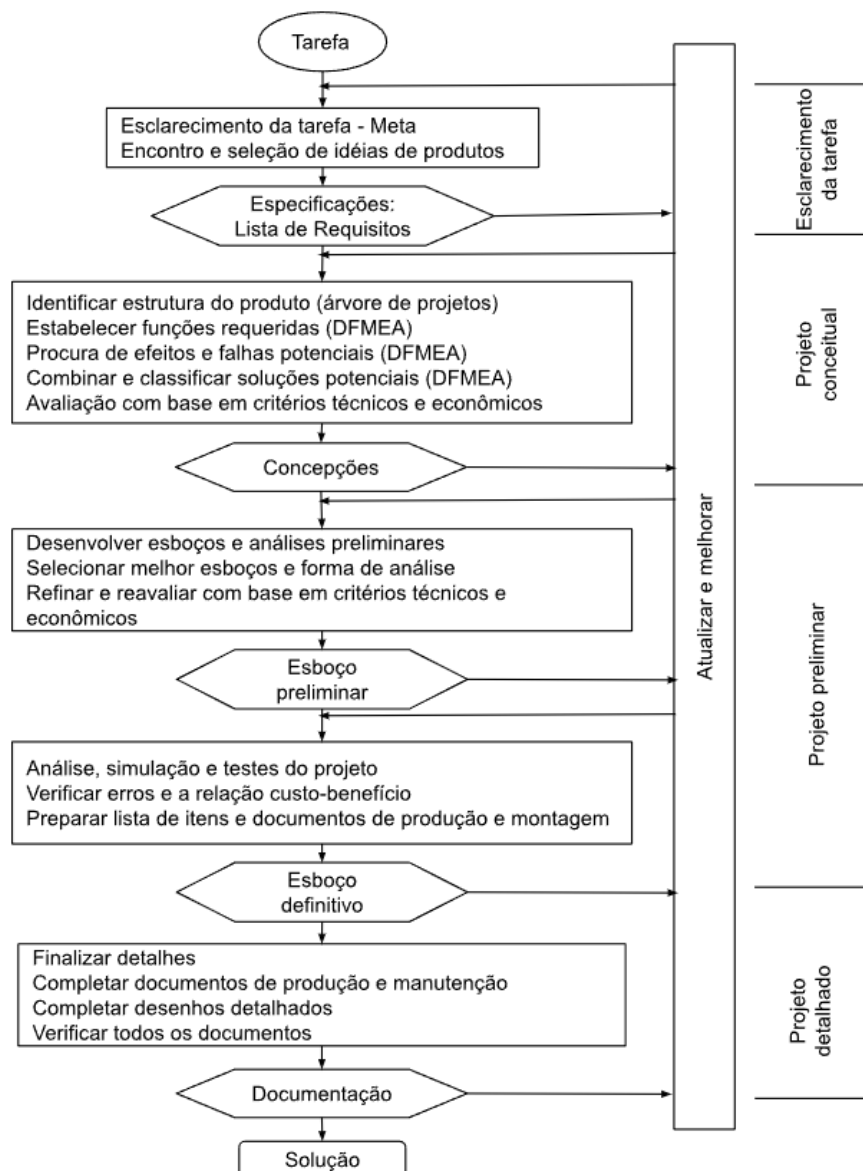


### 3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 FLUXO DE TRABALHO

A elaboração de um projeto possui um fluxo vertical, porém retroalimentativo, onde inicia-se com o esclarecimento da tarefa, posteriormente a etapa de definição de requisitos, sendo eles básicos (exigências) e vontades (desejos). Estes requisitos podem sofrer alterações durante o desenvolvimento, devido alterações de expectativas ou até mesmo por determinado motivo não ser possível atender tal demanda que em alguns casos o resultado obtido é divergente do esperado. A Figura 14 apresenta o fluxo que o projeto se baseia.

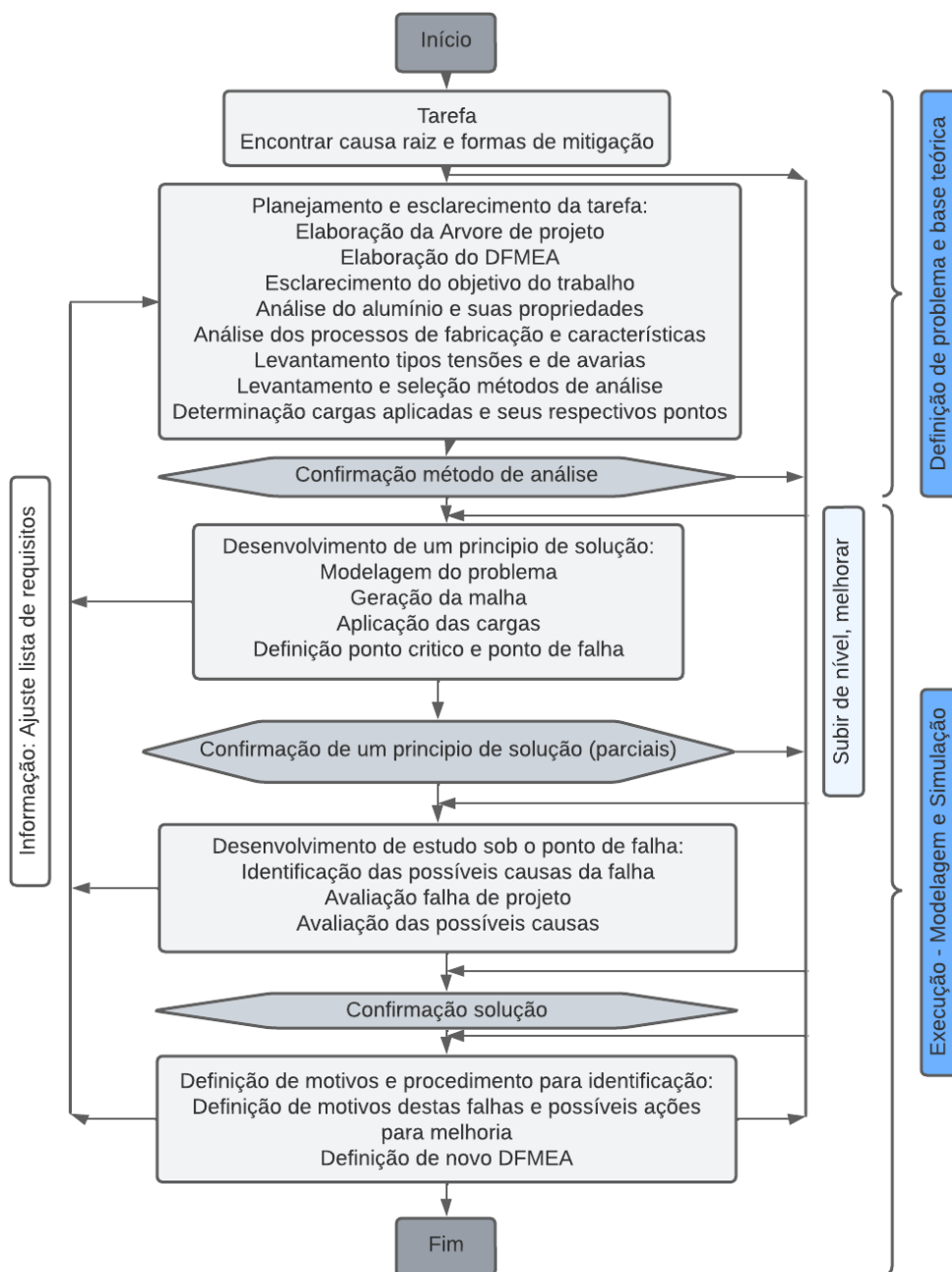
**Figura 14 – Fluxo do Projeto**



Fonte: Pahl; Beitz (2005)

Para o presente trabalho, foi elaborado um fluxograma com as atividades que serão realizadas exclusivamente neste projeto, com o objetivo de entender as fases a serem desenvolvidas neste trabalho, é apresentado na Figura 15 o fluxo de trabalho, onde apresenta as etapas e suas respectivas atribuições para o trabalho e a ordem de suas fases, importante destacar que em todas as fases é possível realizar a inserção de novas informações ou retroalimentar o projeto para elevar o nível do mesmo, podendo ser utilizado este fluxo para demais projetos com o mesmo escopo.

**Figura 15 – Fluxo de Trabalho**



Fonte: Adaptado de Pahl; Beitz (2005)

### 3.2 PLANEJAMENTO E ESCLARECIMENTO DA TAREFA

A tarefa é encontrar a causa raiz da falha e propor formas de mitigação. O modelo estudado é um quadro da marca Sense Bikes, modelo Impact SL, modelo 2020, tamanho M, o qual trincou no ano de 2021.

Quadro: Sense alumínio hidroformado sl 6061 t4-t6. A Figura 16 representa o modelo utilizado neste trabalho e local de falha evidenciado. A falha da estrutura ocorreu na junção do Tubo do Canote com o Suporte do Canote.

**Figura 16 – Local da falha evidenciado**



**Fonte: autoria própria.**

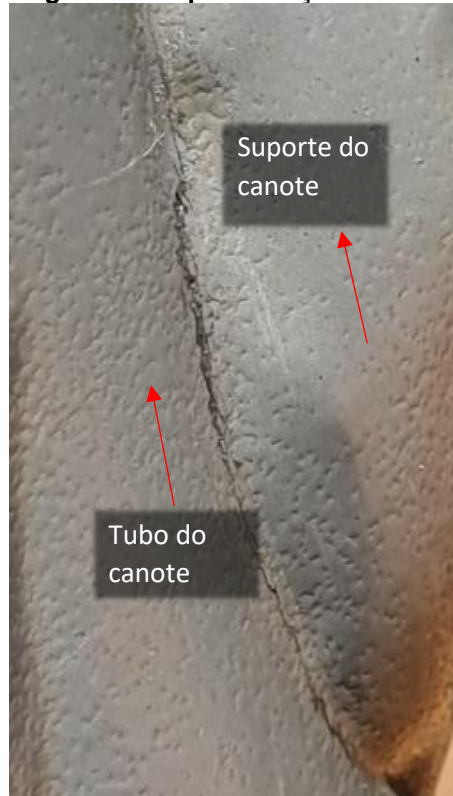
Ocorrida a falha, e por meio de inspeção visual, foi detectada pelo usuário, foi detectada antes de uma falha catastrófica. A Figura 17 apresenta a falha e a estrutura do material na região.

Para realizar o estudo foram definidas algumas considerações:

1. Simplificação na geometria do quadro, como geometria dos tubos, junções, detalhes, furos (devido a ser complexa a coleta e demandar alto processamento computacional para simulações)

2. Simplificação das cargas aplicadas (de acordo com um levantamento e qualificação de piores cenários);
3. Simplificação no modelo para simulação, envolvendo apenas quadro com geometria simplificada (para que seja possível realizar a simulação);
4. A partir da obtenção dos pontos críticos, essas partes serão analisadas separadamente.

**Figura 17 – Apresentação da falha**



**Fonte: autoria própria.**

O trabalho segue o escopo da norma SAE J1739, onde é elaborada a árvore de projeto e posteriormente o DFMEA com seu respectivo plano de ações recomendadas. São utilizadas as ferramentas do DFMEA de produto que são as análises analíticas e numéricas, as analíticas realizadas seguindo a fundamentação de 2ª Lei de Newton e equacionamentos de queda livre, e equação de Marin para determinar a tensão de resistência a fadiga da estrutura. Com essas análises foi possível determinar as variáveis aplicadas nas simulações numéricas computacionais.

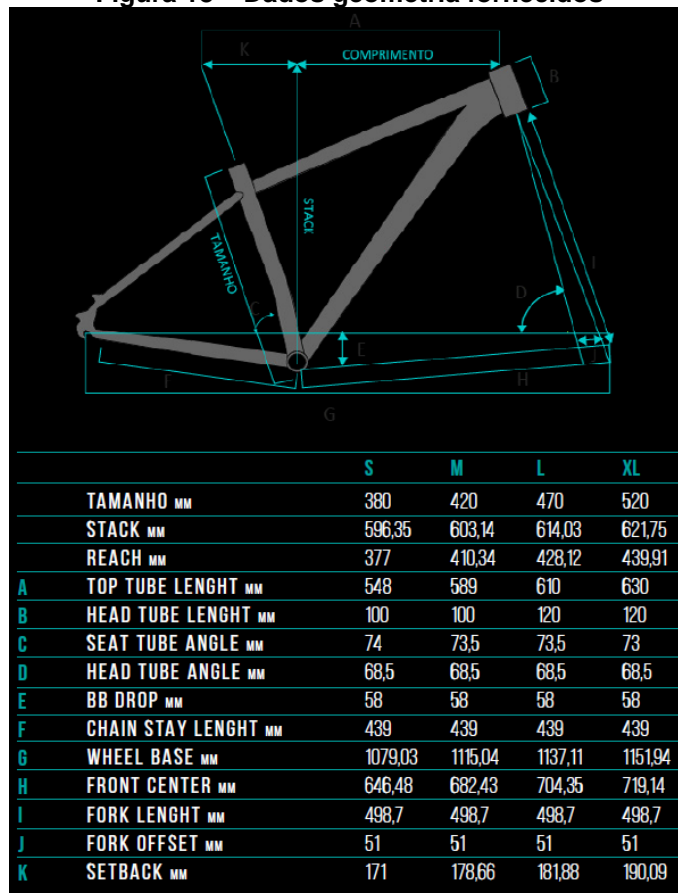
Para análise foram realizados estudos estáticos onde partem do equacionamento considerando o cenário de queda livre, afim de compreender o comportamento extremo, sendo considerado para o equacionamento o peso máximo de usuário permitido pelo fabricante.

No estudo foram utilizados conceitos e processos de fabricação abordados na fundamentação teórica, e características físicas do alumínio. O software utilizado para análise é o Solid Edge versão acadêmica, disponibilizado pela universidade.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DE UM PRINCIPIO DE SOLUÇÃO

A modelagem do problema parte pela criação do gêmeo digital desta estrutura no software Solid Edge no ambiente estrutura, onde se utiliza-se das medidas disponibilizadas pelo fabricante e coletas de medidas *in loco*. Algumas medidas e perfis não são possíveis de coletar e o fornecedor não disponibiliza, portanto para se assemelhar ao máximo ao modelo real, serão feitas simplificações nos modelos. No catálogo disponibilizado pelo fabricante possui algumas dimensões macros já especificadas, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 – Dados geometria fornecidos



Fonte: catálogo

A simulação é realizada no ambiente estrutura do software afim de determinar o comportamento mais preciso do quadro, pois se caracteriza como uma treliça, com o modelo elaborado, é realizado uma série de simulações considerando alguns cenários, visto ser uma simulação de uma viga, a malha neste caso não possui a necessidade de ser tão refinada, devido pontos críticos estarem localizados na extremidade ou no meio da viga.

