

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* AVANÇADO ARCOS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Lucas Souza Camargos

**ESTUDO DE UM QUADRO DE BICICLETA DE ALUMÍNIO
DA MODALIDADE DE *MOUNTAIN BIKE* APLICANDO O
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Arcos

25 de Novembro de 2022

LUCAS SOUZA CAMARGOS

**ESTUDO DE UM QUADRO DE BICICLETA DE ALUMÍNIO DA
MODALIDADE DE *MOUNTAIN BIKE* APLICANDO O MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS:**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* Arcos, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Paulo Gonçalves Pedroso.

Arcos

25 de Novembro de 2022

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - *Campus Avançado Arcos*

C173e
2022

Camargos, Lucas Souza.

Estudo de um quadro de bicicleta de alumínio da modalidade de *mountain bike* aplicando o método de elementos finitos / Lucas Souza Camargos. - Arcos, 2022.

51 f. : il. color.

Orientador: Marcos Paulo Gonçalves Pedroso.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica.) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus Avançado Arcos*.

1. Bicicleta. 2. Elementos Finitos. I. Pedroso, Marcos Paulo Gonçalves (orientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Avançado Arcos*. IV. Título.

CDD: 624

Elaborada por Meriely Ferreira de Almeida- CRB-6/2960



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Arcos
Diretoria de Ensino
Docentes Área Técnica
Av. Juscelino Kubitschek, 485 - Bairro Brasília - CEP 35588000 - Arcos - MG
3733515173 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DO TCC

Aos vinte e cinco dias do mês de novembro de dois mil e vinte e dois, às 16:00, se reuniu a banca composta pelo **Prof. Dr. Marcos Paulo Gonçalves Pedroso** (orientador), Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Avançado Arcos; **Prof. Me. Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana**, Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Avançado Arcos; **Prof. Me. Maurício Lourenço Jorge**, Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Avançado Arcos; para avaliar o trabalho intitulado “**ESTUDO DE UM QUADRO DE BICICLETA DE ALUMÍNIO DA MODALIDADE DE MOUNTAIN BIKE APLICANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**”, apresentado pelo aluno **Lucas Souza Camargos**, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico. Após apresentação e arguição, emitiu-se o parecer “**APROVADO**”, sendo a verificação das modificações sugeridas de responsabilidade do orientador. Para fins de registro na disciplina Trabalho Acadêmico Integrador X, a banca avaliadora emite, em consenso, o conceito final 85. Nada mais havendo a tratar a defesa foi encerrada às dezessete horas e quinze minutos e eu, Marcos Paulo Gonçalves Pedroso, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada por todos os avaliadores.

Arcos, 01 de dezembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Paulo Gonçalves Pedroso, Professor**, em 01/12/2022, às 16:15, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Lourenco Jorge, Professor**, em 01/12/2022, às 19:21, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana, Professor**, em 02/12/2022, às 19:59, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1394910** e o código CRC **D2AB9259**.

23808.001162/2022-99

1394910v1

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me dar saúde e sabedoria e poder chegar até aqui.

Agradeço toda a minha família, em especial aos meus pais Adilson e Edmar, minha irmã, meu sobrinho e a minha namorada, por estarem sempre ao meu lado, me dando todo apoio e amor. Além, disso, agradeço a eles por toda a compreensão nos momentos que estive ausente, e por toda ajuda nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus professores que contribuíram com a minha formação, e com a conclusão deste trabalho, em especial ao professor e orientador Marcos Paulo Gonçalves Pedroso.

Agradeço aos meus amigos que colaboraram com a escrita deste trabalho, e dos que fizeram parte da minha graduação de alguma forma.

Por fim, agradeço toda a equipe de baja Gray Wolf do IFMG por estar fornecendo ajuda e soluções eficientes.

"No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz."

Ayrton Senna

RESUMO

Sabendo que a bicicleta é um meio de transporte que permite tanto a prática de esportes quanto a mobilidade urbana, houve a iniciativa de conhecer um pouco mais sobre a estrutura principal deste veículo: o quadro. Assim, foram estudadas as principais modalidades do esporte de ciclismo e os materiais mais comuns utilizados nos quadros. Por fim, foi realizada a modelagem 3D a partir de medidas obtidas de um quadro real de *mountain bike* para realizar análises utilizando o Método de Elementos Finitos. Então, a partir disso, foi possível realizar a análise das tensões de Von-Mises. Além disso, foi executada a análise modal na estrutura obtida na modelagem 3D, avaliando os limites de resistência deste quadro. A partir disso, foram obtidos resultados acerca da tensão máxima que este suporta, de acordo com a carga empregada na estrutura. Concluindo com os resultados relacionados às deformações na estrutura a partir da frequência aplicada na análise modal.

Palavras-chave: Bicicleta, Elementos Finitos, *Mountain Bike*.

ABSTRACT

Knowing that the bicycle is a means of transport that allows both the practice of sports and urban mobility, there was an initiative to learn a little more about the main structure of this vehicle: the frame. Thus, the main modalities of the sport of cycling and the most common materials used in the frames were studied. Finally, 3D modeling was performed from measurements obtained from a real mountain bike frame to perform analyzes using the Finite Element Method. Then, from this, it was possible to perform the Von-Mises stress analysis. In addition, modal analysis was performed on the structure obtained in 3D modeling, evaluating the resistance limits of this frame. From this, results were obtained about the maximum tension that it supports, according to the load used in the structure. Concluding with the results related to the deformations in the structure from the frequency applied in the modal analysis.

Keywords: Bicycle, Finite Element, Mountain Bike

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Primeira bicicleta do Mundo - Draisienne	16
Figura 2 – Ciclismo BMX	18
Figura 3 – Bicicleta Tarmac SL7 Pro - Speed	18
Figura 4 – Sense Impact Carbon EVO - MTB <i>hardtrail</i>	19
Figura 5 – Campeonato Mundial de <i>Mountain Bike</i>	20
Figura 6 – Cannondale Scalpel Hi	21
Figura 7 – Modelo 3D de uma coroa de bicicleta	24
Figura 8 – Demonstração de malhas sobre peça de modelagem 3D	26
Figura 9 – Vista aproximada da análise por MEF	26
Figura 10 – Identificação de tubos do quadro de bicicleta	29
Figura 11 – Tipos de espessuras dos tubos	30
Figura 12 – Guidão em fibra de carbono	31
Figura 13 – Sistema vibratório representativo de quadro de bicicletas	33
Figura 14 – Diagrama de forças	33
Figura 15 – Gráfico de transmissibilidade vs razão da frequência	34
Figura 16 – Fluxograma	37
Figura 17 – Esboço do quadro	38
Figura 18 – Modelagem 3D quadro <i>Mountain Bike</i>	39
Figura 19 – Malha plotada no quadro	41
Figura 20 – Frequência e número de modos aplicados no quadro	43
Figura 21 – Tensão máxima - C1	44
Figura 22 – Deslocamento máximo - C1	45
Figura 23 – Tensão máxima - C2	45
Figura 24 – Deslocamento máximo - C2	46
Figura 25 – Ponto de concentração de tensão - C2	46
Figura 26 – Tensão máxima - C3	47
Figura 27 – Deslocamento máximo - C3	47
Figura 28 – Análise modal - 133,05 Hz	48
Figura 29 – Análise modal - 182,54 Hz	49
Figura 30 – Análise modal - 253,53 Hz	49
Figura 31 – Análise modal - 292,94 Hz	50
Figura 32 – Análise modal - 320,52 Hz	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do alumínio 6061-T6	39
Tabela 3.2 – Parâmetros de forças das análises	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
XCO	Cross Country Olímpico
XCM	Cross Country Maratona
BMX	Bicycle Moto Cross
MEF	Método de Elementos Finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Massa
E	Módulo de Young
ε	Deformação elástica
σ	Tensão aplicada
G	Módulo de cisalhamento
τ	Tensão cisalhante
γ	Deformação elástica de cisalhamento
ξ	Coefficiente de amortecimento
ω_n	Frequência natural
a	Aceleração da gravidade
F	Força/Carga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.0.1	<i>Início da bicicleta</i>	16
1.0.2	<i>Uso de bicicletas no esporte</i>	17
1.0.3	<i>Início do Mountain Bike(MTB)</i>	20
1.1	Justificativa	22
1.2	Objetivos	23
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	23
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1	Modelagem 3D e Solidworks	24
2.2	Metódo de elementos finitos (MEF)	25
2.3	Análise estática de tensões	27
2.4	Análise modal	27
2.5	Materiais usados na fabricação de quadros de bicicletas	28
2.6	Vibrações mecânicas e o conforto do ciclista	31
2.7	Módulos elásticos para materiais	36
3	METODOLOGIA	37
3.1	Fluxograma	37
3.2	Dimensionamento	37
3.3	Material usado no quadro	39
3.4	Análises usando o Método de Elementos Finitos	39
3.4.1	<i>Definição da malha</i>	39

3.5	Etapas para definir a análise estática	41
3.6	Análise estática	41
3.7	Análise modal	43
4	RESULTADOS	44
4.1	Análise estática	44
4.2	Análise Modal	48
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

1.0.1 *Início da bicicleta*

As bicicletas que conhecemos atualmente passaram por evoluções, assim como a maioria das máquinas desenvolvidas no passado. Inicialmente, as bicicletas foram criadas com o intuito de serem veículos de transporte de cargas com o custo mais baixo do que os de cavalos. Inventada pelo alemão Karl Friedrich Drais von Sauerbronn em 1817, e nomeada Draisienne, não apresentava pedais. O meio de locomoção deste veículo se dava com o impulso dos pés do condutor no solo (RIBEIRO, 2013). A Figura 1 mostra invenção do alemão Karl.

Figura 1 – Primeira bicicleta do Mundo - Draisienne



Fonte: Ribeiro (2013)

Como visto na Figura 1, a Draisienne não possuía pedais, isto causava cansaço excessivo ao condutor e o limitava com relação as distâncias que poderia percorrer. Para solucionar tal problema, o primeiro pedal foi criado em 1861, pelo francês Pierre Michaux, que foi instalado em uma versão evoluída da Draisienne, o Velocípede, que possuía duas rodas atrás, e uma direcional na dianteira do veículo, onde havia diretamente duas manivelas contendo os pedais. Em seguida, entre 1861 e 1881, James Starley criou roda de diâmetro maior e que possuía raios, essa criação contribuiu para a redução de peso das bicicletas, evitar que as rodas entrassem em colapso, e possibilitou realizar deslocamentos de maior distância em menor tempo. A partir dessas criações, a bicicleta foi passando por evoluções, uma após a outra, primeiramente a criação da corrente em simultâneo com a direção direta,

logo após, a invenção de John Boyd Dunlop, em 1887, o pneu. Este, a princípio se tratava de uma borracha rígida instalada ao redor da roda, que após alguns anos sofreu alterações e chegou-se um pouco mais próximo dos pneus que conhecemos hoje, através das mãos dos irmãos franceses Michelin, em 1897. A invenção dos irmãos Michelin entrou em vigor para a segurança dos condutores de bicicletas, quatro anos após a criação (RIBEIRO, 2013).

Visto que de 1880 em diante muitas invenções contribuíram para que a bicicleta se tornasse um veículo mais seguro e de mais fácil pilotagem. Daí então, foi nascendo o desejo das pessoas em criar competições das mais diversas modalidades utilizando este tipo de veículo, o que acarretou em grandes melhorias, através da busca de *performance*, segurança e confiabilidade (RIBEIRO, 2013).

