



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUAN OMENA BERNARDI

**SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA QUADROS DE BICICLETA: UM ESTUDO
COMPARATIVO ENTRE LIGAS DE TITÂNIO E LIGAS DE ALUMÍNIO**

Recife/PE

2024

LUAN OMENA BERNARDI

**SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA QUADROS DE BICICLETA: UM ESTUDO
COMPARATIVO ENTRE LIGAS DE TITÂNIO E LIGAS DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Edval Gonçalves de Araújo.

Recife/PE

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Bernardi, Luan Omena.

Seleção de materiais para quadros de bicicleta: um estudo comparativo entre ligas de titânio e ligas de alumínio / Luan Omena Bernardi. - Recife, 2024.

73

Orientador(a): Edavl Gonçalves De Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Materiais - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. seleção de materiais. 2. quadro de bicicleta. 3. índice de mérito. 4. matriz de seleção. I. De Araújo, Edavl Gonçalves. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

LUAN OMENA BERNARDI

**SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA QUADROS DE BICICLETA: UM ESTUDO
COMPARATIVO ENTRE LIGAS DE TITÂNIO E LIGAS DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 26/03/2024.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 EDVAL GONCALVES DE ARAUJO
Data: 01/04/2024 10:56:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Edval Gonçalves de Araújo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 MAGDA ROSANGELA SANTOS VIEIRA
Data: 01/04/2024 11:39:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Magda Rosângela Santos Vieira (Examinadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 FLAVIO JOSE DA SILVA
Data: 01/04/2024 13:28:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Flavio José Silva (Examinador)
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Selecionar materiais é tarefa essencial para as atividades de engenharia. O uso de ferramentas, equipamentos de proteção ou meios de se locomover são melhorados a partir do material mais adequado de acordo com cada aplicação. O presente trabalho aborda a seleção de materiais, comparando as ligas metálicas AA 6061-T6, AA 7005-T6, Ti-3Al-2.5V e Ti-6Al-4V para escolher o material a ser utilizado em um quadro de bicicleta, de modo que tal componente resista aos esforços ao qual é submetido sem falhar mecanicamente. Para isso são vistos dois autores importantes, Ashby e Farag, que contribuíram com os critérios de seleção por índice de mérito ou índice de material de engenharia e pela matriz de seleção. O trabalho traz ainda algumas das principais normas ligadas aos testes de segurança do quadro de bicicleta, bem como algumas opções de ensaios não destrutivos. São abordadas algumas propriedades dos materiais, tais como: módulo de elasticidade, tensão limite de escoamento, tenacidade à fratura, densidade e preço. E, a fim de testar as ligas metálicas candidatas para a seleção de materiais, o trabalho utiliza a simulação computacional para achar as tensões de Von Mises que os materiais serão submetidos e os fatores de segurança necessários para a sua utilização no projeto mecânico. É também mencionada a importância e o incentivo do ensino da disciplina de seleção de materiais na grade curricular de engenharia de materiais.

Palavras-chave: índice de mérito; quadro de bicicleta; matriz de seleção; seleção de materiais.

ABSTRACT

Selecting materials is an essential exercise of engineering activities. The use of tools, protection equipment or means of transportation are improved when the adequate material is employed according to each possible application. This work will approach a study about material selection, comparing the following metal alloys: AA 6061-T6, AA 7005-T6, Ti-3Al-2.5V and Ti-6Al-4V. In order to select the material to use in a bicycle frame, having its components be resistant when using the bicycle without mechanical failure. For this purpose, the work of two important authors, Ashby and Farah have been analyzed due to its contribution to the selection criterias for material performance index or material engineering index and the selection matrix. This work also presents some standard parameters for security tests of bicycle frames and some options of non destructive testing. It has also been analyzed some materials properties, such as: young`s modulus, yield strength, fracture toughness, density and price. Furthermore, in order to test the metal alloys candidates to material selection, this work utilized computational simulation for found Von Mises stress to which the materials are submitted and the security factors needed for its use in a mechanical project. It has also been mentioned the importance of teaching about material selection material engineering courses.