Para estudo, será alterando seus pontos ditos como fixos, alternando entre o eixo traseiro e o eixo dianteiro, e as cargas sendo alternadas entre o eixo do movimento central e eixo da caixa de direção. Estas cargas foram obtidas por meio da 2ª Lei de Newton e Equação de Marin.

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DE ESTUDO SOB PONTO DE FALHA

Com a simulação é disponibilizado a distribuição de cargas em toda a estrutura, são analisados os pontos críticos da estrutura, estes pontos são os concentradores de tensões e a região de maior interesse, que é a região da falha.

Para estudo são analisadas as tensões máximas de Von Misses, as quais são comparadas essa com a tensão limite de escoamento do material do quadro, que é o alumínio 6061-T6. Visto ao poder computacional, será comparado essa tensão máxima de Von Misses com a tensão obtida a partir da equação de Marin, para determinar a falha ou não por fadiga, nessa equação se utiliza os fatores modificadores de tensão limite de Marin.

A partir das simulações é possível compreender o comportamento da estrutura durante o uso, identificados os pontos críticos de concentração de tensões, e comportamento da região de falha, assim podendo determinar possíveis causas de falha.

### 3.5 DEFINIÇÃO DE MOTIVOS E PROCEDIMENTO PARA IDENTIFICAÇÃO

Sendo está a última etapa do projeto, onde a partir das etapas e definições anteriores é possível definir a possível causa raiz da falha, tendo como base o DFMEA segundo escopo da norma SAE J1739, utilizando de ferramenta as análises analíticas, análises numéricas e fundamentação teórica.

Após determinado a possível causa raiz, tem-se a elaboração de um novo DFMEA para elevar o nível da análise. O projeto tendo como conclusão a definição de causa raiz com um novo DFMEA com possíveis ações e estudos para eliminar ou mitigar esse tipo de falha.

#### **4 CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

O projeto parte do princípio de ser um projeto adaptativo, onde seu contexto se dá pelo objetivo de se realizar adaptações e validações no modelo original, com a variação de parâmetros de estudo, visando compreender suas características e a meta é encontrar a causa raiz e propor medidas para mitigar essa falha.

Para início do projeto é necessário lembrar que a motivação do presente trabalho parte das anomalias recorrentes na estrutura e reclamações de usuários. Sendo o objetivo elaborar propostas de aperfeiçoamento da estrutura.

O planejamento do projeto inicia-se respondendo três perguntas:

1. Qual finalidade a solução objetivada precisa satisfazer?  
Identificar as possíveis causas de falha na fase de projeto, do quadro de bicicletas e propor soluções no projeto original para mitigar ou eliminar avarias.
2. Quais características ela deve apresentar?  
Rigidez e resistência mecânica.
3. Quais características ela não deve possuir?  
Não serão levados em consideração para elaboração do projeto quesitos, como:
  - a. Logística;
  - b. Mudança de fabricação;
  - c. Mudança de fornecedor.

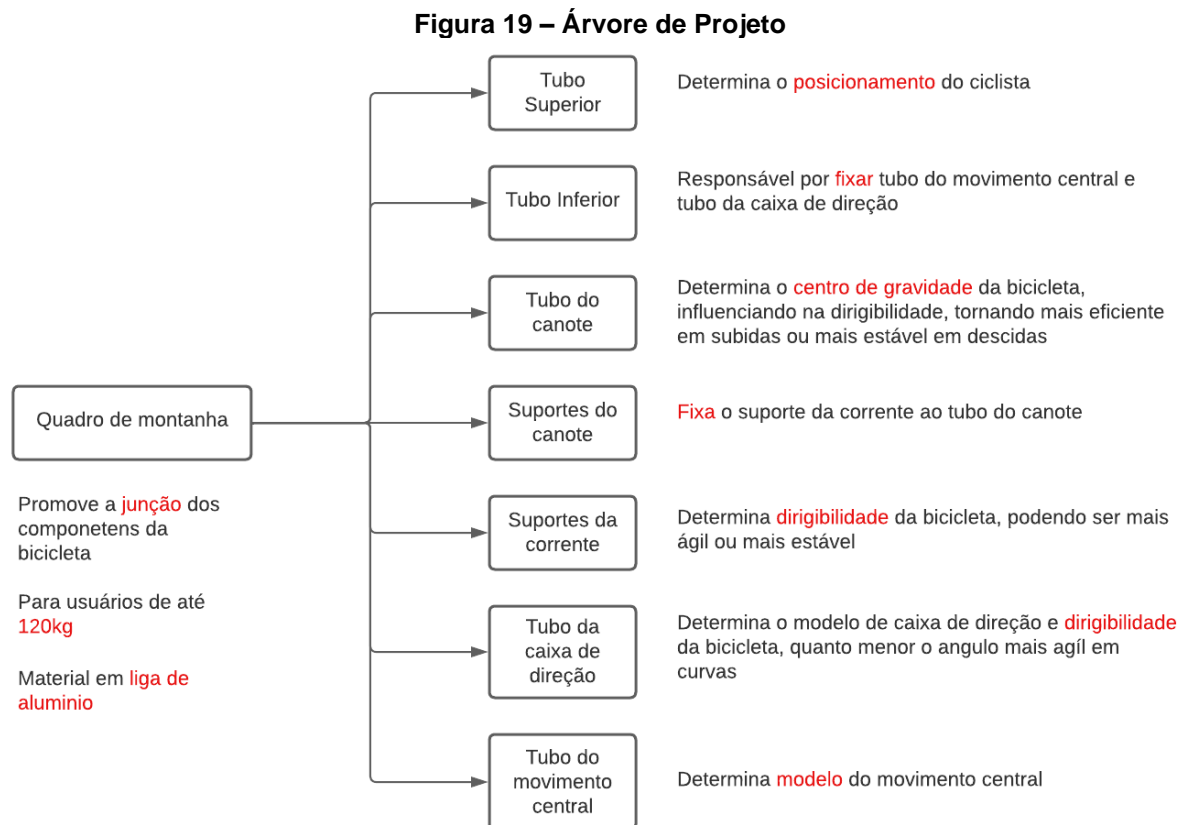
Para início do projeto são definidos os requisitos básicos para aprovação do projeto:

- Básicos:
  1. Atender usuários com peso de até 120kg;

2. Material em liga de alumínio;
3. Resistencia a corrosão;
4. Segurança ao usuário;
5. Garantia de segurança contra choques mecânicos.

O quadro é um conjunto da bicicleta, sendo a junção de subconjuntos, onde estes seguem com a intenção de aperfeiçoamento com a expectativa de eliminar a falha, devido a serem a fonte da origem recorrente da falha.

Após respondido as perguntas essenciais para início do projeto e pela definição de requisitos, a primeira etapa parte pela elaboração da árvore de projeto, a Figura 19 apresenta a árvore de falha com os subconjuntos e suas funções.



**Fonte: Autoria própria.**

Com a árvore de projeto definida e funções dos subsistemas, próximo passo é a elaboração do DFMEA, com o objetivo de definir os modos de falhas, causas e controles de prevenção e detecção, os quais servem de direcionamento do andamento das ações para construção do projeto estudado. Para construção do DFMEA, é utilizado como base a norma regulamentadora SAE J1739 com algumas



alterações visando maior aplicabilidade ao projeto do produto em questão, que é o quadro da bicicleta que tem como referência o modelo anterior.

Visto que o modo de falha sendo como fratura da estrutura, afeta a segurança do usuário, e ocorre de forma inesperada, a severidade é considerada 10.

Para definições da ocorrência, norma SAE J1739 faz definições para projetos, visto o fato de não ter rastreabilidade do número de falhas em quadros não ser disponibilizado por questões de sigilo, é considerado a ocorrência sendo muito baixa, se enquadrando em falhas isoladas.

Por fim, para definição da detectabilidade, que é a classificação associada ao melhor controle detectivo do projeto, os critérios definidos para controle detectivo são utilizados para definir o andamento do trabalho, visto que eles têm como objetivo validação, verificação e também o controle de mitigação da falha.

Com os critérios definidos, a partir dos mesmos é calculado o RPN (Número Prioridade de Risco), o qual é obtido a partir da multiplicação da severidade, ocorrência e detectabilidade. A Tabela 5 apresenta o DFMEA.

**Tabela 5 – DFMEA**

Sistema	Subsistema	Função	Modo de falha	Efeito	Sev	Causas/Mecanismos de falha	Oco	Controles de Prevenção e Detecção	Det	RPN	Ref
Quadro de montanha	Tubo superior	Determina o posicionamento do ciclista	Rompimento/Fratura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Especificação do limite de peso	9	270	1
					10	Falha de material	1	Normas regulamentadoras	9	90	2
	Tubo inferior	Responsável por fixar tubo do movimento central e tubo da caixa de direção	Rompimento/Fratura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Especificação do limite de peso	9	270	3
					10	Falha de material	1	Normas regulamentadoras	9	90	4
	Tubo do canote	Determina o centro de gravidade da bicicleta, influenciando na dirigibilidade, tornando mais eficiente em subidas ou mais estável em descidas	Rompimento/Fratura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Especificação do limite de peso	9	270	5
					10	Falha de material	1	Normas regulamentadoras	9	90	6
					10	Falha de montagem do canote	3	Nenhum	10	300	7

Suportes do canote	Fixa o suporte da corrente ao tubo do canote	Rompi-mento/Fratura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Especificação do limite de peso	9	270	8
				10	Falha de material	1	Normas regulamentadoras	9	90	9
Suportes da corrente	Determina dirigibilidade da bicicleta, podendo ser mais ágil ou mais estável	Rompi-mento/Fratura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Especificação do limite de peso	9	270	10
				10	Falha de material	1	Normas regulamentadoras	9	90	11
Tudo da caixa de direção	Determina o modelo de caixa de direção e dirigibilidade da bicicleta, quanto menor o ângulo mais ágil em curvas	Rompi-mento/Fratura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Especificação do limite de peso	9	270	12
				10	Falha de material	1	Normas regulamentadoras	9	90	13
Tubo do movimento central	Determina modelo do movimento central	Rompi-mento/Fratura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Especificação do limite de peso	9	270	14
				10	Falha de material	1	Normas regulamentadoras	9	90	15

Fonte: Autoria própria.

A última coluna da Tabela 5 apresenta referência numérica (ref.) relacionando a ação recomendada para cada modo de falha detalhado no DFMEA, as ações e nova reclassificação de Severidade; Ocorrência e Detectabilidade. Esses dados são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Ações recomendadas DFMEA**

Ref	Ações recomendadas	Sev	Oco	Det	RPN
1	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	10	2	3	60
2	Análise numérica	10	1	3	30
3	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	10	2	3	60
4	Análise numérica	10	1	3	30
5	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	10	2	3	60
6	Análise numérica	10	1	3	30
7	Inserção de um aviso na região do quadro	10	2	3	60
8	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	10	2	3	60
9	Análise numérica	10	1	3	30
10	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	10	2	3	60
11	Análise numérica	10	1	3	30

12	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	10	2	3	60
13	Análise numérica	10	1	3	30
14	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	10	2	3	60
15	Análise numérica	10	1	3	30

Fonte: Autoria própria.

Esse novo cálculo do RPN em projetos maiores serve como direcionador de priorização de ações, em muitos casos é utilizado o digrama de Pareto para definir a priorização das ações visando a maior redução de RPN com o menor número de ações executadas, otimizando o projeto. Visto que neste estudo foram definidas um número relativamente baixo de ações a serem executadas, todas serão executadas, onde a partir das ações propostas o somatório do RPN será reduzido em aproximadamente 75%, visto que o somatório antes das ações recomendadas é obtido o valor de 2820 e posterior as ações é de 690, essa redução dá pela redução da Ocorrência e aumento da Dectabilidade.

Com as informações do DFMEA definidas e plano de ação para redução do RPN as quais orientam o trabalho, a próxima etapa é o equacionamento das cargas que serão aplicadas no quadro, serão realizadas simplificações nos cálculos para os cenários de maior impacto, visto os quatro cenários os quais a bicicleta está exposta em seu uso, o de queda livre se enquadra como o cenário onde é o mais crítico para o quadro na região de interesse, devido a tração daquela região, a altura de queda é estimada afins de projeto sendo como 1,2m e o peso considerado do ciclista é de 120kg visto a ser a recomendação de peso máximo pelo fabricante.

Tabela 7 – Estudos de caso

Eixo Traseiro	Eixo Dianteiro	Carga Eixo Traseiro	Carga Eixo Dianteiro
Fixo	Fixo	100%	0%
Fixo	Fixo	50%	50%
Fixo	Fixo	0%	100%
Fixo	Móvel	100%	0%
Fixo	Móvel	50%	50%
Fixo	Móvel	0%	100%
Móvel	Fixo	100%	0%
Móvel	Fixo	50%	50%
Móvel	Fixo	0%	100%

Fonte: Autoria própria.

No estudo de caso de queda livre, serão realizadas a representação de nove cenários, visando maior compreensão do comportamento nos cenários mais agressivos possíveis de ser solicitado

Para simulação numérica, será realizado o balanceamento das cargas para representar esses cenários e realizado a mesclagem de fixação dos eixos, visando simular a ordem de toque dos eixos ao. A Tabela 7 apresenta os cenários e suas configurações para estudo.

É considerado a fim de cálculos que a velocidade no eixo Y que o objeto de estudo possui velocidade zero inicial, portando para realizar a estimativa de força de impacto entre bicicleta e solo é considerado a soma da massa do usuário(120kg) e massa da bicicleta (12,9kg), resultando em 132,9kg. A Figura 20 apresenta as considerações.