1.0.2 Uso de bicicletas no esporte

O uso de bicicletas em todo o mundo atinge números elevados, no Brasil a frota de bicicletas supera a marca de 60 milhões de unidades pelo país, segundo Franco e Campos (2014). Estes números são explicados quando existe a comparação dos benefícios que uma bicicleta traz sobre veículos motorizados. O principal benefício é que além de reduzir o tempo de deslocamento entre pontos, contribuir para redução de gases poluentes ao meio ambiente, é que a bicicleta pode trazer melhorias na saúde e por consequência na qualidade de vida das pessoas (WEISS, 2021). Além de tudo, o custo de manutenções em bicicletas é relativamente mais baixo do que para outros veículos, salvo exceções (MERLI et al., 2006).

As bicicletas podem ser usadas tanto para meios de transporte quanto para prática de esportes (WEISS, 2021). No mundo do ciclismo, existem várias modalidades que usam os diferentes tipos de bicicletas disponíveis no mercado. São encontradas bicicletas para prática de *Bicycle Moto Cross* (BMX), onde se utiliza bicicletas com rodas de diâmetro com 20 polegadas, sem sistema de amortecimento e com apenas uma marcha. Este tipo de bicicleta é usado para realizar manobras e corridas em pequenos circuitos (ESPORTE, 2022). Na Figura 2 abaixo, é mostrada uma BMX.

Figura 2 – Ciclismo BMX

Fonte: esporte (2022)

Bicicletas de estrada, onde o aro possui um diâmetro maior e utiliza pneus de perfis finos afim de reduzir o atrito, peso e aumentar a velocidade e agilidade. São estas as bicicletas usadas nas grandes voltas e no famoso *Tour de France*, corrida tradicional francesa criada em 1903 (LESSA et al., 2017). Um modelo deste tipo de bicicleta pode ser visto na Figura 3 a seguir:

Figura 3 – Bicicleta Tarmac SL7 Pro - Speed

Fonte: Specialized (2022)

Também são encontradas bicicletas para a prática de *Mountain Bike*, (MTB). Estas usam aros de diâmetro semelhante aos que estão nas bicicletas de estrada, porém, utilizam pneus mais largos, e com cravos que aderem mais ao solo. Na maioria dos casos, contam com sistemas de amortecimento para diminuir as vibrações e impactos decorrente dos terrenos acidentados que estas bicicletas percorrem, o que proporciona maior conforto ao ciclista. Na Figura 4 pode ser observada uma bicicleta de *mountain bike hardtrail*, ou seja, sem suspensão no quadro.

Figura 4 – Sense Impact Carbon EVO - MTB *hardtrail*



Fonte: Sense (2022)

1.0.3 *Início do Mountain Bike (MTB)*

O MTB iniciou-se em 1970 na Califórnia. Em primórdios desta atividade desportiva, também denominada como Bicicleta de Todo Terreno (BTT), em países que usam idioma português, eram usadas bicicletas de uso cotidiano, chamadas "*Cruisers*", onde pneus de bitola mais largas eram adaptados, juntamente com freios de motocicletas, que possibilitava realizar trajetos de declives em altas velocidades em trilhos de animais, ou trilhos corta-fogos no meio de matas. A implementação de pneus mais largos em bicicletas de passeio, se deu pela necessidade de superar obstáculos presentes nos trajetos que as bicicletas de estrada não conseguiam transpor (SILVA, 2021). A seguir na Figura 5 são apresentados atletas profissionais de *Mountain Bike* em competição.

Figura 5 – Campeonato Mundial de *Mountain Bike*



Fonte: Pedala (2021)

Esta modalidade de ciclismo se desenvolveu rapidamente, passando por evoluções, tornando-se um esporte olímpico em 1996. A partir disso, as bicicletas foram sofrendo adaptações, ganhando *design* próprio, e conquistando o mercado (SILVA, 2021). Com isso, foi surgindo a necessidade de reduzir as vibrações decorrentes do terreno e aprimorar o quesito de conforto para os ciclistas, onde inspirando em suspensões de motocicletas, as primeiras suspensões de bicicletas foram criadas na década de noventa (RIBEIRO, 2013). Atualmente, as suspensões de bicicletas usam sistemas próprios, podendo ser encontradas com componentes simples como a mola, já em outras, é possível encontrar sistemas de ar e óleo, e até mesmo bicicletas *full-suspension*, como a mostrada na Figura 6.

Figura 6 – Cannondale Scalpel Hi



Fonte: (CANNONDALE, 2021)

A modalidade que é a mais praticada dentro do MTB é a *Cross Country* (XC). E ramificando esta modalidade, é encontrado o *Cross Country* estilo olímpico (XCO) e o estilo maratona (XCM). São estilos que podem usar as mesmas geometrias e configurações de bicicletas, o que difere basicamente de uma categoria para a outra é o formato de prova, onde o XCO tem formato de pistas curtas e técnicas, e o XCM são corridas de distância maior (BARQUILHA, 2018).

1.1 Justificativa

A iniciativa de estudar e compreender quais são as influências de fenômenos da engenharia sobre a estrutura de um quadro de bicicleta se deu a partir do interesse do autor pelo esporte de *mountain bike*. Assim, sabendo que há diferentes tipos de materiais empregados na construção de quadros de bicicleta, e diferentes geometrias da estrutura, o intuito deste trabalho é conhecer quais são os efeitos que as tensões e vibrações mecânicas podem ocasionar no quadro de uma bicicleta.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

O objetivo geral deste trabalho é realizar o estudo sobre a aplicação do método de elementos finitos em um quadro de bicicleta de *mountain bike*.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Realizar a modelagem 3D de um quadro de bicicleta;
- Estudar quais são os principais materiais usados na construção de quadros de bicicleta;
- Aplicar o método de elementos finitos no modelo 3D;
- Realizar análises estática e de vibração mecânica, buscando conhecer os limites da estrutura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Modelagem 3D e Solidworks

Na engenharia e em outros meios, os modelos 3D são fundamentais para realização de projetos. Os modelos 3D são protótipos virtuais que possibilitam visualizações, análises e alterações com precisão. Assim, modelagem 3D possibilita redução no custo e no tempo de produção de peças e equipamentos, já que, não são necessários gastos com protótipos reais que podem ser falhos. Em resumo, a modelagem 3D traz mais confiabilidade ao projeto, e otimiza o desenvolvimento de produtos, aumentando a qualidade final do equipamento ou peça produzida (MACKENZIE, 2019). Na Figura 7, é possível ver um modelo 3D de uma coroa de bicicleta.

Figura 7 – Modelo 3D de uma coroa de bicicleta



Fonte: Autoria própria, 2022

Ele oferece um campo amplo de ferramentas que contribuem para a vida dos engenheiros e projetistas. O *software* permite criar esboços e modelos 3D das mais variadas complexidades, e além disso, dispõe do uso de ferramentas de simulações e análises, o que o torna um *software* completo (SYSTEMES, 2022).

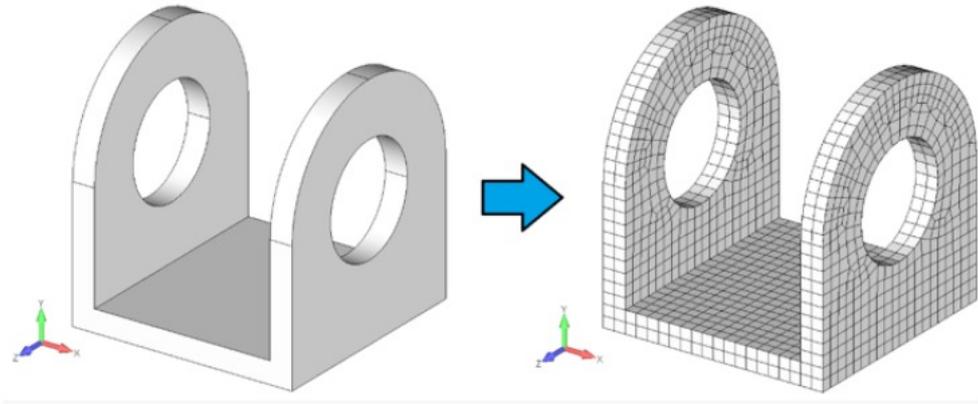
2.2 Método de elementos finitos (MEF)

O método de elementos finitos é uma forma de realizar análises e estudos das mais variadas estruturas e geometrias e com vários níveis de complexidade. De modo geral, na área de projetos estruturais, o projetista ou engenheiro deve garantir que a estrutura em análise não entre em colapso sob as variadas formas de operação e uso do objeto. O alicerce do método de elementos finitos é a resistência dos materiais, que é apoiado pelos Teoremas da Mecânica Geral (FILHO, 2018).

O método é possível de ser realizado manualmente, e há técnicas de cálculo que demonstram o passo a passo até se obter o resultado. Entretanto, para modelos com maior complexidade, o cálculo manual pode ser inviável, e o uso de *softwares* pode facilitar e reduzir o tempo de cálculo. Os *softwares* que trabalham para realizar análise de elementos finitos requerem que o projetista ou engenheiro conheça alguns dados da peça a ser analisada, como as dimensões, espessura, módulo de elasticidade do material, coeficiente de Poisson, densidade e outras características que podem influenciar nos resultados da análise. Além disso, ao conhecer as forças atuantes na estrutura, pressões, cargas e as condições de fixação, é possível determinar quais são as regiões mais solicitadas da estrutura a ser analisada. E então, com estes parâmetros definidos, correções podem ser feitas já no desenvolvimento do projeto. Ou seja, o método computacional oferece esta liberdade de gerar modificações sem grandes gastos em ferramental, tempo e financeiro, o que contribui para o desenvolvimento competitivo (FILHO, 2018).

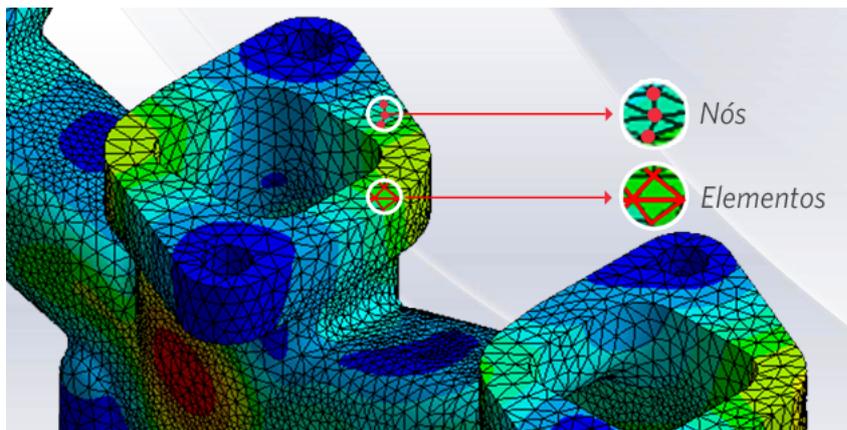
Segundo Mirlisenna (2016), o método propõe que um número infinito de variáveis desconhecidas, sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. Como são elementos de dimensões finitas, são chamados de “elementos finitos”. Os elementos geralmente são limitados por pontos, chamado nós, que são os vértices das geometrias e pontos de encontro entre os elementos. O conjunto de elementos é conhecido como malha. O método de elementos finitos aplica cálculos de engenharia, como as equações de equilíbrio, deslocamentos e afins em cada um destes elementos presentes na malha, possibilitando obter vários resultados de equações algébricas simultaneamente, e com aproximações precisas. Os resultados podem variar de acordo com o nível de detalhamento da peça, ou seja, o quão refinada é a malha da análise (FILHO, 2018). Na Figura 8 é demonstrada uma modelagem 3D com as malhas sendo inseridas na geometria, e na sequência, na Figura 9 é mostrado uma análise por Elementos Finitos.