**Figura 20 – Considerações dimensionamento**



**Fonte: Autoria própria.**

Para obter a aceleração é necessário obter a velocidade, a qual é obtida pela equação de Torricelli, dada pela Equação (3). Onde temos que a para encontrar a velocidade, na equação consideramos que a aceleração do objeto em queda livre é a aceleração da gravidade e posição inicial sendo 0 no eixo y, sofrendo a queda até a altura final de 1,2m.

$$V^2 = V_0^2 + 2 * a * (S - S_0) \quad (3)$$

$$V^2 = 0^2 + 2 * 9,81 * (1,2)$$

$$V = 4,8522 \text{ m/s}$$

A partir da velocidade, é possível reorganizar a função horária da velocidade para calcular o tempo de queda da bicicleta, portando, calculando o tempo, pela Equação (2).

$$V = V_0 + (g * t) \quad (2)$$

$$4,8522 = 0 + (9,81 * t)$$

$$t = \frac{4,8522}{9,81}$$

$$t = 0,4946s$$

Com a velocidade definida e tempo, é calculado a aceleração pelo princípio de a aceleração ser o deslocamento dividido pelo tempo, sendo assim definido a aceleração da queda da bicicleta definida pela Equação 5.

$$a = \frac{(V-V_0)}{(T-T_0)} \quad (5)$$

$$a = \frac{(4,8522)}{(0,4946)}$$

$$a = 9,8103 \text{ m/s}^2$$

Pode-se notar que a aceleração se aproxima da aceleração da gravidade, visto a queda ser iniciada com velocidade zero no eixo Y e também da queda ser por um período curto.

Após cálculos afins de obter estimativa da aceleração, é utilizado fórmula da 2ª lei de Newton para definir a força empregada na estrutura, retomando na Equação (1) temos.

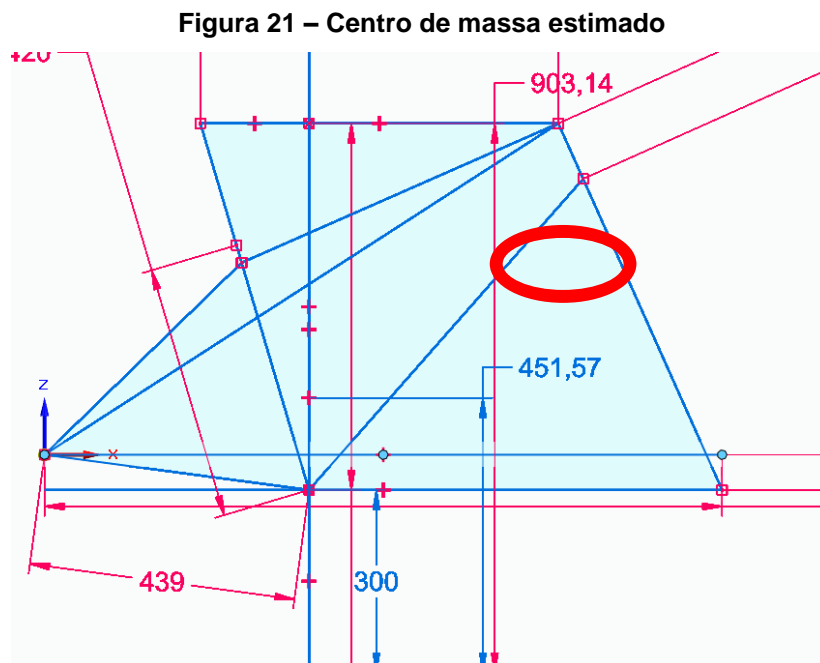
$$F = m * a \quad (1)$$

$$F = 132,9 * 9,8103$$

$$F = 1303,7888 \text{ N}$$

A força encontrada é a força considerando apenas o valor do peso do conjunto ciclista e bicicleta, para maior simulação do comportamento real, é utilizada a Equação

de Torricelli para determinar qual a aceleração do momento de transição da velocidade final até o repouso, nessa equação é possível obter o valor mínimo da aceleração considerando o centro de gravidade da bicicleta  $X$ , o valor do centro de gravidade é estimado considerando a altura do quadro ao solo que é de 300mm e a altura total do quadro, dividindo esse valor ao meio, a Figura 21 apresenta o valor estimado do centro de gravidade.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, inserindo as variáveis na equação e obtido uma aceleração exposta na Equação 5.

$$A \approx \frac{V^2}{2X} \quad (5)$$

$$A \approx \frac{4,8522^2}{2(0,45157)}$$

$$A \approx 26,0688 \text{ m/s}^2$$

Ou seja, está é a aceleração mínima do impacto ao solo, para obter o valor a ser multiplicado pelo peso, a aceleração foi dividida pela aceleração da gravidade, o resultado está explícito na Equação 6.

$$\text{Força } G = \frac{26,0688 \text{ m/s}^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \quad (6)$$

$$\text{Força } G = 2,65$$

Portando, a intensidade da força de impacto para o estudo é considerada 2,65 vezes o valor do peso. A carga a ser aplicada é apresentada na Equação 7.

$$F = 2,65 * 1303,7888 \quad (7)$$

$$F = 3455,04 \text{ N}$$

Visto a geometria a ser analisada e poder computacional, é calculado a tensão limite a fadiga por meios analíticos para validação do projeto, para isso é utilizada a equação de Marin, dada pela Equação (4).

O coeficiente relacionado ao tamanho, é considerado o diâmetro da região do local da falha, visando compreender a falha daquela região, portanto temos os coeficientes dados no Tabela 8.

**Tabela 8 – Coeficientes Equação de Marin**

Coeficiente	Valor
$k_a$ (superfície - laminado)	0,9862
$k_b$ (tamanho – 19mm)	0,9048
$k_c$ (carregamento - flexão)	1
$k_d$ (Temperatura - <450 °C)	1
$k_e$ (confiabilidade – 50%)	1
$k_f$ (diversos)	1
$S'_e$ (0,5 $S_{ut}$ )	155 Mpa

Fonte: Autoria própria.

O fator  $k_a$  foi obtido considerando o material “usinado/laminado”, portanto, os coeficientes  $a$  e  $b$  são respectivamente: 4,51 e  $-0,265$ . Para fins de estudo da região de interesse, para o calculo do  $k_b$  foi considerado o diâmetro do suporte do canote que é de 19mm; sendo assim, os coeficientes para equacionamento são 1,24 e  $-0,107$ . Portanto o limite de resistência de limite a fadiga obtida pela equação de Marin é dado pela Equação (4).

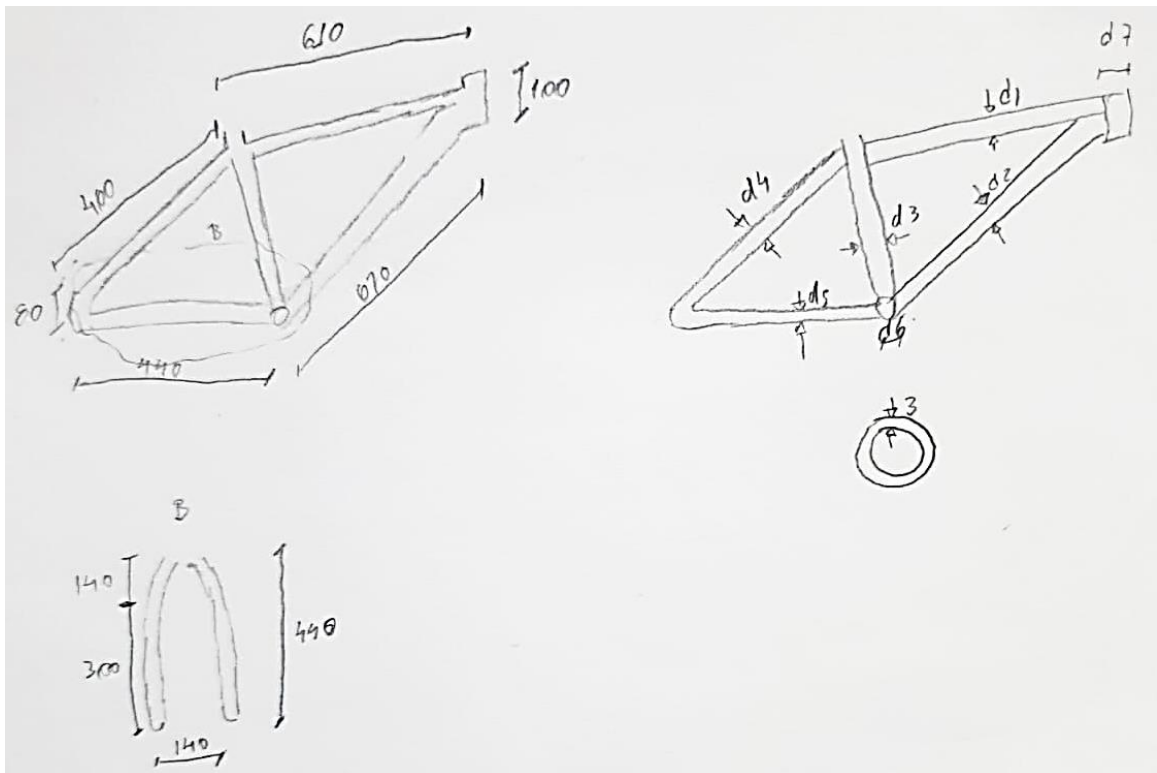
$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \quad (4)$$

$$S_e = 0,9862 * 0,9048 * 1 * 1 * 1 * 1 * 155$$

$$S_e = 138,3086 \text{ Mpa}$$

A modelagem do modelo anterior é necessária visto que o projeto tem como referência o modelo anterior e com a necessidade básica de obter um modelo com maior segurança, visto essa necessidade é modelado o quadro para realização de análises numéricas para obter o comportamento da estrutura, ou seja, o projeto utiliza como ferramenta principal para otimizar tempo de duração. A partir da necessidade, início da modelagem se dá pelo levantamento de dimensões fornecidas pela fabricante por meio de catálogos e coletas de medidas *in loco* para elaboração de um esboço manual com o objetivo de nortear a modelagem no software. A Figura 22 apresenta os esboços realizados.

**Figura 22 – Esboço**

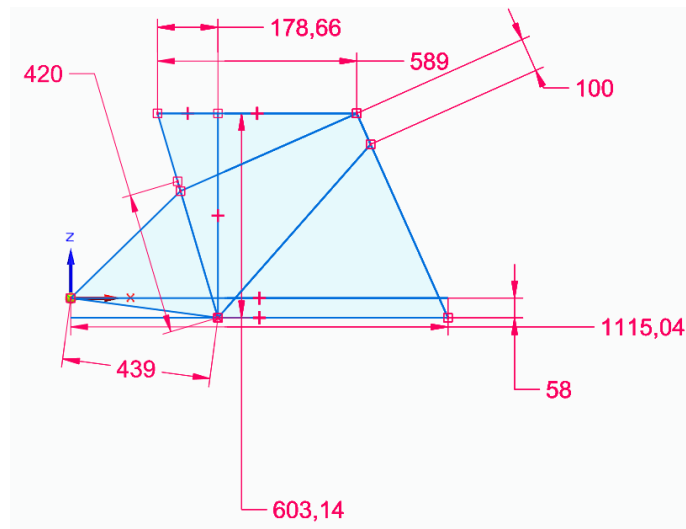


**Fonte: Autoria própria.**

A partir das coletas de medidas e realização do esboço, a modelagem se inicia no ambiente estrutura do Solid Edge versão estudantil, realizando a modelagem das linhas as quais a estrutura é inserida. A Figura 23 apresenta a modelagem de linhas que são as medidas macros do quadro.



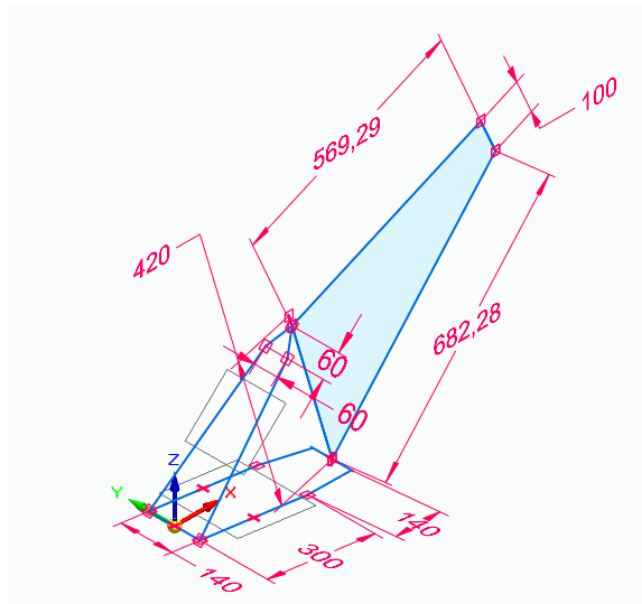
**Figura 23 – Esboço 3D das dimensões macro do quadro**



**Fonte: Autoria própria.**

Após modelagem das medidas macros do quadro, é elaborado a primeira versão das linhas em 3D para inserção dos perfis do quadro, a Figura 24 apresenta o primeiro modelo.

**Figura 24 – Primeiro modelo de linhas**

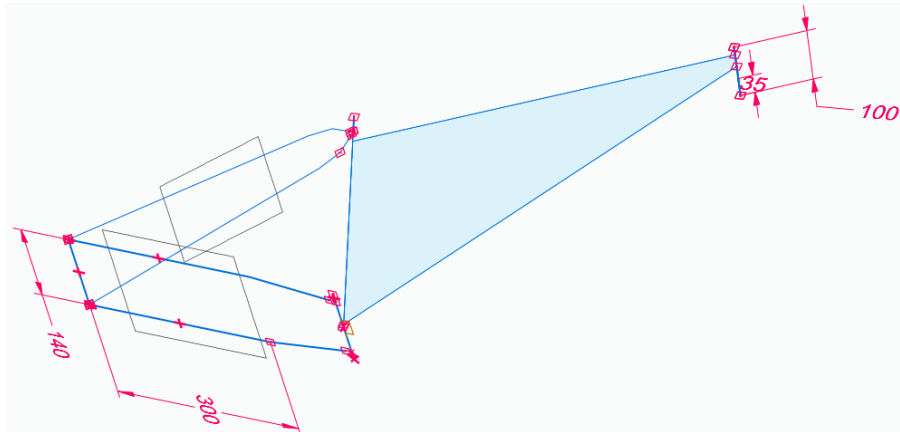


**Fonte: Autoria própria.**

Visto a necessidade de obter o modelo 3D, após a primeira modelagem é obtido as dimensões macros do quadro, sendo possível ajustar o modelo de linhas com alterações para que seja possível obter o modelo mais próximo do real. A Figura 25

apresenta o modelo de linhas adaptado para obtenção da estrutura mais próxima da real.

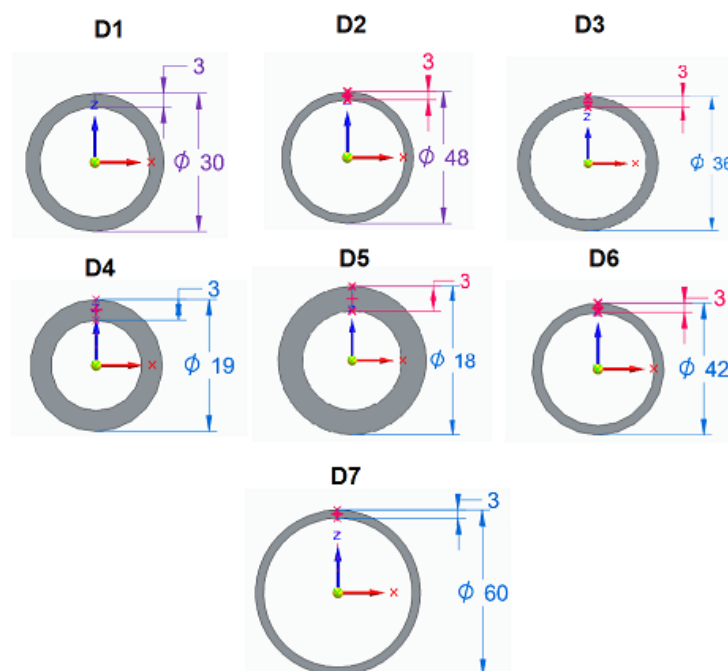
**Figura 25 – Modelo Final de linhas**



**Fonte: Autoria própria.**

Após modelagem das linhas que são a base da estrutura, no ambiente de peças ordenadas são elaborados os perfis dos tubos que serão inseridos na estrutura, a partir de seu diâmetro externo e sua espessura, a Figura 26 apresenta os perfis modelados para o modelo.

**Figura 26 – Perfis para modelo**



**Fonte: Autoria própria.**

O quadro todo é construído com tubos de espessura de 3mm, para simplificar processo de medidas e montagem, foi criada a nomenclatura referente aos tubos do quadro, as quais estão representadas no Tabela 9 juntamente com seu diâmetro.

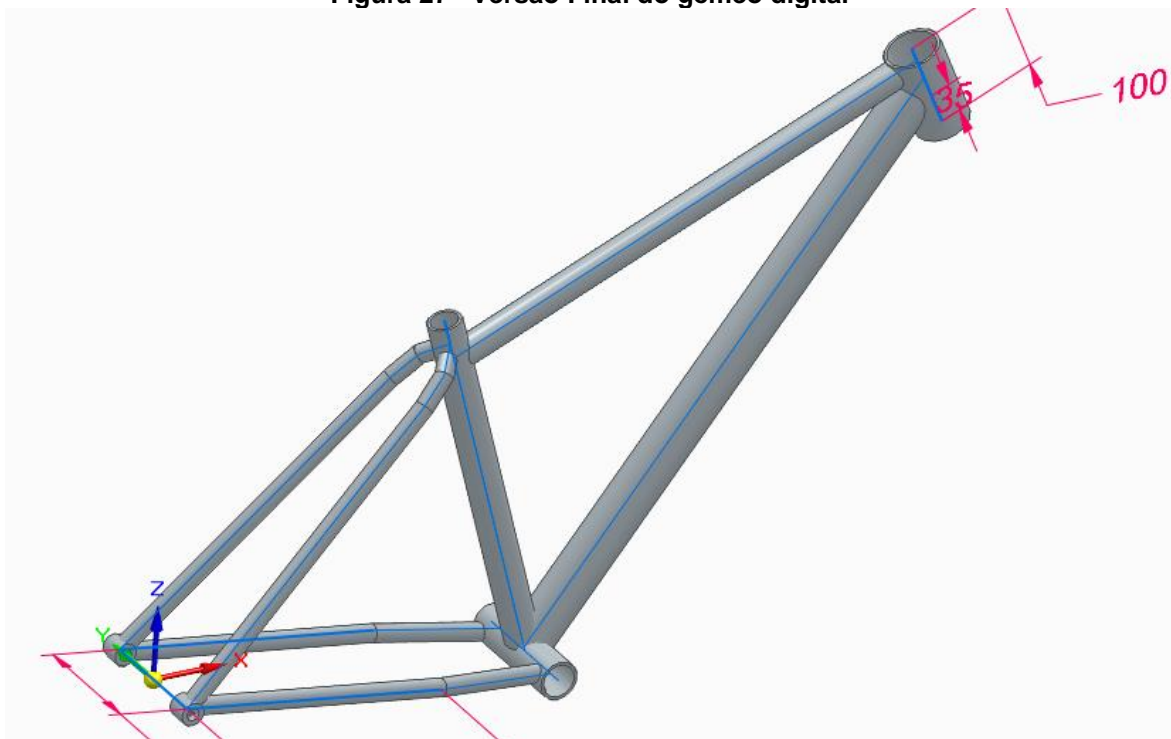
**Tabela 9 – Nomenclatura tubos**

Nomenclatura tubo	Simplificação	Dimensão (mm)
Tubo superior	D1	30
Tubo inferior	D2	48
Tubo do canote	D3	36
Suporte do canote	D4	19
Suporte da corrente	D5	18
Tubo do movimento central	D6	42
Tubo da caixa de direção	D7	60

Fonte: Autoria própria.

Após inserir os perfis, é obtido o modelo 3D do quadro, devido a necessidade de inserir as cargas e também de simular a fixação do quadro, é modelado a simplificação da estrutura onde acomoda o eixo da roda traseira da bicicleta, a Figura 27 apresenta a versão final do quadro já com a fixação.

**Figura 27 –Versão Final do gêmeo digital**

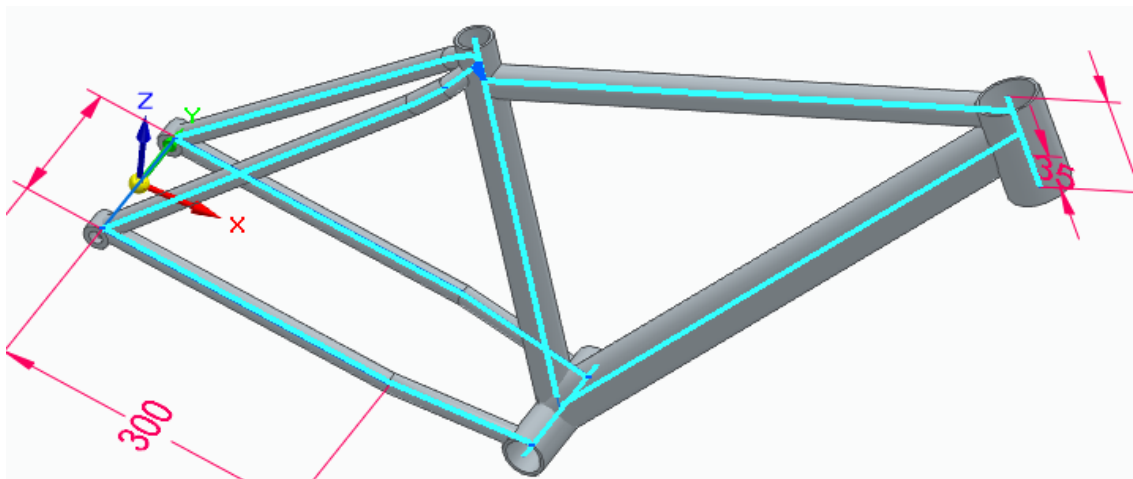


Fonte: Autoria própria.

A simulação é realizada no ambiente estrutura do software, visto a necessidade de estudar o comportamento da estrutura simulando uma treliça, é aplicado o material alumínio 6061 – T6, visto que é um dos materiais presentes na estrutura do quadro, e será utilizado esse material devido a limitação do software com relação a banco de dados de materiais.

Após selecionar a opção de estudo em viga e selecionar toda a estrutura, o software deixa explícito a treliça e conexões entre vigas são elaboradas para estudo, a Figura 28 apresenta a viga e suas conexões.

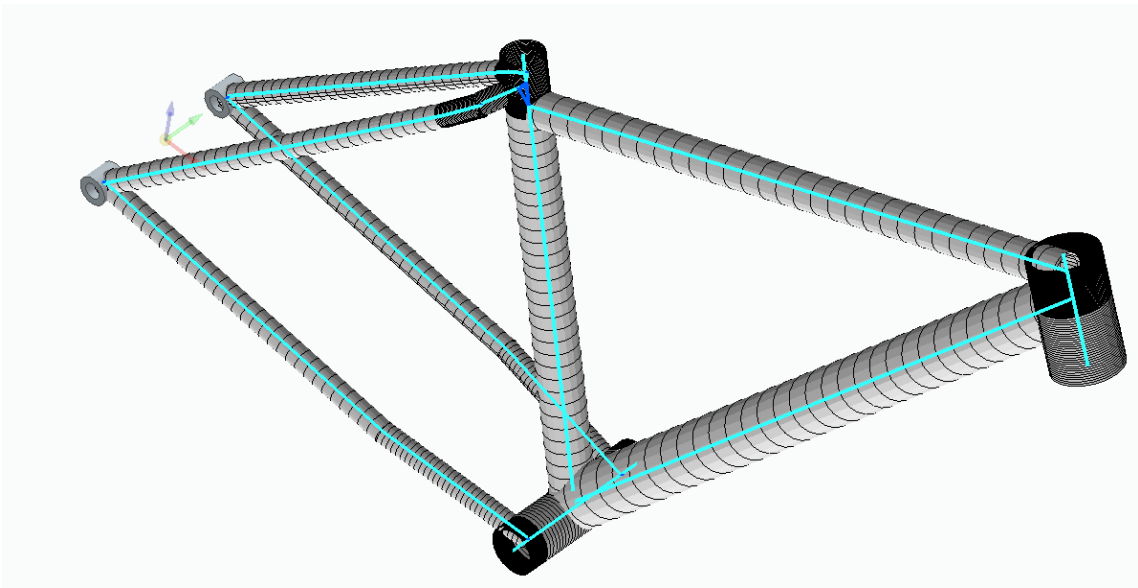
**Figura 28 – Treliça evidenciada**



**Fonte: Autoria própria.**

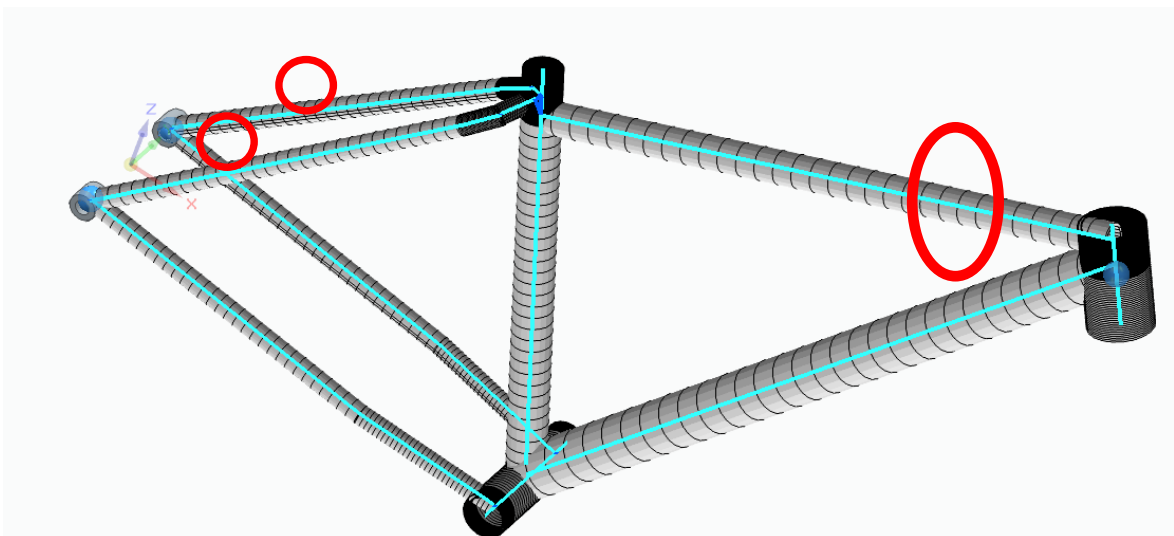
Após isso, foi necessário gerar a malha, para dividir a viga em regiões as quais serão estudadas, visto que a simulação é gerada no ambiente estrutura, a simulação é realizada considerando uma treliça, onde a região de maior interesse é nas extremidades, visto que são as junções, os concentradores de tensões, devido a isso, a malha não tem a necessidade de ser tão refinada quanto nos estudos de corpos sólidos.

A malha é gerada seguindo com a divisão das linhas em pequenas regiões as quais são aplicadas as cargas, lembrando que a simulação é realizada em ambiente de estrutura, portando o software faz o estudo na viga e simulando seu comportamento como treliça, analisando a viga em pequenas dimensões e determinando seu comportamento em seu comprimento. Na Figura 29 tem-se a malha gerada, onde pode-se observar quando menor o comprimento da linha, mais será dividida, tendo a região de maior interesse, com malha mais refinada, portando mais análises devido a viga ter sido dividida e mais seções.

**Figura 29 – Malha gerada**

Fonte: Autoria própria.