Figura 8 – Demonstração de malhas sobre peça de modelagem 3D



Fonte: Brasil (2020)

Figura 9 – Vista aproximada da análise por MEF



Fonte: Mirlisenna (2016)

2.3 Análise estática de tensões

A análise estática de tensões é o método mais comum utilizado para realizar simulações estruturais e objetos. Este tipo de análise assume um comportamento linear e despreza as forças de inércia, e considera que ao retirar o carregamento, o sólido retoma a sua forma original.

O método de análise estática permite calcular deslocamentos, deformações, tensões, e reações nas ligações e por toda a estrutura de sólidos. A análise tem como objetivo observar se o material terá tensões superiores daquelas nas quais ele suporta, quando aplicada forças, torções e cargas externas. O colapso do material é conhecido quando as tensões aplicadas na estrutura, superam algum valor, como por exemplo o limite de escoamento. Assim, a partir das análises por este meio, é possível realizar reforços onde necessário, evitando o colapso dos sólidos (TAVARES; FONSECA, 2014).

2.4 Análise modal

A análise modal é um método de estudo que explora condições dinâmicas através de excitações por vibrações. Para isto, é necessário conhecer o mecanismo comportamental de estruturas e seus componentes, e entre eles os modos de vibração ou ressonâncias, que são propriedades inerentes de uma estrutura. Os modos de vibração são definidos pelas propriedades do material, como massa, rigidez e amortecimento, e também pelas condições de contorno. Estes possuem como características próprias as frequências naturais, o amortecimento modal, e um modo de vibração. Assim, automaticamente, se as propriedades do material ou condições de contorno são alteradas, os modos de vibração também se alteram (LEME, 2014).

Os estudos por análise modal são capazes de determinar as propriedades dinâmicas de uma estrutura pela identificação de seus modos de vibração. É considerado um modo de vibração a propriedade global de uma estrutura, onde, essa pode ser excitada em qualquer ponto com exceção de pontos nodais. Então, cada modo de vibração têm funções que o definem com a frequência natural específica e fator de amortecimento (LEME, 2014).

Os modos de vibração podem ser descritos de duas formas, como modos de corpos flexíveis ou modos de corpos rígidos. No geral, todas as estruturas podem ter até seis modos de corpo rígido, três modos de rotação e três de translação (LEME, 2014).

Contando com o grande avanço tecnológico dos analisadores computacionais desde os anos de 1970, o teste de impacto é utilizado com maior frequência, por oferecer velocidade, eficiência nos testes, e possuir baixo custo agregado para realizar as análises.

Segundo Schwarz e Richardson (1999), para realizar o teste de impacto são necessários o uso dos seguintes equipamentos:

- Martelo de impacto com célula acoplada;
- Acelerômetro;
- Analisador com dois ou quatro canais FFT;
- *Software* para interpretar o pós-processamento, e exibir os modos de vibração.

Entretanto, Schwarz e Richardson (1999) dizem que existem outras formas de obter os parâmetros modais, citando o uso analítico e experimental do Método de Elementos Finitos.

2.5 Materiais usados na fabricação de quadros de bicicletas

Os quadros de bicicletas voltadas para o *mountain bike* podem possuir diversos materiais para a sua fabricação. Os materiais mais usados atualmente são o alumínio e suas ligas, e compósitos, como a fibra de carbono. A escolha depende do quanto o ciclista estará disposto a investir em um quadro leve, rígido e resistente (RIBEIRO, 2013). Na Figura 10 são mostrados os tubos que compõem a geometria de um quadro, e em seguida são mostradas algumas características de cada tipo de material com a sua devida aplicação.

Figura 10 – Identificação de tubos do quadro de bicicleta

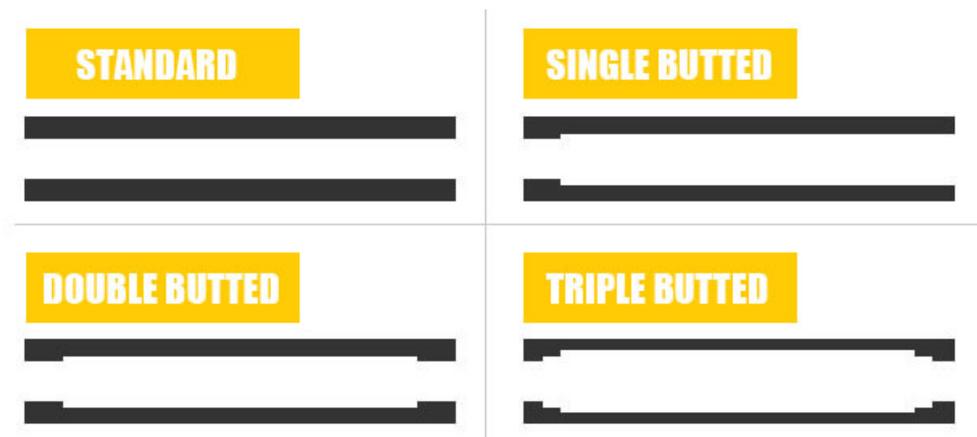


Fonte: Brasília (2013)

- **Alumínio:** Os quadros fabricados em ligas de alumínio possuem como característica o baixo peso, e baixo custo. Além disso, o alumínio não é um material que sofre processo de oxidação, o que pode contribuir para longevidade dos quadros. Entretanto, estes são mais propensos a serem condenados por falhas de fadiga ao longo do tempo, e em caso de impactos mais bruscos, os danos no quadro podem ser severos e de difícil recuperação (PEREIRA et al., 2020).

A espessura dos tubos do quadro é um fator determinante para o projeto final da bicicleta. A espessura determina o peso e a resistência oferecida para o ciclista durante a pedalada. Existe uma classificação com quatro tipos de tubos de alumínio, onde *standart* é um tubo com uma única espessura durante todo o seu comprimento, tubos *Single Butted* são aqueles que possuem apenas uma das extremidades com a espessura diferente do restante do tubo. Os tubos *Double Butted* e *Triple Butted* possuem duas ou três espessuras diferentes em todas as extremidades dos tubos, como mostrado na Figura 11 (BRASÍLIA, 2013).

Figura 11 – Tipos de espessuras dos tubos



Fonte: Brasília (2013)

A principal razão para utilizar este método de espessuras em quadros de alumínio é a redução de material em locais que não há necessidade, e reforço em pontos que sofrem mais esforços (BRASÍLIA, 2013).

- **Liga 6061:** A liga de alumínio 6061, é um conjunto de materiais que em sua composição contém uma combinação com magnésio, silício e o alumínio. Em alguns casos específicos, esta liga pode ser completada com outros componentes, como o ferro, cobre, zinco, cromo, manganês e o titânio. Uma característica desta liga, é que ela é capaz de produzir uma boa soldabilidade. Todas as ligas provenientes da Liga 6061 têm a mesma densidade e também rigidez. O que as difere é a resistência que possuem de acordo com a combinação de elementos de liga específicos, e também variam de acordo com o processo de têmpera que o material é submetido. Dentre os três tipos de têmperas que existem para esta liga de alumínio, a mais indicada e usada na construção de quadros de bicicletas é a 6061-T6, e por isso, também é muito utilizada na fabricação de outros componentes da bicicleta como guidões, canotes de selim e avanço de guidão (RIBEIRO, 2013).
- **Liga 7005:** A combinação de alumínio com zinco forma a família de ligas 7005. Na composição deste metal, pode haver a combinação de outros materiais, como o magnésio, silício, cobre, ferro, manganês, cromo e o titânio. Comparando a liga 7005 com a liga 6061, tem-se que, a 7005 é mais resistente, embora mais frágil do que a comparada. Esta liga, tem como característica produzir quadros mais baratos por não possuir um processo de tratamento térmico dispendioso, e então para que possa ter a resistência comparada com a primeira liga descrita acima, ela necessita de uma massa maior de materiais, o que resulta diretamente no peso final da bicicleta (RIBEIRO, 2013).

- **Fibra de carbono:** Segundo (RIBEIRO, 2013), a "*fibra de carbono é um termo genérico que se refere a uma diversa gama de materiais sintéticos que, combinados entre si, permitem a criação de um material composto, o compósito.*" Este compósito gerado, é mantido em contato com resinas de epóxi que permitem a resistência mecânica elavada, baixo peso e elevada rigidez, também passa por tratamentos térmicos. Geralmente, este produto é fornecido em tecidos, em rolos para a fabricante final que depois aloja as malhas em moldes para desenvolver o objeto almejado. A grande vantagem deste material, é que ele permite diversas combinações de engenharia, onde o quadro da bicicleta pode ser rígido, maleável e resistente à diferentes eixos de torção, tudo isso, é garantido de acordo com a orientação das fibras do tecido e depende exclusivamente das prioridades do projeto que se deseja obter. Além do mais, pode ter aplicações das mais diversas, como a confecção de outros componentes dentro do ciclismo além de quadros, e na indústria automotiva, aeronáutica e ortopédica (RIBEIRO, 2013). Na Figura 12 é mostrado a fibra de carbono de um guidão de bicicleta.

Figura 12 – Guidão em fibra de carbono



Fonte: Autoria própria, 2022

2.6 Vibrações mecânicas e o conforto do ciclista

É evidente que há a necessidade de dosar entre o conforto e resistência do quadro para que ele suporte todas as cargas, inclusive a massa do ciclista, e gerar conforto ao mesmo. Assim, é necessário ressaltar a importância das vibrações mecânicas para os engenheiros ao desenvolver um novo quadro de bicicleta. A presença do excesso de vibrações durante a prática do *mountain bike* é um fator importante, pois elas podem influenciar diretamente no desempenho do atleta (RIBEIRO, 2013). As vibrações transmitidas ao

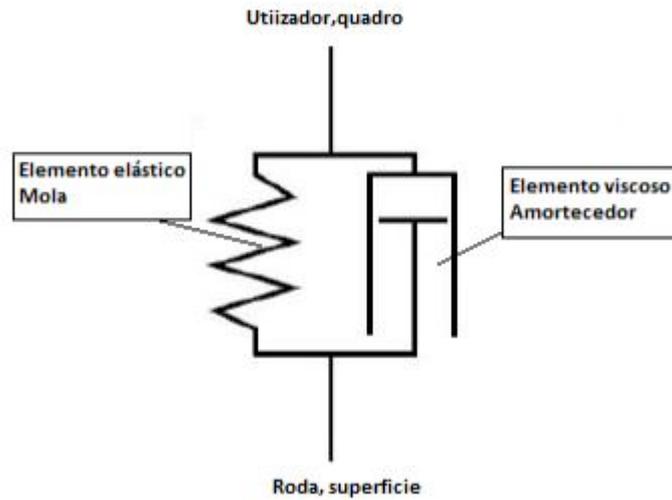
ciclista são provenientes do terreno e estradas em que a bicicleta trafega. Há alguns fatores de calibração e componentes da bicicleta que influenciam na absorção e propagação da vibração, podendo diminuir ou aumentar a sensibilidade do usuário. Estes itens são o tipo de pneus, pressão de calibração dos mesmos, densidade do selim, manoplas e até mesmo o peso do ciclista. Esta vibração é sentida pelo ciclista nas partes do corpo que estão em contato com o equipamento, sendo as nádegas, mãos e pés. Quando a estrutura da bicicleta não é adequada, expõe o ciclista a vibrações excessivas, o que não oferece conforto para o ciclista, e pode acarretar danos na saúde do mesmo, como aumentar as chances de dores musculares, enjoo e outras enfermidades (ROCHA, 2019).