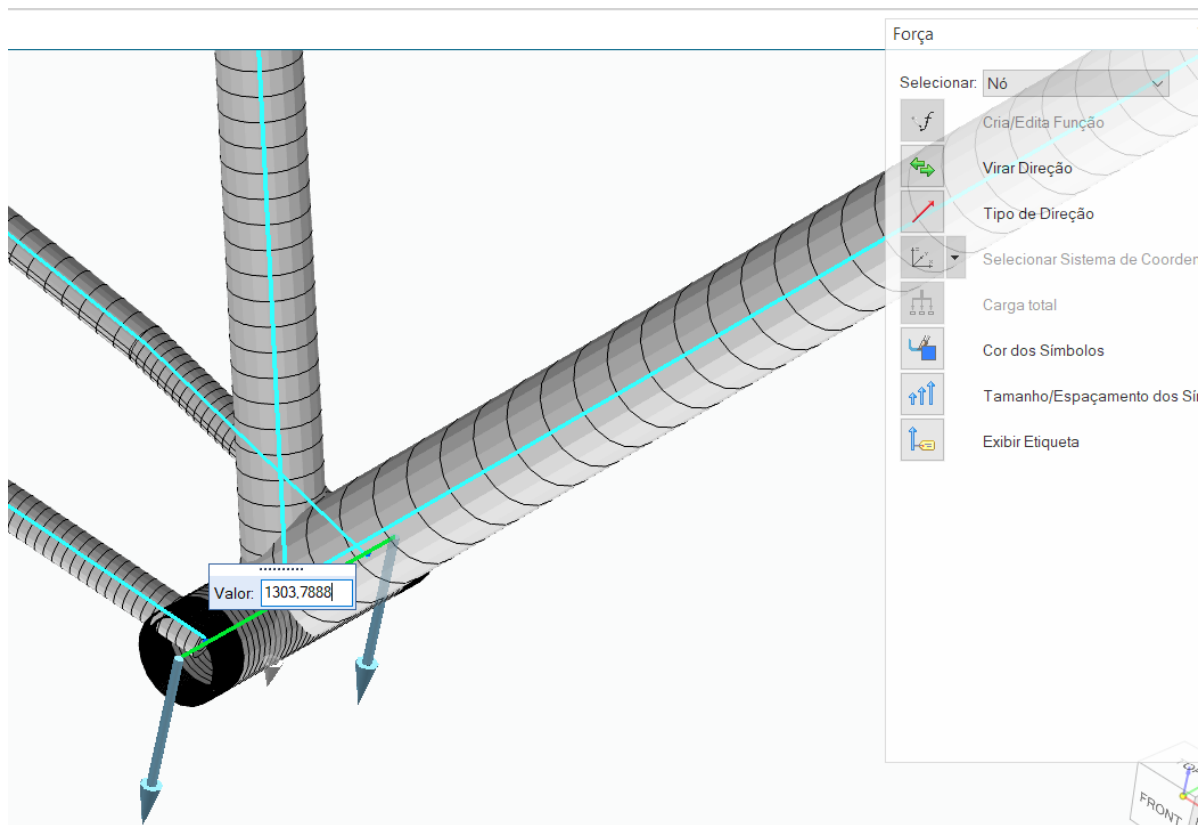
Com a malha gerada, o próximo passo é realizar as fixações simulando o comportamento em uso da bicicleta, e adicionar as cargas nas estruturas de acordo com os cenários definidos, as fixações são realizadas para determinar e simular comportamentos da estrutura em queda livre, podendo ser possível simular quedas e obter pontos críticos da estrutura. As fixações são realizadas nas extremidades destacas na Figura 30.

**Figura 30 – Pontos de fixação**

Fonte: Autoria própria.

Para realizar a configuração das cargas aplicadas na região traseira do quadro, visando simular o comportamento do ciclista em queda livre, o qual se desloca do selim em quedas e saltos, ficando apoiado nos pedais e no guidão, a carga quando aplicada aos pedais são transferidas para o tubo do movimento central, sendo assim a carga é aplicada nesse ponto afim de simplificar a estrutura e ser possível obter melhores resultados para o comportamento do quadro, as cargas são inseridas nos nós destacadas na Figura 31, duas cargas pontuais aplicadas nos nós referentes a extremidade do perfil.

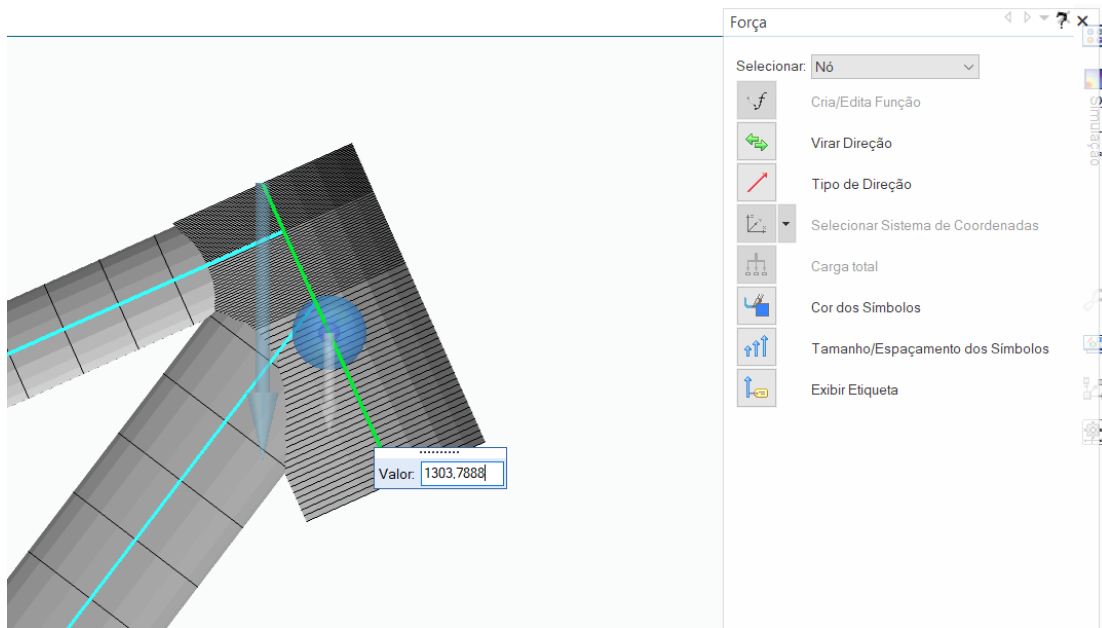
**Figura 31 – Aplicação carga referente ao eixo traseiro**



**Fonte: Autoria própria.**

Já quando o objetivo é inserir a carga na região dianteira do quadro, é aplicada a carga no nó, para simular a concentração de carga aplicada quando o ciclista chega no solo, ou seja, as cargas são transferidas do guidão diretamente para o tubo da caixa de direção, a Figura 32 apresenta a configuração de carga aplicada na região dianteira do quadro.

**Figura 32 – Aplicação carga eixo dianteiro**



**Fonte: Autoria própria.**

Essas são as configurações aplicadas para simular os cenários de estudo da estrutura, para controle dos resultados, a Tabela 10 apresenta a o controle criado.

**Tabela 10 – Tabela de controle final**

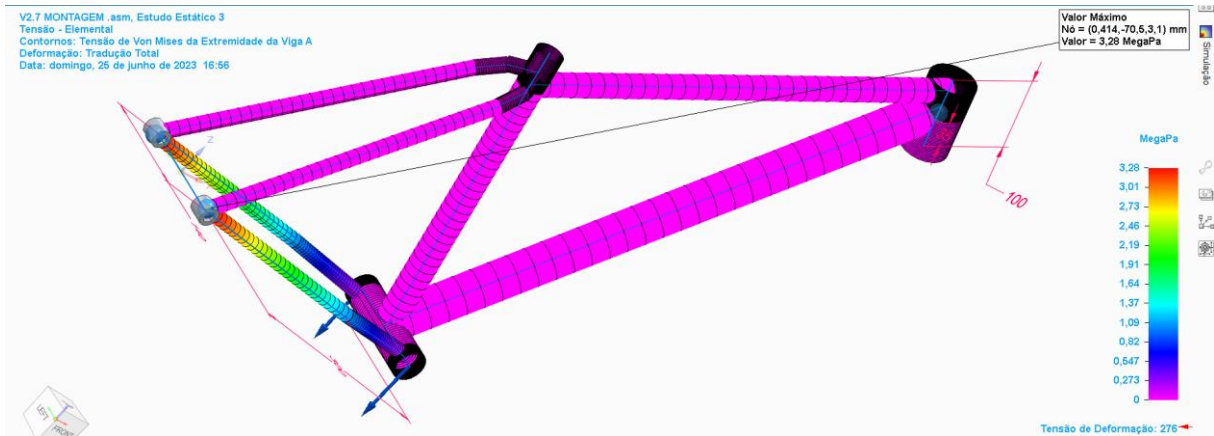
Eixo Tra-seiro	Eixo Dianteiro	Carga Eixo Tras.	Carga Eixo Diant.	Falha escoamento?	Coef. Segurança	Falha Fadiga?	Coef. Segurança
Fixo	Fixo	100%	0%				
Fixo	Fixo	50%	50%				
Fixo	Fixo	0%	100%				
Fixo	Móvel	100%	0%				
Fixo	Móvel	50%	50%				
Fixo	Móvel	0%	100%				
Móvel	Fixo	100%	0%				
Móvel	Fixo	50%	50%				
Móvel	Fixo	0%	100%				

**Fonte: Autoria própria.**

Realizando o estudo de caso do cenário 1, no qual os dois eixos são fixados, simulando o contato dos eixos ao solo no mesmo momento e a carga distribuída somente pelo eixo do movimento central, tem-se como resultado da simulação que não ocorre a falha da estrutura, onde tem-se que o ponto de maior tensão de Von Mises é de 3,28 MPa, sendo abaixo tanto da tensão de escoamento do material como da também tensão limite de fadiga, a região de interesse é a região de valor mínimo

de tensão, concentra-se a tensão na junção do suporte do canote e suporte da corrente, a Figura 33 apresenta o cenário 1.

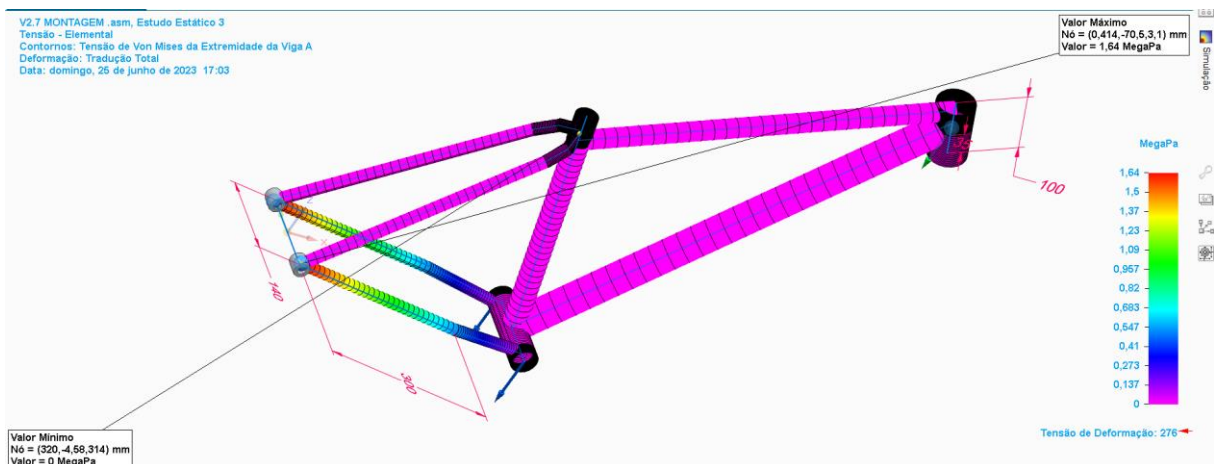
**Figura 33 – Resultado cenário 1**



Fonte: Autoria própria.

O cenário 2 é fixados os eixos como no cenário 1, a diferença se dá pela aplicação da carga, que é dividida entre o eixo traseiro e dianteiro, simulando a distribuição de cargas no eixo do movimento central e no guidão, essa simulação gera o resultado semelhante ao 1, tendo como diferença a melhor distribuição de cargas na estrutura, onde nesse cenário a estrutura não é fraturada, pois a tensão de Von Mises é de 1,64MPa no ponto de maior valor, a concentração de tensão está na junção do suporte do canote e suporte da corrente. A Figura 34 apresenta o resultado obtido no cenário 2.

**Figura 34 – Resultado cenário 2**

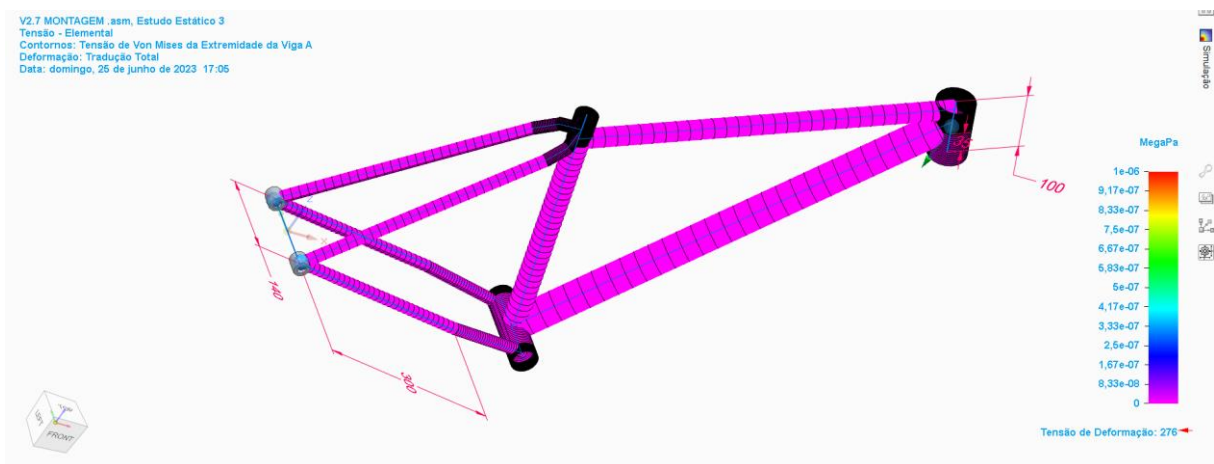


Fonte: Autoria própria.



Já o cenário 3 apresenta o comportamento mais ideal para estrutura, isso se dá pelo fato da estrutura estar sofrendo o impacto somente na região a qual está fixada, não gerando deformações devido a não ter geração momento na estrutura, neste cenário é possível corroborar com a afirmação de que a suspensão dianteira tem como objetivo realizar a distribuição de cargas, nesse cenário fica evidente que a carga foi toda projetada para o ciclista, onde a suspensão tem como papel reduzir a transferência de carga, a Figura 35 apresenta o resultado do estudo do cenário 3.