As vibrações mecânicas causadas pela bicicleta são direcionadas ao corpo humano, o que pode causar ressonância. Então, as vibrações são classificadas de acordo com suas particularidades e dentro da normatização da ISO 2631-1, de 1997. São conhecidos alguns valores de exposição as vibrações que geram danos a saúde, como para o intervalo de 5 a 10 Hz, são sentidas alterações e incômodos na região torácica e abdominal, para a frequência de 20 a 30 Hz, a região craniana e muscular que a sustenta, são as afetadas, para a faixa de 30 a 60 Hz, a região que pode sofrer danos é a dos olhos. Um sistema biomecânico resume e simula a presença física de um corpo humano em um sistema linear, para obter um sistema massa-mola amortecido. Assim, o valor da aceleração RMS quantifica a vibração em um determinado período de tempo, sendo definida na Equação 1 a seguir (ROCHA, 2019).

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [a(t)]^2 dt} \quad (1)$$

Além dos possíveis grandes danos a saúde do corpo do ciclista, na maioria dos casos, as vibrações causam efeitos indesejáveis também na estrutura mecânica. São vistos como problemas relacionados as vibrações as amplitudes de movimento excessivas, excitação das frequências de ressonância da estrutura, o que leva a elevadas tensões podendo causar ruptura, desgaste e instabilidade do equipamento. A crescente preocupação na engenharia com os fenômenos vibratórios tem causado um aumento da necessidade de inovar e otimizar, juntamente com regulamentos e normas técnicas de segurança. Isto contribui para que o mercado se torne cada vez mais competitivo, melhorando a qualidade final dos produtos, que sofrem menos com as vibrações, e com peso reduzido (RIBEIRO, 2013). Um sistema básico e representativo do quadro de uma bicicleta no meio das vibrações pode ser visto da seguinte forma, como na Figura 13.

Figura 13 – Sistema vibratório representativo de quadro de bicicletas

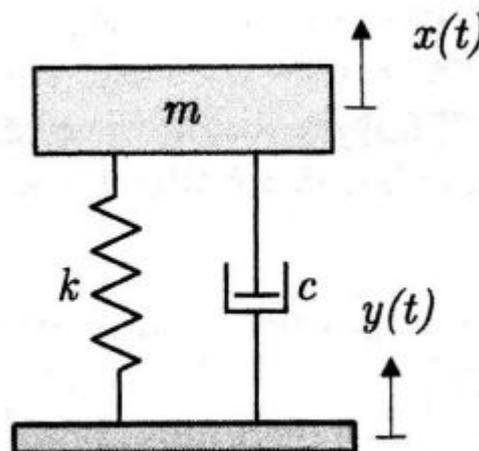


Fonte: Ribeiro (2013)

Para que o engenheiro resolva problemas de vibrações, ele necessita estar familiarizado com modelos matemáticos, e técnicas de análises, dentre cálculos e *softwares* de simulação (RIBEIRO, 2013).

Como explicado anteriormente, o ciclista juntamente com o solo exerce forças sobre o quadro, isto gera o seguinte diagrama de forças da Figura 14, onde $y(t)$ é a amplitude de vibração vinda das irregularidades do solo, e $x(t)$ é posição da massa do ciclista que é exposta a uma amplitude.

Figura 14 – Diagrama de forças



Fonte: Ribeiro (2013)

Então, após o reorganizar a equação do movimento, temos que o sistema pode ser aplicado como na Equação 2 a seguir:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ky + c\dot{y} \quad (2)$$

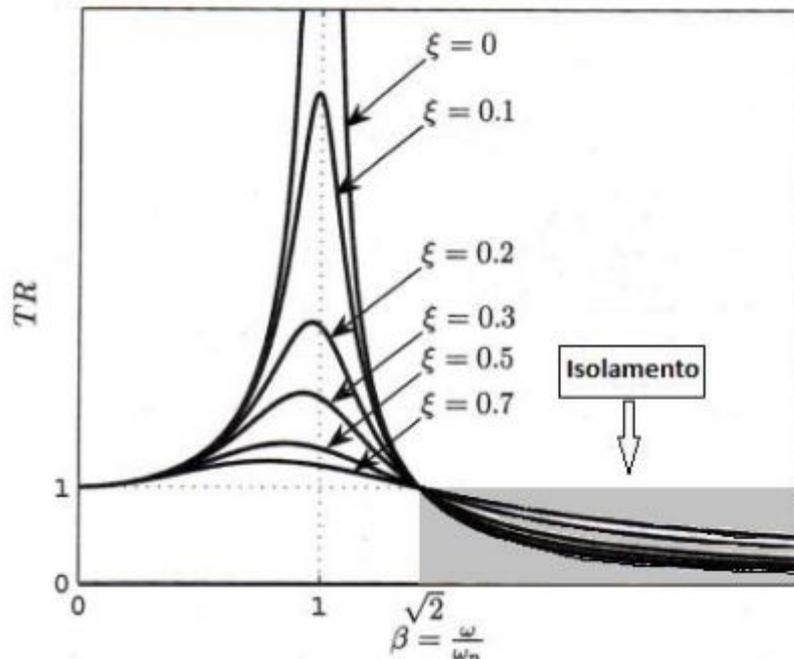
Logo,

$$\frac{x}{y} = \frac{j2\xi\frac{\omega}{\omega_n} + 1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + j2\xi\frac{\omega}{\omega_n}} \quad (3)$$

Assim, a transmissão de deslocamento da base é a razão entre a amplitude x do movimento da massa, e y , a amplitude do movimento da base, nomeada transmissibilidade (TR) de deslocamento (RIBEIRO, 2013). O gráfico da Figura 15 mostra como a transmissibilidade varia em função da razão entre a frequência da excitação e a frequência natural

$$\frac{\omega}{\omega_n} \quad (4)$$

Figura 15 – Gráfico de transmissibilidade vs razão da frequência



Fonte: Ribeiro (2013)

O gráfico acima diz que a razão entre a frequência e transmissibilidade deve ser maior que a $\sqrt{2}$, para que ocorra o isolamento das vibrações. É válido ressaltar que apenas

a primeira frequência do sistema (ciclista bicicleta) natural aqui é considerada e considera apenas uma frequência proveniente do solo. Porém, de forma empírica a interpretação é realizada de outra forma, pois o solo oferece inúmeras excitações de amplitude (RIBEIRO, 2013).

2.7 Módulos elásticos para materiais

A elasticidade de um material pode ser definida através de constantes elásticas, como os módulos de Young, módulo de torção e ou de cisalhamento, que associam torques ou forças com as deformações correspondentes. Os módulos em questão, definidos separadamente das dimensões de uma amostra em particular, possuem grande relevância prática na visão científica e técnica. Na visão científica pois podem obter dados importantes sobre as forças internas que mantêm unidas as partículas de um corpo. Na visão técnica pois, os engenheiros necessitam conhecer as propriedades elásticas dos materiais que vão utilizar no desenvolvimento de seus projetos (HESSEL et al., 2016).

Segundo (COSSOLINO; PEREIRA, 2010), o módulo de elasticidade, ou módulo de Young, Y , é uma grandeza que é proporcional à rigidez de um material quando este é submetido a uma tensão externa compressão. Basicamente, é a razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida pelo corpo, comportamento é linear, como mostra a Equação 5 abaixo:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

Onde,

- E = Módulo de elasticidade ou módulo de Young (Pa);
- σ = Tensão aplicada (Pa);
- ε = Deformação elástica longitudinal do material.

O módulo de cisalhamento G , é definido por (COSSOLINO; PEREIRA, 2010) na Equação 6 como:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (6)$$

Onde,

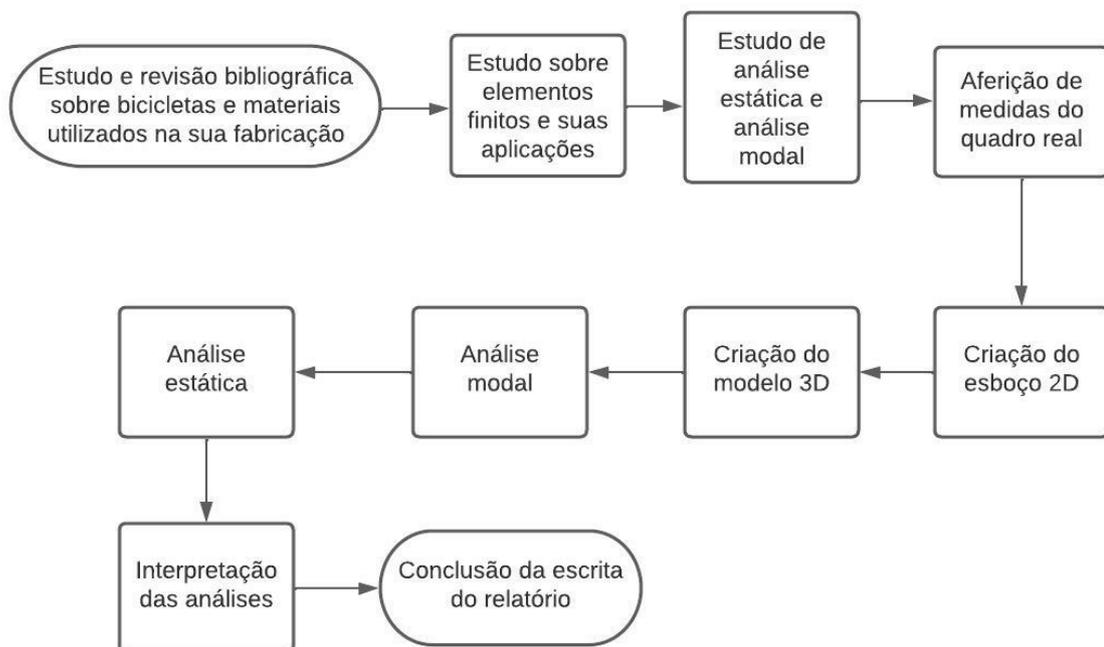
- G = Módulo de cisalhamento (Pa);
- τ = Tensão cisalhante (Pa);
- γ = Deformação elástica de cisalhamento.

3 METODOLOGIA

3.1 Fluxograma

Como forma de manter a ordem cronológica das atividades que foram realizadas, foi criado um fluxograma, listando as etapas do projeto, para que assim, chegasse ao final cumprindo todos os tópicos com êxito.

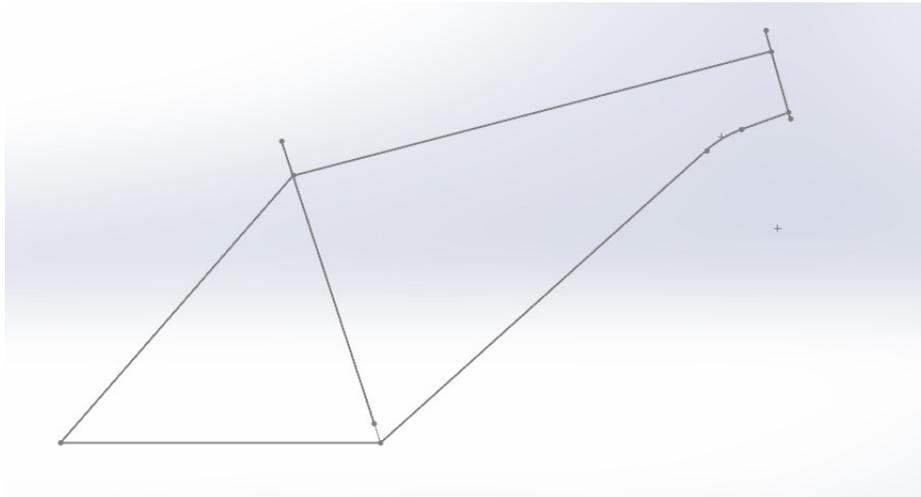
Figura 16 – Fluxograma



Fonte: Autoria própria, 2022

3.2 Dimensionamento

Para que fosse possível a realização da modelagem 3D, houve a necessidade de esboçar em linhas a geometria de disposição dos tubos do quadro. Tais medidas de comprimento e ângulo foram obtidas a partir de medições reais de um quadro. Em seguida foi criado um *croqui* em papel para auxiliar na consulta de dados para transferir para o modelo virtual. O esboço realizado em *software* pode ser visto na Figura 17.

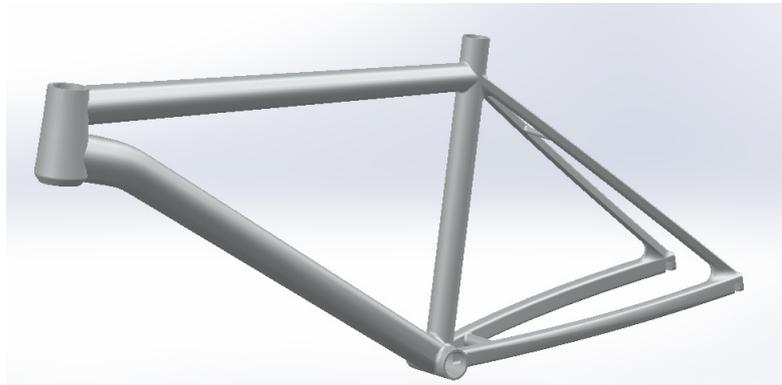
Figura 17 – Esboço do quadro

Fonte: Autoria própria, 2022

Após a finalização do esboço, o próximo passo do projeto foi iniciar a modelagem 3D. Para isso, utilizou-se variados perfis de tubos para aproximar e acompanhar do quadro real em que se inspirava para o projeto. É visto que apenas os tubos do triângulo traseiro do quadro se repetem, para garantir a simetria da geometria. Entretanto, por exemplo o tubo superior possui até mesmo uma variação de dimensionamento do perfil em todo o seu comprimento, o que pode ser visto em outros componentes da estrutura.

Na Figura 18, é mostrado a modelagem 3D do quadro.

Figura 18 – Modelagem 3D quadro *Mountain Bike*



Fonte: Autoria própria, 2022

3.3 Material usado no quadro

Como visto anteriormente, para a fabricação de quadros de bicicletas, há uma grande variabilidade de materiais. Então, após pesquisas no site da fabricante do quadro real sobre as especificações do material, concluiu-se que o utilizado na estrutura é o alumínio 6061 T6. O tratamento térmico T6 consiste em solubilizar e envelhecer artificialmente o material, aplicando a produtos que não são trabalhados a frio após a solubilização, ou nos quais o efeito do trabalho a frio no endireitamento ou a planificação pode não ser reconhecido nos limites de propriedades mecânicas (INFOMET, 2022). A partir disso, foi possível selecionar o material na biblioteca do *software* SolidWorks antes de realizar as análises, e organizar as informações do material na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do alumínio 6061-T6

Propriedades mecânicas do material 6061 T6	Valor
Limite de resistência	310 Mpa
Limite de escoamento	275 Mpa
Densidade	2,7 g/cm ³
Módulo de elasticidade	69000 Mpa

Fonte: Autoria própria, 2022

3.4 Análises usando o Método de Elementos Finitos

3.4.1 Definição da malha

Para que a análise tenha resultados próximos da realidade, há a necessidade de ajustar o tamanho dos elementos de malha a ser plotado no quadro. O *software*

SolidWorks possibilita essa configuração, permitindo escolher o tamanho máximo e mínimo dos elementos de malha, a qualidade da malha e a densidade da mesma. Sendo que, o tamanho médio dos elementos define o tamanho do elemento em relação ao tamanho do modelo, e o tamanho mínimo tem relação com o nível de refinamento em áreas pequenas do modelo 3D. A densidade da malha trabalha analogamente como um fator de nivelamento, que é encarregado de garantir a uniformidade na transição da malha fina e grossa, definindo o comprimento máximo da aresta. A transição automática cria elementos de tamanho específicos em curvas, arredondamentos, furos e outros pequenos recursos de construção (SYSTEMES, 2018a).

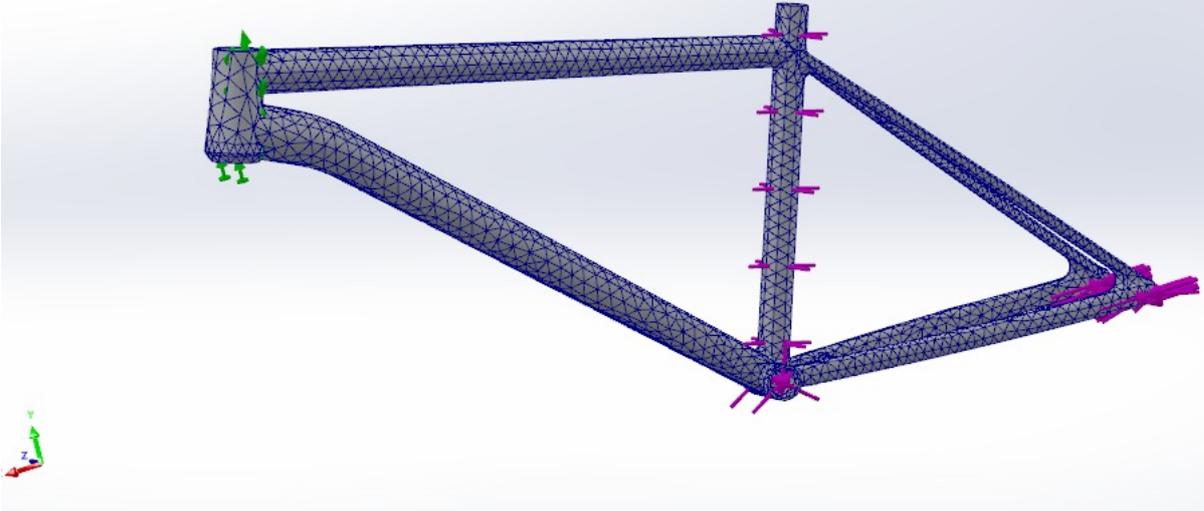
Os dados referentes a construção da malha foram selecionados com o intuito de priorizar o funcionamento computacional, considerando que para análises com malhas mais refinadas acarretariam em uma maior demanda da memória do computador. Por este motivo, a definição por convergência de malhas não foi possível, tendo então o conhecimento que os resultados que foram obtidos são aproximados.

Para componentes sólidos na pasta de peças, o programa criou automaticamente uma malha sólida com elementos sólidos 3D tetraédricos. Os elementos tetraédricos são apropriados para objetos que possuem volumes, como no caso da estrutura do quadro de bicicleta. Em uma malha sólida, obtêm-se a melhor precisão numérica com uma malha que tem elementos tetraédricos perfeitos e uniformes cujas arestas têm um comprimento igual. Em uma geometria geral, não é possível criar uma malha com elementos tetraédricos perfeitos. Isto, por causa de pequenas arestas, geometria curva, recursos finos e cantos agudos, alguns dos elementos gerados podem ter arestas muito mais longas que outros. Quando as arestas de um elemento diferem substancialmente no comprimento, os resultados são menos precisos. (SYSTEMES, 2018b).

Na Figura 19 é mostrado a plotagem da malha na estrutura do quadro de bicicleta modelado

Figura 19 – Malha plotada no quadro

Tipo de malha: Malha sólida



Fonte: Autoria própria, 2022

3.5 Etapas para definir a análise estática

Para iniciar a análise estática computacional, foram adotadas as seguintes etapas:

- Atribuir ao quadro de bicicleta o material utilizado;
- Especificar quais são os pontos de fixação, por meio dos apoios fixos;
- Selecionar quais são os pontos onde são aplicados os carregamentos;
- Criar a malha de plotagem na estrutura;
- Executar estudo de análises de tensões;
- Observar os resultados encontrados e realizar interpretações com base nas características do material selecionado.

3.6 Análise estática

Segundo a Teoria das Tensões de Von Mises, as tensões equivalentes atuantes na peça não podem ultrapassar um valor de tensão de tração que promova a máxima energia de distorção no corpo de prova. Já a máxima energia de distorção que é aplicada na estrutura, necessariamente deve ser menor do que o valor da tensão de escoamento do

material. Sendo assim, a interpretação da escala de gráfico se torna possível. Então, para conhecer os limites da estrutura do quadro de bicicleta, foram consideradas três condições, que são elas:

- C1 - Condição que a bicicleta sofre um impacto na parte frontal, podendo ser proveniente da roda dianteira. Tendo como elemento fixo o que seria a roda traseira em seu eixo;
- C2 - Condição em que a bicicleta sofre um impacto na roda traseira, dissipando até o eixo posterior do quadro. Assim, o elemento fixo é o tubo da caixa de direção, simulando a fixação da roda dianteira.
- C3 - Situação que simula o ciclista pedalando sentado sobre a bicicleta em uma reta, exercendo força no tubo do selim e no tubo do pedivela. Tendo como elementos fixos a roda dianteira e traseira (BARATTO, 2022).

Segundo a (SENSE, 2020), o valor máximo que uma bicicleta de alumínio suporta é 120 kg, considerando a massa de todos os componentes e do ciclista. Sendo assim, para a condição C3 foi utilizada uma carga de 1177 N. Porém, para as condições C1 e C2, foram utilizadas forças adicionais que representam o valor da força que a roda dianteira e traseira sofrem em impactos. Sendo 456 N e 632 N respectivamente para cada situação isolada (GRÄBIN, 2022).

$$F = m \cdot a \text{ (N)} \quad (7)$$

- F - Carga (N);
- m - Massa do ciclista e dos outros componentes (Kg) ;
- a - Aceleração da gravidade (m/s²).

Para manter as informações das cargas de forma ordenada, foi criada uma tabela, que é mostrada a seguir:

Tabela 3.2 – Parâmetros de forças das análises

Parâmetros	Valor
Força de impacto dianteiro	456 N
Força de impacto traseiro	632 N
Peso máximo suportado	1077 N

Além de buscar qual a tensão máxima que o quadro suporta, a análise estática também propõem resultados aproximados do deslocamento. Sendo possível então tirar conclusões das áreas que necessitam de reforços na estrutura a partir das reações que elas apresentam.

3.7 Análise modal

Aplicando o uso da ferramenta disponível no *software* SolidWorks para análises de frequência, foi utilizado a análise modal no quadro da bicicleta.

Durante a simulação, foi observado o total de cinco resultados para diferentes frequências atingidas. Isso ocorre através de uma relação de resposta máxima da frequência de vibração sendo igual a ressonância do sistema. Assim, os picos surgem nas frequências de ressonância da estrutura de acordo com o tempo que se aplicou a análise (RIBEIRO, 2013).

As frequências naturais observadas na análise foram dentro de uma variação de 133,05 Hz a 320,52 Hz. A interpretação do dados vem a partir da amplitude que é apresentada nos gráficos da análise, onde quanto maior a amplitude encontrada, mais prejudicial se torna para a estrutura.