**Figura 35 – Resultado cenário 3**

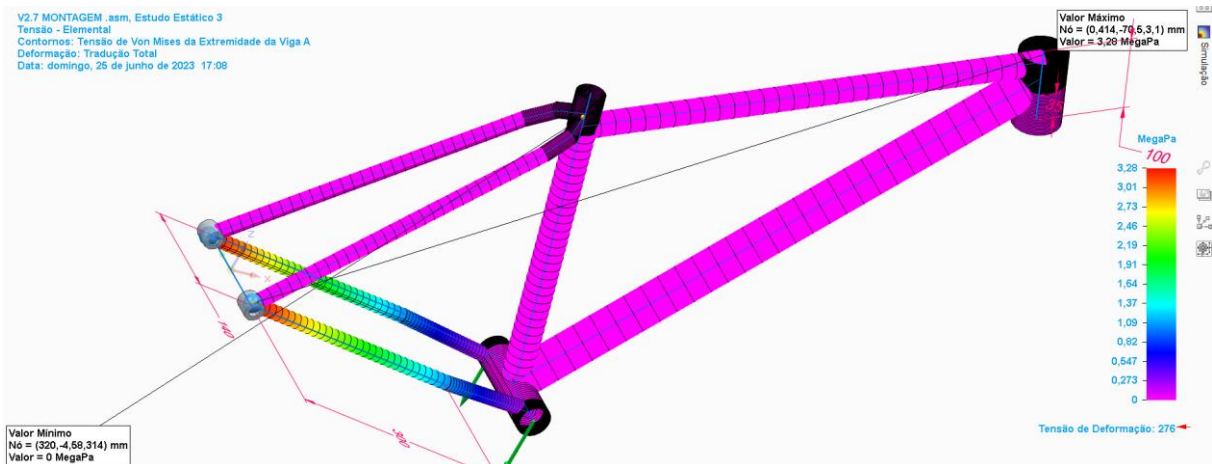


**Fonte: Autoria própria.**

Por fim a partir dos estudos realizados simulando os cenários 1; 2 e 3 propostos no presente trabalho, já pode-se concluir que durante o uso, recomenda-se que realize a aterrissagem com os dois pneus tocando ao solo no mesmo tempo e quando possível distribuir a carga em sua maioria no eixo dianteiro.

Os estudos dos cenários 4; 5 e 6 são a partir do eixo dianteiro móvel, simulando que o eixo traseiro toque primeiro ao solo, gerando assim, momento na viga, o que tende a gerar maiores tensões nas extremidades, o cenário 4 a carga é aplicada somente no eixo do movimento central, a simulação não apresenta falhas na estrutura, onde tem como ponto de maior tensão de Von Misses o valor de 3,28 MPa sendo abaixo da tensão de escoamento do material e também da tensão limite a fadiga, sendo detectado nesse cenário a similaridade com o cenário 1 devido a carga ser próximo ao centro de gravidade do conjunto, tendo a junção do suporte do canote e suporte da corrente como ponto concentrador de tensão e compressão deste último tubo, a Figura 36 apresenta o resultado da estrutura.

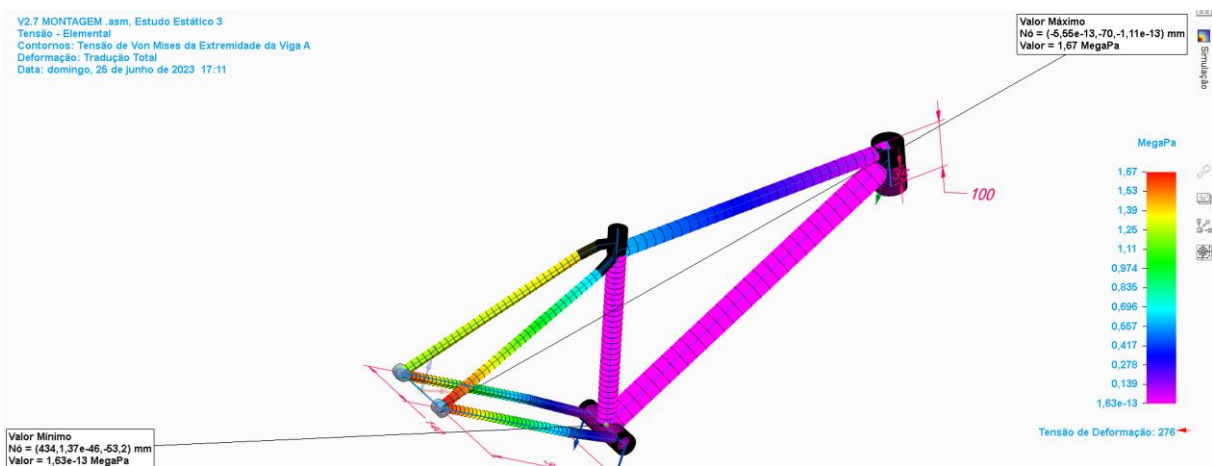
Figura 36 – Resultado cenário 4



Fonte: Autoria própria.

No estudo do cenário 5 foram aplicadas cargas no eixo traseiro e dianteiro, o comportamento da estrutura já sofre alterações na simulação, devido a possuir momento devido a carga no eixo dianteiro, onde pode ser constatado que o ponto concentrador de tensão ser o mesmo do cenário anterior, este cenário apresenta tração do tubo superior, essa tração indica que existe concentração de tensão no fim de sua estrutura, ou seja, na região de interesse, a Figura 37 apresenta os resultados do cenário 5, onde é verificado que não ocorre falha devido a sua tensão máxima de Von Mises ser inferior as tensões de escoamento do material e tensão limite a fadiga.

Figura 37 – Resultado cenário 5

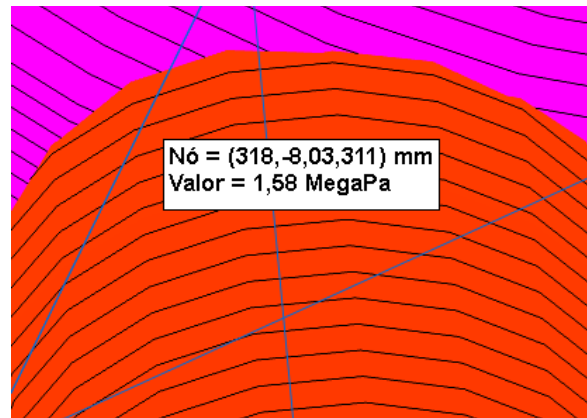


Fonte: Autoria própria.

Mesmo a estrutura não sendo avariada, quando se examina a região de interesse, pode-se verificar que esse cenário gera concentração de tensões, ocorre

devido a estrutura sofrer compressão e tração, assim concentrando tensões na região de interesse, não gera uma falha devido a tensão de Von Misses no ponto ser inferior as tensões de escoamento do material e de limite a fadiga, a Figura 38 apresenta o comportamento do nó no cenário 5, o qual apresenta 1,58MPa.

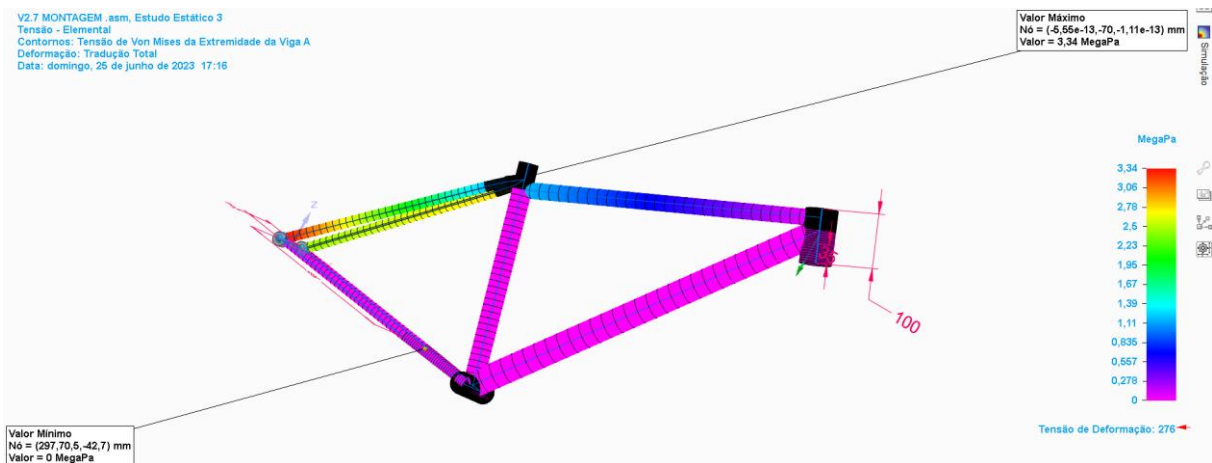
**Figura 38 – Destaque nó cenário 5**



**Fonte: Autoria própria.**

No cenário 6 a carga é aplicada simulando a distribuição de carga somente no guidão, neste estudo a estrutura não fratura, porém apresenta comportamento diferente dos outros cenários, se alterando a região de ponto mínimo de tensão, sendo na região central do suporte da corrente, se mantém o concentrador de tensões, sendo a junção do suporte da corrente e suporte do canote como concentrador de tensões, mas o ultimo suporte é o que sofre a tração. Nesse cenário se mantém a tração no tubo superior e também não gera falhas, devido a tensão de Von Misses máxima ser inferior as tensões de estudo, devido a esse cenário apresentar tração tanto no tubo superior e no suporte do canote, indica que o cenário é o que apresenta maior concentração de tensões na região de maior interesse, a Figura 39 apresenta o resultado do cenário 6.

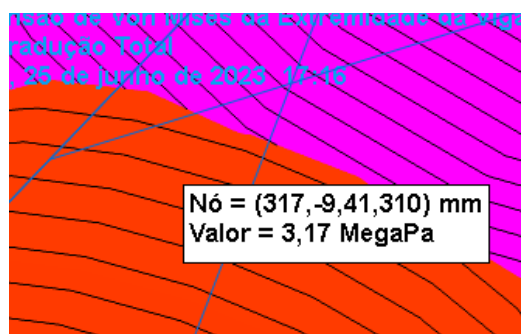
**Figura 39 – Resultado cenário 6**



Fonte: Autoria própria.

A região de interesse no cenário 6 apresenta maior solicitação de carga comparado aos demais cenários, visto que a tração ocorre no tubo superior e no suporte do canote, ou seja, na junção desses pontos de concentra a tensão devido a estrutura analisada ser uma viga, a Figura 40 apresenta o comportamento da região de estudo no cenário 6, constata-se a concentração de tensão mas não ocorre a falha devido ao valor de tensão de Von Mises ser inferior a tensão de escoamento do material e inferior a tensão limite de fadiga, mas possível determinar que neste cenário ocorreu a maior concentração de tensão nesta região, tendo como valor 3,17 MPa.

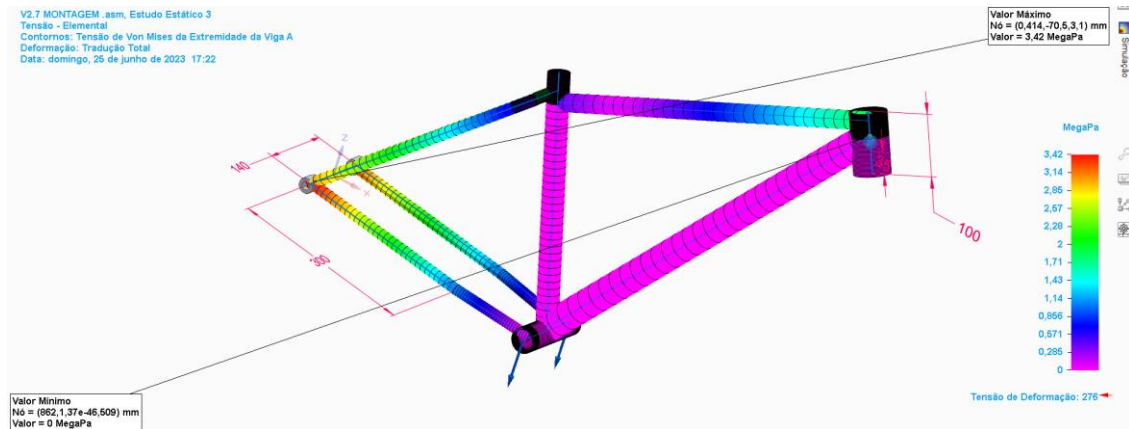
**Figura 40 – Destaque nó cenário 6**



Fonte: Autoria própria.

A partir dos estudos de casos nos cenários 4; 5 e 6, pode-se concluir que o estudo de caso com maior solicitação de carga é considerando o eixo traseiro fixo simulando o contato da roda traseira primeiro ao solo, e toda carga sendo aplicada no guidão, concentrando a tensão na junção do suporte do canote e tubo do canote.

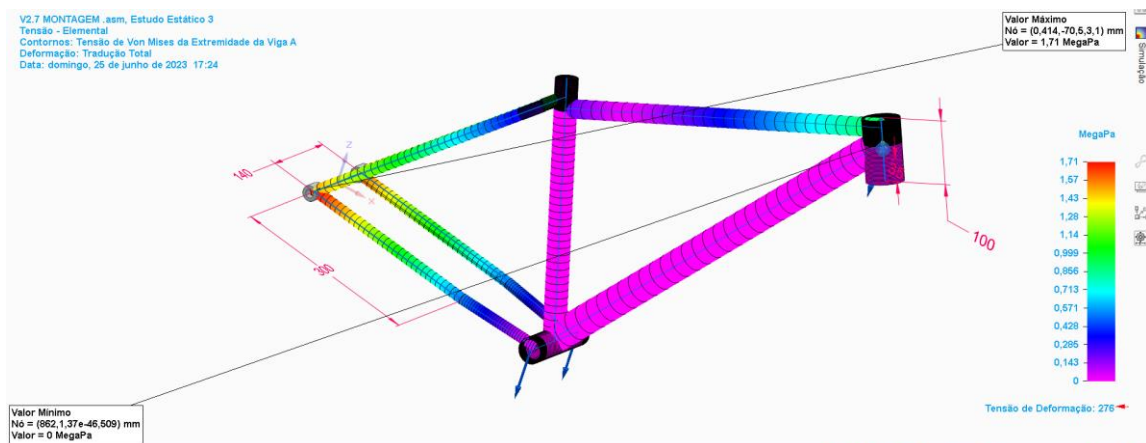
Figura 41 – Resultado cenário 7



Fonte: Autoria própria.