Figura 20 – Frequência e número de modos aplicados no quadro

Nº do modo	Frequência(Rad/s)	Frequência(Hertz)	Período(Segundos)
1	835,99	133,05	0,0075158
2	1.147	182,54	0,0054782
3	1.593	253,53	0,0039442
4	1.840,6	292,94	0,0034136
5	2.013,9	320,52	0,0031199

Fonte: Autoria própria, 2022

4 RESULTADOS

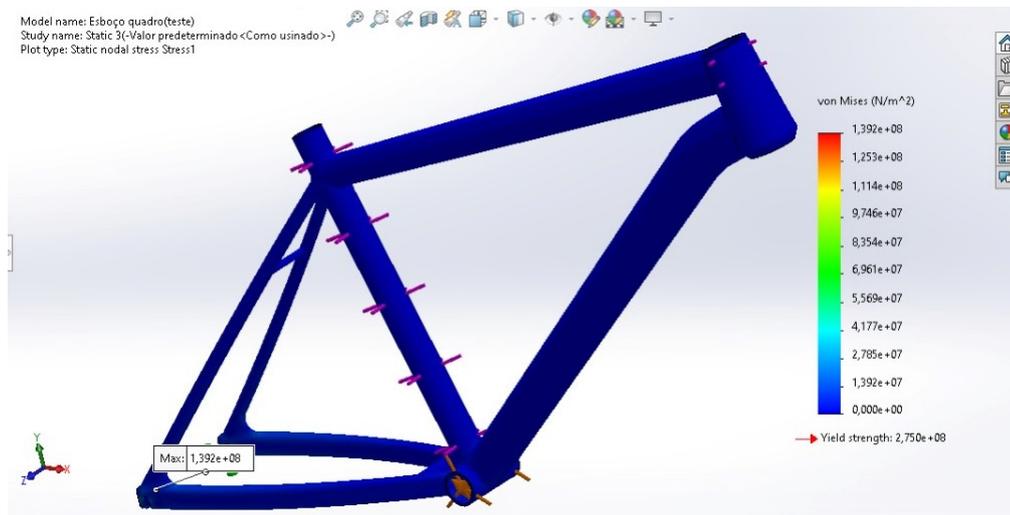
4.1 Análise estática

Utilizando o SolidWorks, foi possível encontrar dois resultados referentes a estrutura do quadro da bicicleta a partir da análise estática. Sendo estes resultados a tensão máxima que este suporta e o seu deslocamento.

Para cada condição proposta anteriormente, houve um resultado distinto. Onde foi vista a importância em que se tem de respeitar o limite máximo da carga que a estrutura suporta.

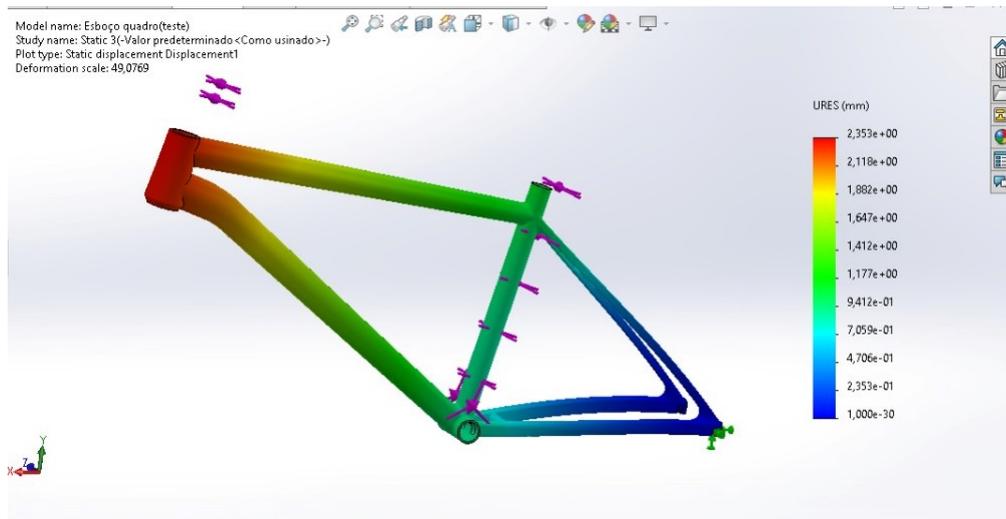
Sendo assim, para C1, que é a condição em que a bicicleta possui uma carga no selim e tubo do movimento central de 1077 N, com a parte traseira fixada, e um impacto frontal adicional de 456N, o quadro da bicicleta teve como resultados a tensão máxima de 139,2 MPa e um deslocamento de 2,35 mm. Desta forma, a tensão máxima que a estrutura sofreu, ainda assim está dentro do limite de escoamento do material, que é de 275 MPa, comprovando que para esta condição o quadro ainda é uma estrutura confiável. Os resultados são mostrados na Figura 21 e Figura 22 a seguir.

Figura 21 – Tensão máxima - C1



Fonte: Autoria própria

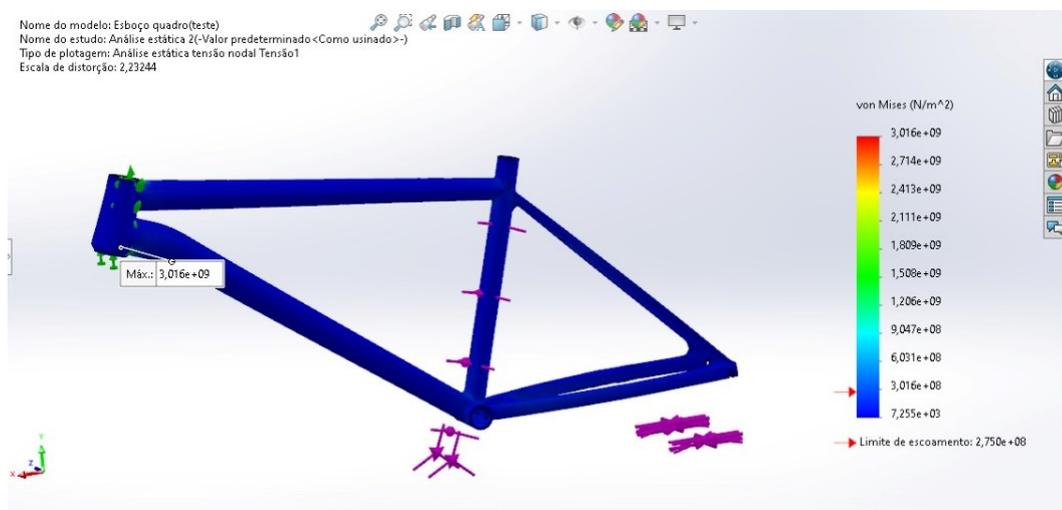
Figura 22 – Deslocamento máximo - C1



Fonte: Autoria própria

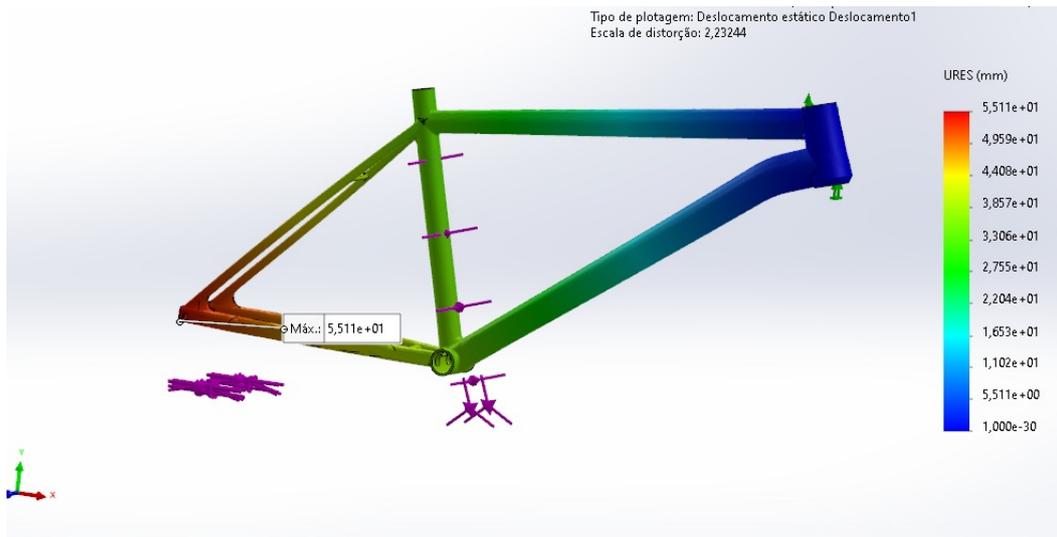
Para a segunda condição, C2, que é a condição em que a bicicleta sofre um impacto na roda traseira de 632 N, mais o carregamento de 1077 N no tubo do selim e do movimento central, e tem o tubo da caixa de direção fixa, resulta em uma tensão máxima de 3016 MPa, tensão que ultrapassa a tensão de escoamento do material, e um deslocamento máximo de 5,51 mm. Porém, como forma de amenizar tal tensão, é visto a necessidade ter sido considerado o amortecimento dos pneus e a flexão que os raios da roda traseira sofre, e alterar o perfil dos tubos que compõe o triângulo traseiro do quadro, alcançando um diâmetro maior. Além disso, a adição do cordão de solda no na união dos tubo contribuiria como um reforço para a estrutura. Nas Figuras 23, 24 e 25 abaixo, é possível visualizar tais resultados.

Figura 23 – Tensão máxima - C2



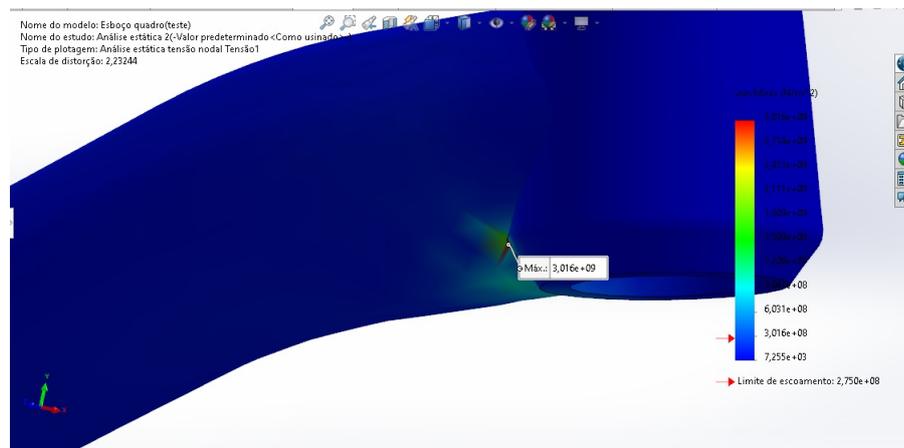
Fonte: Autoria própria

Figura 24 – Deslocamento máximo - C2



Fonte: Autoria própria

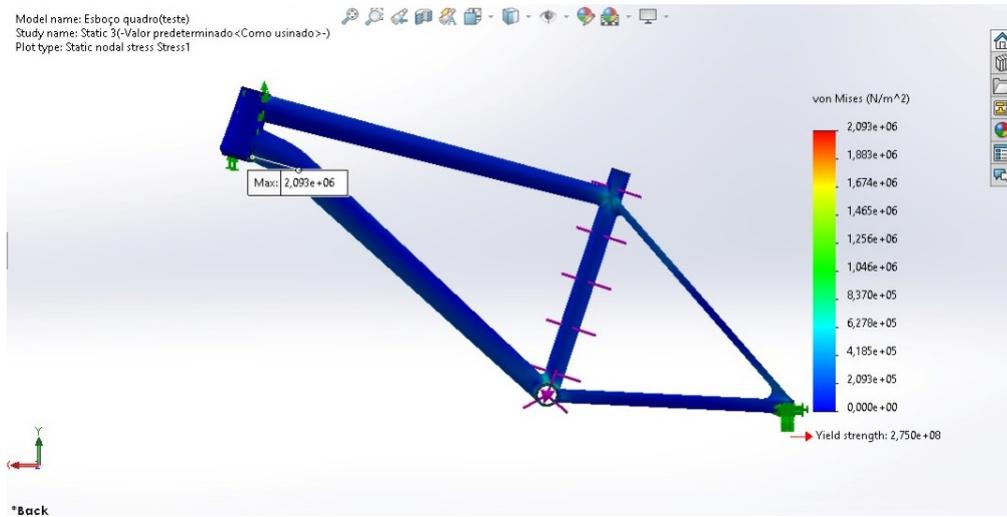
Figura 25 – Ponto de concentração de tensão - C2



Fonte: Autoria própria

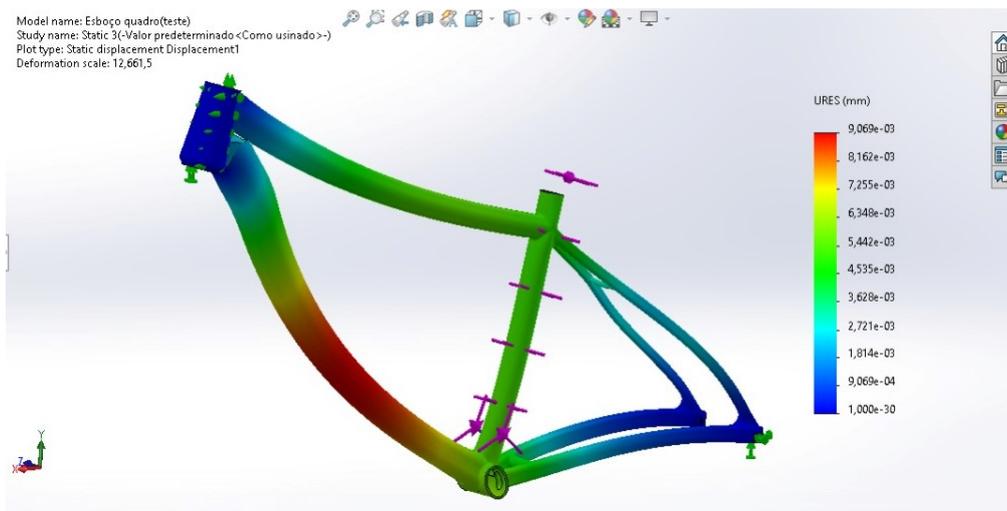
Para a terceira condição, C3, que é a condição em que simula o ciclista pedalando sentado, e exercendo forças tanto no tubo to selim quanto no tubo do movimento central. Nesta condição, os pontos fixos são o que seria as rodas da bicicleta, próximo ao eixo traseiro do quadro e um onde está a tubo da caixa de direção. Nesta condição, não se considera cargas adicionais, apenas o peso máximo que é recomendado, sendo de 1077 N, distribuídos em dois tubos, o do selim, e o do movimento central que é onde as forças dos pedais estão apoiadas. Assim, a tensão máxima que a análise apresentou foi de 2,093 MPa e um deslocamento máximo desprezível em escala de milímetros. Nas Figuras 26 e 27 a seguir, pode ser visto os resultados da análise.

Figura 26 – Tensão máxima - C3



Fonte: Autoria própria

Figura 27 – Deslocamento máximo - C3



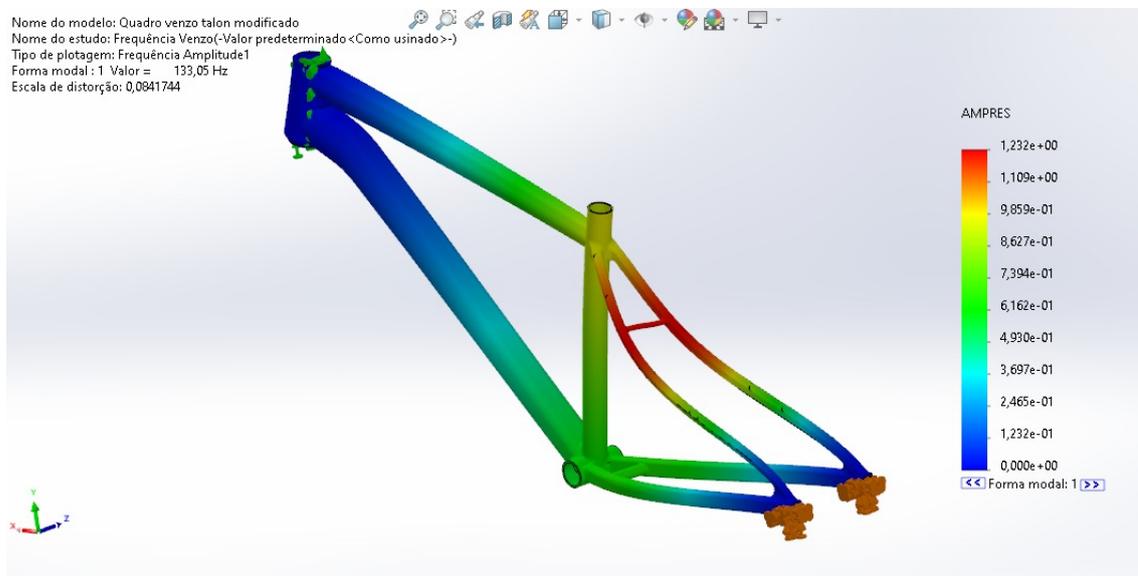
Fonte: Autoria própria

4.2 Análise Modal

Utilizando o ambiente de simulações no SolidWorks, o estudo de frequências operou em um intervalo de 133,05 Hz a 320,52 Hz, aplicando o total de cinco modos de vibração para colher e analisar as deformações ocorridas na estrutura. Então, ao selecionar os modos de vibração, separadamente, foi possível observar que quanto maior é a amplitude aplicada, maior é a deformação da estrutura do quadro de bicicleta.

No primeiro modo, a frequência aplicada foi de 133,05 Hz. Neste modo, a deformação maior ocorre próximo ao reforço do triângulo traseiro do quadro, região vermelha na Figura 28.

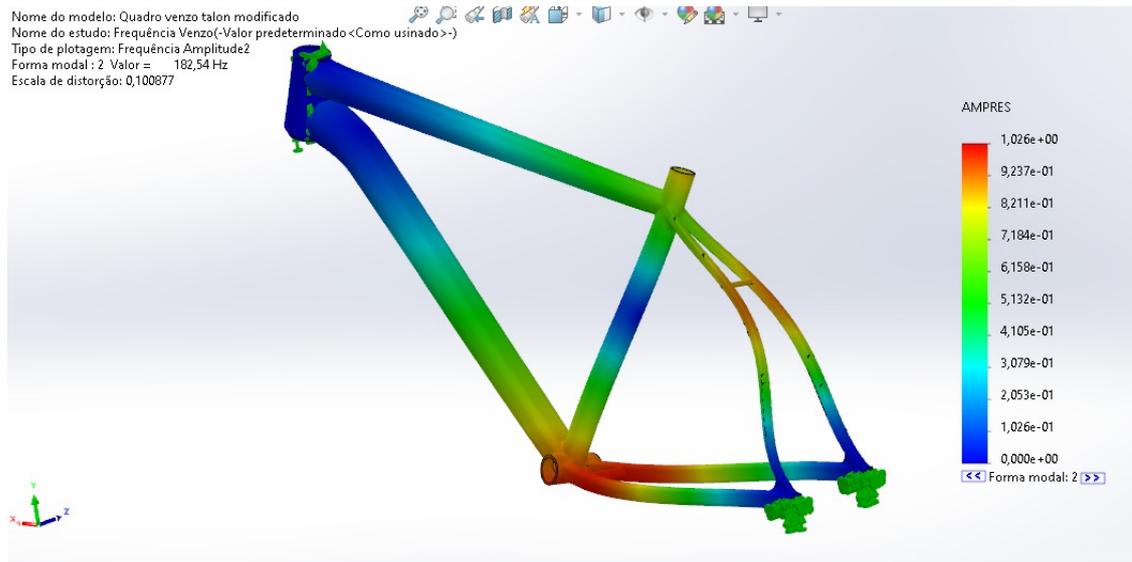
Figura 28 – Análise modal - 133,05 Hz



Fonte: Autoria própria

No segundo modo, mostrado na Figura 29 abaixo, a deformação se estendeu além do primeiro modo, atingindo o tubo superior e tubo inferior, se concentrando em uma região próxima ao tubo do movimento central do quadro com uma vibração de 182,54 Hz.

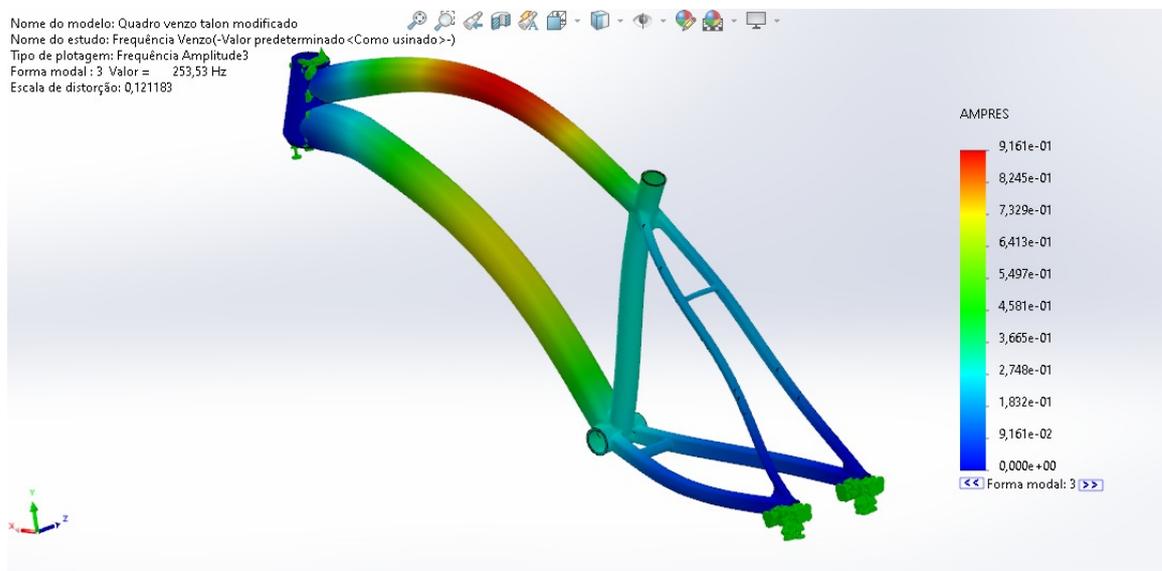
Figura 29 – Análise modal - 182,54 Hz



Fonte: Autoria própria

No terceiro modo, a deformação ocorreu de forma mais acentuada nos tubos do triângulo dianteiro do quadro, concentrando no tubo superior com uma vibração de 253,53 Hz, como pode ser vista a região vermelha na Figura 30.