Os cenários 7; 8 e 9 tem como o eixo dianteiro fixo, simulando o contato do eixo dianteiro primeiro ao solo e as demais aplicações de cargas seguem o padrão das demais. A Figura 41 apresenta o resultado do cenário 7, onde é possível concluir que é um cenário que não apresenta riscos de fratura devido a tensão máxima de Von Mises ser inferior tensão de escoamento do material e a tensão limite a fadiga, neste cenário é detectado concentrações de tensão na junção do tubo da caixa de direção e tubo superior, e na junção do suporte da corrente e suporte do canote.

Figura 42 – Resultado cenário 8



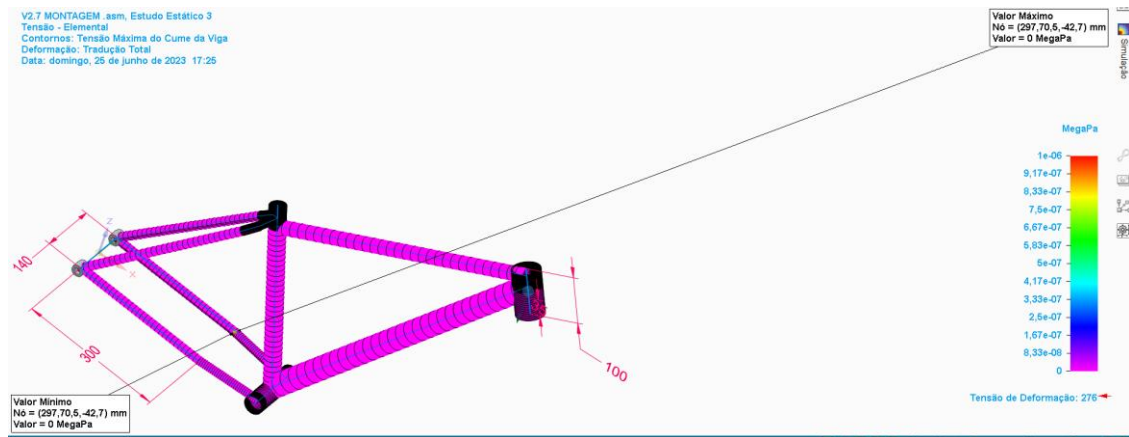
Fonte: Autoria própria.

O cenário 8 apresenta menores tensões máximas de Von Mises quando comparado ao cenário 7, isso se dá pelo fato de a carga estar sendo distribuída entre os dois eixos, tendo como aplicação a carga no eixo traseiro e no eixo dianteiro, que

é a região que está fixa, visto o contato com o solo e não gera momento, sendo possível verificar que a maior concentração de tensão ocorre na junção do suporte da corrente e no suporte do canote, a Figura 42 apresenta o resultado do cenário 8.

O cenário 9 e ultimo apresenta um comportamento interessante, esse cenário apresenta nenhum estresse para a estrutura, isso se dá pelo fato da carga estar aplicada na região que está engastada, a Figura 43 apresenta o comportamento da estrutura.

**Figura 43 – Resultado cenário 9**



**Fonte: Autoria própria.**

A partir desse estudo do cenário 9 apresenta a real necessidade do sistema de amortecimento, visto que não gera distribuição de cargas no quadro pois a carga é aplicada diretamente no eixo que está fixada, ou seja, não gera momento, nem tração e nem compressão de nenhum tubo, portando quando esse cenário é apresentado na realidade, toda a carga aplicada é projetada para os braços do ciclista, por meio desse cenário é possível determinar que sem o sistema de amortecimento, quando ocorre esse cenário, é possível gerar lesões aos ciclistas.

**Tabela 11 – Resultados**

Cenários	Eixo Tra-seiro	Eixo Dianteiro	Carga Eixo Tras.	Carga Eixo Diant.	Falha escoamento?	Coef. Segurança	Falha Fadiga?	Coef. Segurança
1	Fixo	Fixo	100%	0%	Não	84,14634146	Não	42,1672561
2	Fixo	Fixo	50%	50%	Não	168,2926829	Não	84,3345122
3	Fixo	Fixo	0%	100%	Não	-	Não	-
4	Fixo	Móvel	100%	0%	Não	84,14634146	Não	42,1672561
5	Fixo	Móvel	50%	50%	Não	165,2694611	Não	82,81952096
6	Fixo	Móvel	0%	100%	Não	82,63473054	Não	41,40976048
7	Móvel	Fixo	100%	0%	Não	80,70175439	Não	40,44111111
8	Móvel	Fixo	50%	50%	Não	161,4035088	Não	80,88222222
9	Móvel	Fixo	0%	100%	Não	-	Não	-

**Fonte: Autoria própria.**

Por fim, temos como resultado dos cenários de estudo, que não existem falhas de projeto, sendo as aplicações de cargas gerando os resultados apresentados na Tabela 11, os cenários 3 e 9 não apresentam coeficiente de segurança devido a não possuírem tensões de Von Mises.

Visto o cenário 6 ser o cenário que ocorre maior concentração de tensão do quadro, é elaborado cenários aumentando a carga aplicada nas simulações, a Tabela 12 apresenta os cenários que foram simulados a partir do cenário 6.

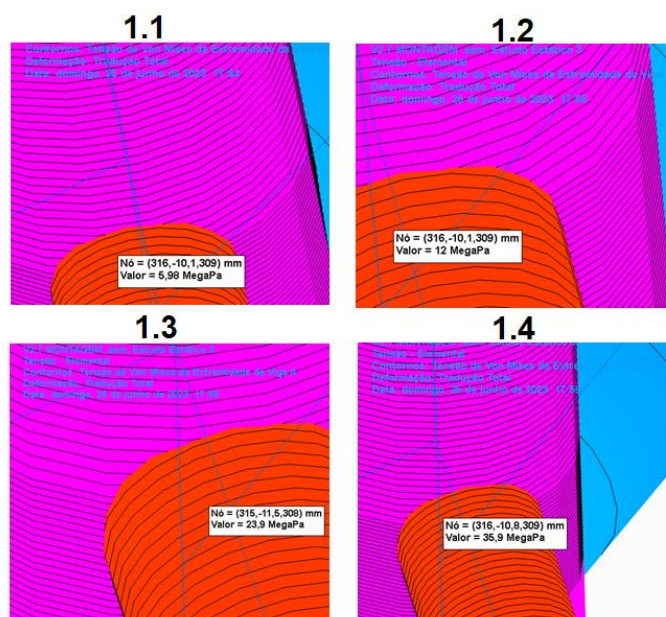
**Tabela 12 – Cenários propostos**

	Força G	Força N
1.1	5	6518,944
1.2	10	13037,89
1.3	20	26075,78
1.4	30	39113,66

Fonte: Autoria própria.

Realizados os estudos para compreensão do comportamento da estrutura quando solicitadas cargas mais elevadas, onde foi constatado que não há falha tanto devido ao escoamento quanto falhas devido ao limite de fadiga mesmo quando considerado a força de impacto 30 vezes o valor da força peso, a Figura 44 apresenta os resultados dos cenários propostos

**Figura 44 – Resultados cenários propostos**



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos dos cenários propostos para simular no cenário 6, foi calculado os coeficientes de segurança relacionado ao escoamento e a tensão limite a fadiga, os dados estão estratificados na Tabela 13.

**Tabela 13 – Estratificação resultados cenários propostos**

	Força G	Força N	Falha escoamento?	Coef. Segurança	Falha Fadiga?	Coef. Segurança
1.1	5	6518,944	Não	46,15384615	Não	23,12852843
1.2	10	13037,89	Não	23	Não	11,52571667
1.3	20	26075,78	Não	11,54811715	Não	5,786970711
1.4	30	39113,66	Não	7,688022284	Não	3,852607242

**Fonte: Autoria própria.**

Conclui-se as ações do DFMEA elaborado para o projeto, entretanto, ao fim das análises analíticas e numéricas é possível determinar que as ações visando otimizar o projeto foram essenciais para validar a qualidade do produto. Durante simulação dos cenários, o cenário 6 foi o que apresentou maior concentração de tensões na região de interesse, isso se dá pelo fato da geração de momento na viga, tracionando e comprimindo tubos, tendo como maior impacto disso na extremidade da estrutura. Foi constatado que não há falhas de projeto e retificado a necessidade da suspensão, onde esta foi projetada para projetar maior conforto para o usuário, onde verificado em alguns cenários ela é imprescindível para não ocasionar lesões ao ciclista

O DFMEA tem como objetivo melhorar o produto, onde a partir das ações propostas, foi possível determinar que o projeto não apresenta falhas na estrutura do quadro e distribuição de cargas na geometria, constatados por meio de análises analíticas e numéricas, onde foi obtido nos cenários propostos para estudo, tensões máximas de Von Mises inferiores a tensão de escoamento do material e inferiores a tensão limite a fadiga definida a partir da equação de Marin.

Visto que a partir do DFMEA foi possível concluir que nos cenários propostos, gera concentração de tensão na região de interesse no cenário 6 que é quando a roda traseira toca ao solo primeiro e a carga é aplicada no guidão, porém não chegou a fraturar mesmo em cenário aplicando a carga 30 vezes maior que o valor da força peso do conjunto ciclista e bicicleta, neste cenário foi obtido o fator de segurança de 3,85 relacionado a tensão limite a fadiga. É elaborado um novo DFMEA chamado de “DFMEA V2” com o objetivo de eliminar a causa da falha englobando ações as quais



impactam no processo de fabricação, sendo na qualidade final do quadro, visto que no projeto não apresentaram falhas. A Tabela 14 apresenta o DFMEA V2.

**Tabela 14 – DFMEA V2**

Sistema	Subsistema	Função	Modo de falha	Efeito	Sev	Causas/Mecanismos de falha	Oco	Controles de Prevenção e Detecção	Det	RPN	REF
Quadro de montagem	Tubo superior	Determina o posicionamento do ciclista	Rompi-mento/Fra-tura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Análise numérica baseada no equaciona-mento de cargas	9	270	1
										270	2
					10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	3
										90	4
										90	5
										90	6
	Tubo inferior	Responsável por fixar tubo do movimento central e tubo da caixa de direção	Rompi-mento/Fra-tura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Análise numérica baseada no equaciona-mento de cargas	9	270	7
										270	8
					10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	9
										90	10
										90	11
										90	12

Tubo do canote	Determina o centro de gravidade da bicicleta, influenciando na dirigibilidade, tornando mais eficiente em subidas ou mais estável em descidas	Rompi-mento/Fra-tura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Análise numérica baseada no equaciona-mento de cargas	9	270	13
									270	14
				10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	15
									90	16
									90	17
90	18									
10	Falha de montagem do canote	3	Inserção de um aviso na região do quadro	10	300	19				
Supor-tes do canote	Fixa o suporte da corrente ao tubo do canote	Rompi-mento/Fra-tura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Análise numérica baseada no equaciona-mento de cargas	9	270	20
									270	21
				10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	22
									90	23
									90	24
90	25									
Supor-tes da corrente	Determina dirigibilidade da bicicleta, podendo ser mais ágil ou mais estável	Rompi-mento/Fra-tura da estrutura	Avaria na estrutura, risco de acidentes	10	Carga acima da suportada	3	Análise numérica baseada no equaciona-mento de cargas	9	270	26
									270	27

								90	28	
								90	29	
				10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	30
								90	31	
				10	Carga acima da suportada	3	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	9	270	32
								270	33	
				10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	34
								90	35	
				10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	36
								90	37	
				10	Carga acima da suportada	3	Análise numérica baseada no equacionamento de cargas	9	270	38
								270	39	
				10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	40
								90	41	
				10	Falha de material	1	Análise numérica	9	90	42
								90	43	

Fonte: Autoria própria.

A partir do DFMEA V2 é elaborado as ações recomendadas para processo e recalculados o RPN's seguindo os novos valores de Severidade; Ocorrência e Detectabilidade, apresentado na Tabela 15.

**Tabela 15 – Ações recomendadas DFMEA V2**

REF	Ações recomendadas	Severidade	Ocorrência	Detecção	RPN
1	Análise numérica no Femap	10	2	3	60
2	Análise em software dinâmico	10	2	3	60
3	Inspeção via ultrassom e ensaios de líquidos penetrantes	10	1	1	10
4	Revisão do tipo de solda utilizada	10	1	1	10
5	Treinamentos operacionais em solda de alumínio	10	1	1	10
6	Solicitar para fornecedores análises de micro/macrografia das matérias primas	10	1	3	30
7	Análise numérica no Femap	10	2	3	60
8	Análise em software dinâmico	10	2	3	60
9	Inspeção via ultrassom e ensaios de líquidos penetrantes	10	1	1	10
10	Revisão do tipo de solda utilizada	10	1	1	10
11	Treinamentos operacionais em solda de alumínio	10	1	1	10
12	Solicitar para fornecedor análises de micro/macrografia	10	1	3	30
13	Análise numérica no Femap	10	2	3	60
14	Análise em software dinâmico	10	2	3	60
15	Inspeção via ultrassom e ensaios de líquidos penetrantes	10	1	1	10
16	Revisão do tipo de solda utilizada	10	1	1	10
17	Treinamentos operacionais em solda de alumínio	10	1	1	10
18	Solicitar para fornecedor análises de micro/macrografia	10	1	3	30
19	Inserção de um aviso na região do quadro	10	2	3	60
20	Análise numérica no Femap	10	2	3	60
21	Análise em software dinâmico	10	2	3	60
22	Inspeção via ultrassom e ensaios de líquidos penetrantes	10	1	1	10
23	Revisão do tipo de solda utilizada	10	1	1	10
24	Treinamentos operacionais em solda de alumínio	10	1	1	10
25	Solicitar para fornecedor análises de micro/macrografia	10	1	3	30
26	Análise numérica no Femap	10	2	3	60
27	Análise em software dinâmico	10	2	3	60
28	Inspeção via ultrassom e ensaios de líquidos penetrantes	10	1	1	10
29	Revisão do tipo de solda utilizada	10	1	1	10
30	Treinamentos operacionais em solda de alumínio	10	1	1	10
31	Solicitar para fornecedor análises de micro/macrografia	10	1	3	30

32	Análise numérica no Femap	10	2	3	60
33	Análise em software dinâmico	10	2	3	60
34	Inspeção via ultrassom e ensaios de líquidos penetrantes	10	1	1	10
35	Revisão do tipo de solda utilizada	10	1	1	10
36	Treinamentos operacionais em solda de alumínio	10	1	1	10
37	Solicitar para fornecedor análises de micro/macrografia	10	1	3	30
38	Análise numérica no Femap	10	2	3	60
39	Análise em software dinâmico	10	2	3	60
40	Inspeção via ultrassom e ensaios de líquidos penetrantes	10	1	1	10
41	Revisão do tipo de solda utilizada	10	1	1	10
42	Treinamentos operacionais em solda de alumínio	10	1	1	10
43	Solicitar para fornecedor análises de micro/macrografia	10	1	3	30

**Fonte: Autoria própria.**

Após validar por meio de análises analíticas, numéricas e metodologias de engenharia de produto foi possível comprovar que a falha não se deu devido a falha de projeto, o DFMEA V2 tem como ações visando o processo de fabricação, os quais possuem alguma interferência na qualidade do produto. Onde essas ações tem como objetivo inspecionar e analisar, tanto como as matérias primas e também a qualidade da mão de obra, sendo possível monitorar por meio de inspeções as quais garantam obter a qualidade dos operadores. Sendo análises de ultrassom para verificar porosidade na solda e inspeção de ensaio de líquidos penetrantes para validação de que a solda se aderiu com perfeição na estrutura.

O DFMEA V2 tem como principal foco o processo, entretanto o local interfere diretamente na qualidade do produto, afim de garantir a qualidade da solda, uma ação recomendada é realizar a inspeção do local de armazenamento dos eletrodos e também do local onde o procedimento é realizado, visto que as impurezas e umidades, os quais interferem diretamente na qualidade da solda. Visto este ponto, a capacitação em solda citado no DFMEA V2 visa melhorar a qualidade do produto, capacitando os operadores e os informando da importância que têm a limpeza, regulagem da máquina, tempo, aquecimento, temperatura, umidade e também o pós solda. A questão de ações voltadas para a solda e processo de soldagem é devido a literatura trazer evidências de que quesitos como: Limpeza, Temperatura, Umidade, Regulagem da máquina, entre outros. Interferem diretamente na qualidade da solda, podendo gerar porosidade e também a não aderência na estrutura soldada.

Uma possível causa da falha pode ser também a escolha da solda, visto que na literatura especifica 3 tipos de solda para ligas de alumínio, onde também se constata que a escolha incorreta da solda pode interferir na aderência e qualidade final do produto soldado, onde que caso exista porosidade reduz drasticamente a tensão de escoamento do material, podendo assim apresentam tanto uma fratura frágil ou uma fratura por fadiga.

Por fim, sendo uma das partes mais importantes o pós solda, retificar que o processo de pós solda, tempo e processo de tratamento térmico é o mais adequado para readequação das moléculas da ZTA dos materiais utilizados. Alinhado a escolha da solda, analisar a viabilidade de trabalhar com apenas uma liga de alumínio no quadro, visto que o modelo é uma junção de 6061-T6 e 6061-T4, podendo acarretar diferentes comportamentos na distribuição de carga e também na aderência da solda.

Outra possível ação que é recomendada é validar se a empresa possui certificação da Norma ASTM F2711 onde nessa norma são realizados os testes dos produtos para verificar quesito fadiga.

Uma ação a qual não foi possível realizar durante o DFMEA e pode ser utilizado por empresas é realizar por amostragem ensaios destrutivos em suas matérias primas para determinação de composição química dos materiais utilizados em sua fabricação e também corroborar com os valores estimados de resistência a tensão de escoamento e resistência de tensão de ruptura.

Como resultado do trabalho, elaborado dois DFMEA's que podem ser utilizados por empresas fabricantes do produto, o primeiro DFMEA sendo possível encontrar falhas no produto no quesito projeto, e o segundo DFMEA possível encontrar falhas no produto originadas no processo produtivo.

No presente trabalho foi elaborado e executado as ações do primeiro DFMEA de produto com o objetivo de melhorar o produto no quesito projeto, onde com as ações foi possível analisar o comportamento da estrutura a partir de equacionamentos e simulações. Após concluído as ações do DFMEA pode-se concluir que o produto possivelmente não apresenta falhas de projeto, estando dimensionado corretamente, sendo possível afirmar a hipótese de que a falha do produto se deu por situações existentes no processo produtivo, englobando situações de responsabilidade da operação, cenários os quais dependem da qualidade do local e por fim situações advindas da qualidade da matéria prima utilizada, sendo assim, o segundo DFMEA

elaborado segue com o plano de ação com o objetivo de eliminar tais causas, melhorando o produto.

Por fim destaca-se a importância e necessidade de ferramentas de engenharia para a elaboração de projetos, onde a partir da norma SAE J1739 foram elaborados DFMEA's onde foi possível ser assertivo para definição de ações para eliminar a falha, metodologia de engenharia reversa foi possível otimizar o tempo de construção de um modelo, reduzindo o tempo de elaboração. A junção de análises analíticas e numéricas foi possível determinar as variáveis para estudo e na análise numérica determinar o comportamento da estrutura quando exposta aos cenários propostos.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho realizado segue na linha de projeto, tendo como ferramentas de engenharia para construção e validações com o objetivo de elaborar um projeto adaptativo de uma estrutura metálica de bicicleta, seguindo o escopo da norma SAE J1739 e utilizando a junção de análises analíticas e numéricas como ferramentas de engenharia.

A modelagem e simulação foram simplificadas devido ao poder computacional no equipamento utilizado, entretanto, foi possível determinar que o produto possivelmente não apresenta falha de projeto, mesmo apresentando tensões concentradas no ponto de fratura da estrutura, contudo foi validado que a estrutura não falhou devido ao dimensionamento ou uso da estrutura, pode-se concluir a partir do trabalho elaborado, por meio dos equacionamentos e simulações que o dimensionamento do projeto está possivelmente correto, levantando a hipótese de que a causa raiz está no processo produtivo.

É importante ressaltar que as simulações foram realizadas no ambiente estrutura que é um dos três métodos de simulação, e foram aplicações estática, A partir do trabalho realizado, fica como sugestão futuros trabalhos, estudar de forma estática esse caso no software criado pela Nastran o Femap.

Conclui-se deste trabalho que a causa da falha foi devido ao processo produtivo, sendo elaborado um protocolo para validação de qualidade do produto e procedimentos para eliminar falhas no produto por meio de DFMEA's, otimizando o tempo das fabricantes. Tendo como sugestão de futuros trabalhos realizar as ações do DFMEA V2 elaborado neste trabalho, realizando estudo referente a análise numérica da solda, abordagem de métodos de controle de qualidade como ultrassom e confiabilidade de ensaios de líquidos penetrantes em soldas de alumínio, estudo referente a propagação de trincas em quadros de bicicleta e estudo na vertente de análise experimental.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRACILO. (2022, janeiro 10). **Indústria produz 599 mil bicicletas em 2022** acesso em 25 de setembro de 2022, disponível em <<https://www.abraciclo.com.br/site/press-releases-2023/2023/industria-produz-599-mil-bicicletas-em-2022/>>
- ALCAN, 1993, **Manual de Soldagem**, Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1a Edição.
- ALTSHULLER, B., 1998, “**A Guide to GMA Welding of Aluminum**”, *Welding Journal*, volume 77, no 6, June, pp. 49-55.
- ANDERSEN P. et al, 1996. “Metals Handbook, Vol 19 – Fatigue and Fracture”, ASM Handbook.
- ASM International. (1991). **ASM Handbook**, Volume 4: *Heat Treating. Materials Park, OH: ASM International.*
- AWS, 1996, *Welding Handbook*, volume 3, Materials and Applications – Part 1, American Welding Society, 8a edição, USA.
- BEER, F. P. Johnston, E. R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros**, vol 1 - Estática. 7ª ed., São Paulo: McGraw Hill, 2006.
- CIA DO PEDAL, **O que é hidroformagem?** acessado em 25 de setembro de 2022, disponível em <<https://www.ciadopedal.com.br/blog/o-que-e-hidroformagem/>>
- BRAGA, Neila de Almeida; FERREIRA, Neidenêi Gomes; CAIRO, Carlos Alberto Alves. **Obtenção de titânio metálico com porosidade controlada por metalurgia do pó**. *Química Nova* [online]. 2007, v. 30, n. 2. pp. 450-457, 13 de março de 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000200037>>.
- BOTELHO, Manoel Henrique Campos, 1942- **Resistência dos materiais para entender e gostar: um texto curricular** / Manoel Henrique Campos Botelho. São Paulo: Studio Nobel, 1998.
- BUDYNAS, R. G., & Nisbett, J. K. (2016). **Elementos de Máquinas de Shigley** [Recurso Eletrônico]. (J. B. de Aguiar, J. M. de Aguiar, & J. B. Rubert, Trad.). 10ª ed. Porto Alegre: AMGH.
- BURKE, E.R. “**High - Tech cycling, The science of riding faster**” *Human kinetics Profe.* United States, 2003.
- CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Editora LTC, 7ª edição, 2008.
- COLIM, G. M. *Fadiga dos materiais. Figura turbina hidráulica - USP*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. 22 p. Disponível em: <<http://pcc5726.pcc.usp.br/Trabalhos%20dos%20alunos/FADIGA%20DOS%20>>. Acessado em 20 de setembro de 2022.

CORRÊA D. L. Otimização da vida-fadiga do aço estrutural R4. Dissertação (Mestrado Craig Calfee and David Kelly. ***Bicycle frame materials comparison with a focus on carbon fibre construction methods***. *Technical White Paper*, 2002.

DIAS, A. et al. **Metodologia para análise de risco: Mitigação de perda de SF6 em** Dick, W., Carey, L., & Carey, J. O. (2015). ***Systematic Design of Instruction***. Pearson. **disjuntores**. Florianópolis, Nova Letra Gráfica & Editora, 2011. Dois, 1982. P. 754.

E. B. Haugen; P. H. wirsching. ***Probabilistic Design. Machine Design***, vol. 47, n. 12, 1975, p. 10–14. em Engenharia Metalúrgica) – Departamento de ciências dos materiais e metalurgia,

FISH, J., & Belytschko, T. (2007). **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Editora LTC.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., & WALKER, J. (2019). **Fundamentos de Física**, Volume 1. LTC Editora.

HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK R. **Fundamentos de Física**. 8.ed., Rio de Janeiro: LTC, 2009. v.3

HE, E. et al. ***Effect of porosities on tensile properties of laser-welded Al-Li alloy: an experimental and modelling study***. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95, 2018. 659-671.

Henrique Avancini vice-campeão de short track no Mundial de mountain bike. **Olimpíadas**, 27 de agosto de 2021. Disponível em: <<https://olympics.com/pt/noticias/mountain-bike-henrique-avancini-vice-campeao-mundial-de-short-track>>.

HSU, L. (2005). **Física para Ciências e Ingeniería** (Volumen 1). CENGAGE Learning.

JACOB FISH; Ted Belytschko; **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**, LTC, 2009. 2.

JOSEPH MARIN. ***Mechanical Behavior of Engineering Materials***. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1962, p. 224

KAUFMAN, J. G., & ROOY, E. L. ***Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications***. ASM *International*, 1a ed. Materials Park, OH, 2004.

KIM, Nam-Ho; SANKAR, Bhavani V. **Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos**. KURBAN, Amir Elias Abdalla (Trad.). Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2011. 353 p.

LINDSEY, J. Guide to Power Meter Metrics. Disponível em: <<http://www.bicycling.com/training/fitness/guide-power-meter-metrics>>. Acesso em: 15 Outubro 2022.

MEDEIROS, Luiz Gustavo. **Análise de falha em junta soldada**. Porto Alegre, RS, 2008.

MOTT, R. L. **Elementos de máquinas em projetos mecânicos**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

NABINGER, Eduardo. **ANÁLISE DINAMOMÉTRICA TRIDIMENSIONAL DA PEDALADA DE CICLISTAS**. 2006. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/8231/000571834.pdf?sequence=1> >.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2004.

NUNEZ, D. L. **Modelagem do Prognóstico e Gestão da Saúde de Máquinas Mecânicas no Contexto de Sistemas Ciberfísicos na Manufatura**. 2017: Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MARQUES, P. Villani, MODENESI, P. José e BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem - fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005

PAHL, GERHARD; BEITZ, WOLFGANG; FELDHUSEN, JÖRG; GROTE, KARL-HEINRICH. **Projeto na Engenharia: Fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. Edgard Blücher. São Paulo. 2005.

PETERSON, L. A.; LONDRY, K. J. **Finite-Element Structural Analysis: A New Tool for Bicycle Frame Design, The Strain Energy Method**. Bike Tech, Ann Arbor, v. 5, n. 2, 1986. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PÓVOA, A.A., 1988, “**Seminário Técnico de Soldagem do Alumínio e suas Ligas**”, Associação Brasileira do Alumínio, 26/10 a 17/11.

RECLAMEAQUI, Todas as reclamações sobre Quadro quebrado para Sense Bike, acesso em 25 setembro de 2022, disponível em < <https://www.reclameaqui.com.br/empresa/sense-bike/lista-reclamacoes/?problema=0000000000001524> >

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2ed Rio de Janeiro: Guanabara

REIS, R.A., 1996, “**Determinação de Parâmetros de Soldagem TIG com Arame Frio e Onda Retangular**”, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1996. (Tese, Mestrado)

RIBEIRO, Pedro Manuel Teixeira. **Análise dinâmica de um quadro de bicicleta**. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Mecânica, FEUP, Porto, julho de 2013. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/143389795.pdf>>.

SERWAY, R. A., & JEWETT Jr, J. W. (2018). **Princípios de Física: Mecânica Clássica e Relatividade**. Cengage Learning.

VANDERMARK, Robert. **Opportunities for the Titanium Industry in Bicycles and Wheelchairs**. Boston, 1997.

DICK, W., Carey, L., & Carey, J. O. (2015). *The Systematic Design of Instruction* (8th ed.). Pearson.

WEINGAERTNER, W. L., SCHROETER, R. B. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas**, 2a ed., São Paulo, 1991

YOUNG, H. D., & Freedman, R. A. (2012). **Sears and Zemansky's University Physics: With Modern Physics**. Pearson Education.  
Education.Education.