Figura 30 – Análise modal - 253,53 Hz

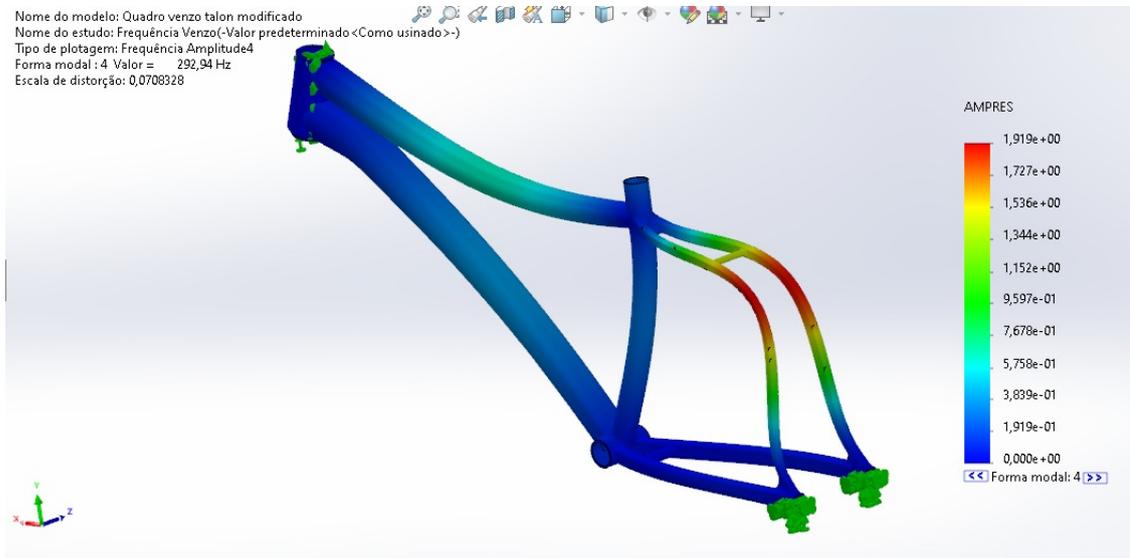


Fonte: Autoria própria

No quarto modo de vibração, a frequência encontrada foi de 292,94 Hz, o que gerou deformações em todos os tubos da estrutura, mas novamente concentrando nos tubos

superiores do triângulo traseiro, próximo a haste de reforço, como mostrado na Figura 31 a seguir.

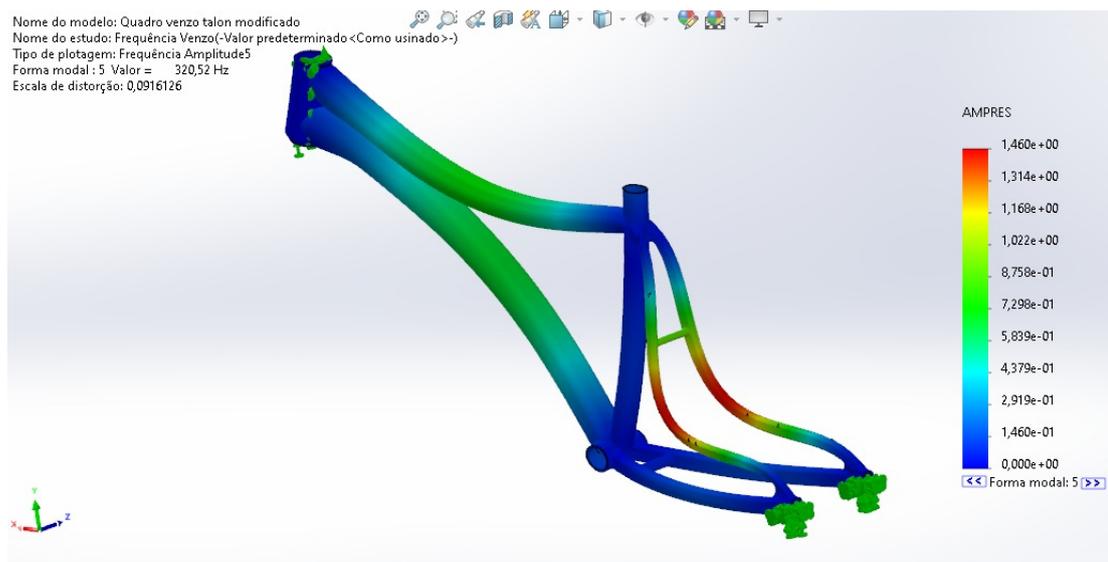
Figura 31 – Análise modal - 292,94 Hz



Fonte: Autoria própria

No quinto e último modo, a vibração de 320,52 Hz fez com que toda a estrutura do quadro se deformasse, porém com um valor concentrado próximo a região dos tubos superiores do triângulo que pode ser observado na Figura 32 abaixo.

Figura 32 – Análise modal - 320,52 Hz



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido teve como finalidade realizar o estudo sobre a aplicação do método de elementos finitos em um quadro de bicicletas. Tendo estudado quais são as principais modalidades de ciclismo e suas distintas opções de bicicletas, realizar a modelagem 3D de um quadro de bicicleta inspirando em modelo de quadro real. Em seguida, estudar e aplicar as tensões de Von-Mises e análises de frequência na estrutura. Para contribuir com o êxito deste trabalho, foram utilizados dados de referências bibliográficas.

De acordo com os resultados obtidos na análise estática, é visto que o quadro projetado não pode vir a ser usado em competições de *mountain bike*, por ser uma modalidade que leva o equipamento ao extremo, e este possuir tensões relativamente altas na sua estrutura a partir dos carregamentos e condições. Entretanto, há também a possibilidade de erros durante a retirada de medidas do quadro real para análise, por não ser usado equipamentos de medição adequados, o que contribui para afetar diretamente os resultados que foram encontrados. Além disso, também há possíveis falhas que podem estar relacionadas com a convergência de malhas, o que implica em uma análise não eficiente por motivos computacionais. Com base no resultado da análise modal, é possível observar que o quadro necessita de melhorias, em especial no triângulo traseiro, onde há uma grande deformação. Assim, alterar o perfil dos tubos e suas dimensões podem colaborar positivamente para aumentar a rigidez da estrutura.

Então, visto que as simulações envolvendo a análise estática não foram satisfatórias para o meio competitivo do *mountain bike*, entende-se que há um espaço de melhoria na geometria da modelagem. Porém, um resultado não satisfatório não significa que este projeto falhou, apenas houve a comprovação de que a estrutura analisada não é adequada para o uso em extremos, não sendo descartado para uso em passeios, e atividades urbanas de cotidiano. Assim, o projeto atendeu todo o seu objetivo, de realizar um estudo de elementos finitos em uma estrutura de bicicleta, e serviu também para ampliar os conhecimentos do autor no assunto de bicicletas.

REFERÊNCIAS

BARATTO, A. D. M. Abordagem teórica e prática no desenvolvimento de uma bicicleta do tipo mountain bike full suspension. Universidade Federal de Santa Maria, 2022.

BARQUILHA, G. Mountain bike xco: Ciência x estratégias de prova. 2018.

BRASIL, R. **Para leigos: entenda o Método dos Elementos Finitos**. 2020. <https://kotengenharia.com.br/para-leigos-entenda-o-metodo-dos-elementos-finitos/>. Acesso em 23 de Maio de 2022.

BRASÍLIA, M. **Conheça as ligas utilizadas na construção dos quadros de alumínio**. 2013. <https://www.mtbbrasil.com.br/2013/10/11/conheca-as-ligas-utilizadas-na-construcao-dos-quadros-de-aluminio/>. Acesso em 24 de Maio de 2021.

CANNONDALE. **Cannondale Scalpel Hi-Mod 1**. 2021. <https://www.cannondale.com/pt-br/bikes/mountain/cross-country/scalpel/scalpel-hi-mod-1-smu?sku=c24141m10sm>. Acesso em 23 de Maio de 2021.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. **Informativo Técnico Científico. Disponível em: <http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/sonelastic/artigos/RT03-ATCP.pdf>**, 2010.

ESPORTE, R. do. **Ciclismo BMX**. 2022. <http://rededoesporte.gov.br/pt-br/megaeventos/olimpiadas/modalidades/ciclismo-bmx>. Acesso em 9 de Maio de 2022.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos—A base da tecnologia CAE**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018.

FRANCO, L. P. C.; CAMPOS, V. B. G. Uso da bicicleta como meio de transporte urbano. **Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil**, 2014.

GRÄBIN, E. F. G. Estudo do comportamento dinâmico de um modelo de bicicleta. 2022.

HESSEL, R.; FRESCHI, A. A.; ROSADO, E. C.; BARREIRO, L. A. Determining the young's modulus on solids from the measurement of the speed of sound by the time-of-flight method. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 38, 2016.

INFOMET. **Metais Ligas, Alumínio, Informações Técnicas: Tratamentos térmicos de ligas de alumínio**. 2022. Disponível em: <<https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=57>>.

LEME, L. M. M. **Estudo comparativo de técnicas de análise modal experimental no domínio da frequência em uma barra na condição de contorno livre-livre**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

LESSA, P. R.; MORAES, M. et al. O ciclismo de estrada e a construção de uma cultura nacionalista: um olhar sobre o tour de france. **Movimento**, Escola de Educação Física, v. 23, n. 1, p. 407–418, 2017.

MACKENZIE, E. **Modelagem 3D, como ela pode te beneficiar**. 2019. <https://www.ejemackenzie.com.br/modelagem-3d-como-ela-pode-te-beneficiar/>. Acesso em 24 de Maio de 2022.

MERLI, F. F. de M.; ALVES, F. R.; LOURENÇO, J. C. Comparação entre carro e bicicleta num percurso urbano. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, v. 2, n. 1, 2006.

MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** 2016. <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em 23 de Maio de 2022.

PEDALA, P. quem. **Atual campeão, Avancini reencontra etapa histórica da Copa do Mundo de MTB**. 2021. Acesso em 15 de maio de 2021. Disponível em: <<http://www.praquempedala.com.br/blog/atual-campeao-avancini-reencontra-etapa-historica-da-copa-do-mundo-de-mtb/>>.

PEREIRA, A. Y. et al. Comparação de ensaios mecânicos e simulações numéricas em quadros de bicicleta de alumínio. Universidade do Estado do Amazonas, 2020.

RIBEIRO, P. M. T. Análise dinâmica de um quadro de bicicleta. 2013.

ROCHA, G. O. Investigação dos níveis de vibração em usuários de diferentes modelos de bicicletas. 2019.

SCHWARZ, B. J.; RICHARDSON, M. H. Experimental modal analysis. **CSI Reliability week**, Orlando FL, v. 35, n. 1, p. 1–12, 1999.

SENSE. **Qual o peso máximo suportado pela bicicleta?** 2020. <https://sensebike.com.br/perguntas/qual-o-peso-maximo-suportado-pela-bicicleta/>: :text=Bicicletas. Acesso em 29 de outubro de 2022.

SENSE. **Sense Impact Carbon EVO**. 2022. <https://sensebike.com.br/bike/impact-carbon-evo/>. Acesso em 10 de Maio de 2022.

SILVA, L. G. d. Projeto de um guia de corrente para mountain bike utilizando manufatura aditiva. Universidade Federal do Pampa, 2021.

SPECIALIZED. **Bicicleta Tarmac SL7 Pro - Ultegra Di2**. 2022. <https://www.specialized.com/br/pt/bicicleta-tarmac-sl7-pro—ultegra-di2/p/187108?color=303533-187108>. Acesso em 9 de Maio de 2022.

SYSTEMES, D. **PropertyManager de Ma-Iha**. 2018. https://help.solidworks.com/2018/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/IDC_HELP_MESH_SOLID.htm?id=7737b88b72294d919c8acfb12c645a02Pg0. Acesso em 19 de outubro de 2022.

SYSTEMES, D. **Solidworks**. 2018. Acesso em 18 de Novembro de 2022. Disponível em: <https://help.solidworks.com/2018/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Element_Types.htm#:~:text=>>.

SYSTEMES, D. **Solidworks**. 2022. <https://www.solidworks.com/pt-br/product/all-products>. Acesso em 23 de Maio de 2022.

TAVARES, J.; FONSECA, J. O. Introdução ao solidworks (x): Análise de tensões de peças–simulationxpress. **DEMec–Departamento de Engenharia Mecânica**, 2014.

WEISS, H. Cicloativismo (s) na pandemia dos aplicativos: O breque dos apps enquanto expansão do direito à cidade. **ESCOLA EM TRANSE**, p. 62, 2021.