Keywords: Performance Indices; Bicycle Frames; Selection Matrix; Materials Selection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do quadro de bicicleta.	15
Figura 2 – Quadro de bicicleta.	16
Figura 3 – Quadro KSW XLT 100.....	16
Figura 4 – Drifter Aventura Frame.....	17
Figura 5 – Ensaio de líquido penetrante em um quadro metálico.	18
Figura 6 – Medidor Olympus 45MG.	19
Figura 7 – Ensaio de impacto de acordo com a Norma ABNT 14714.	21
Figura 8 – Ensaio de Impacto do quadro de bicicleta.....	22
Figura 9 – Esquema do ensaio de queda do quadro.....	23
Figura 10 – Ensaio de queda do quadro.	24
Figura 11 – Ensaio de Fadiga do quadro.	24
Figura 12 – Ensaio de fadiga do quadro de bicicleta.....	25
Figura 13 – Forças atuando no quadro de bicicleta.	26
Figura 14 – Canote de selim KSW.	28
Figura 15 – Canote de selim de titânio.....	29
Figura 16 – Curva tensão x deformação.	30
Figura 17 – Valores típicos de módulos de elasticidade.	31
Figura 18 – Tensão Limite de Escoamento x Densidade.	32
Figura 19 – Curva S-N.	33
Figura 20 – Resistência à fadiga em 10^7 ciclos (MPa) vs. Densidade (kg/m^3).....	34
Figura 21 – (Tenacidade à fratura/densidade) x (módulo de elasticidade/densidade).	35
Figura 22 – Tubo que compõe o quadro de bicicleta.	36
Figura 23 – Tensão de Escoamento x Densidade.....	40
Figura 24 – Tabela com os dados mundiais de reservas de bauxita em 2016 e da produção de bauxita em 2016 e 2017.	47
Figura 25 – Tabela com os dados de reservas e produção mundial de ilmenita e rutilo em 2016.	47
Figura 26 – Preço do alumínio em dólares por tonelada no ano de 2023.	48
Figura 27 – Preço do titânio em dólares por quilograma no ano de 2023.	48
Figura 28 – Módulo de Elasticidade x Densidade.	58
Figura 29 – Tensão Limite de Escoamento x Densidade.	60

Figura 30 – Tenacidade à fratura x Densidade.	61
Figura 31 – Quadro de bicicleta 3D.....	63
Figura 32 – Malha do tipo fina.	64
Figura 33 – Distribuição da Tensão de Von Mises (MPa).	65
Figura 34 – Máximo e Mínimo Valor de Tensão.....	65
Figura 35 – Distribuição de tensões no quadro.	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Índices de mérito de barras e tubos em flexão.....	39
Quadro 2 – Classificação das ligas de alumínio.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas das Ligas Al 6061-T6 e Al 7005-T6.....	43
Tabela 2 – Composição química da liga Al 6061-T6.....	43
Tabela 3 – Composição química da liga Al 7005-T6.....	44
Tabela 4 – Propriedades mecânicas das ligas de titânio.	45
Tabela 5 – Composição química da liga Ti-3Al-2.5V.....	46
Tabela 6 – Composição química da liga Ti-6Al-4V.....	46
Tabela 7 – Matriz de decisão.	49
Tabela 8 – Matriz de propriedade.....	50
Tabela 9 – Fator de escala.....	51
Tabela 10 – Fator de importância.....	51
Tabela 11 – Peso das propriedades.....	52
Tabela 12 – Pesos do ciclista.....	57
Tabela 13 – Propriedades mecânicas das ligas metálicas.....	57
Tabela 14 – Matriz de decisões.....	62
Tabela 15 – Matriz fator de escala.	62
Tabela 16 – Matriz fator de importância.	62
Tabela 17 – Propriedades dos materiais utilizados na simulação.	63
Tabela 18 – Tabela de medidas geométricas utilizadas na simulação.....	63
Tabela 19 – Divisão do carregamento.....	64
Tabela 20 – Tensões máximas de Von Mises – Simulação 1.	66
Tabela 21 – Tensões máximas de Von Mises – Simulação 2.	66
Tabela 22 – Tensões máximas de Von Mises – Simulação 3.	67
Tabela 23 – Tensões máximas de Von Mises – Simulação 4.	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	QUADRO DE BICICLETA.....	15
2.2	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DO QUADRO DE BICICLETA	17
2.3	ENSAIOS DE SEGURANÇA DO QUADRO DE BICICLETA	20
2.3.1	Ensaio de Impacto do peso contra o quadro	20
2.3.2	Ensaio de queda do quadro	22
2.3.3	Ensaio de fadiga do quadro de bicicleta	24
2.4	SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	25
2.4.1	Função de Seleção	26
2.4.2	Restrições do Projeto Mecânico	27
2.4.3	Objetivos dos Materiais	35
2.5	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	41
2.6	LIGAS DE ALUMÍNIO	41
2.7	LIGAS DE TITÂNIO	44
2.8	CUSTOS DE MATERIAIS.....	46
2.9	MATRIZ DE SELEÇÃO.....	49
2.10	ELEMENTOS FINITOS.....	52
3	METODOLOGIA	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Bicicletas são meios de transporte atrativos para quem deseja se exercitar enquanto realiza um percurso. A prática do ciclismo traz benefícios para a saúde, como, perda de calorias, estímulo de uma melhor respiração e melhora da atividade cardiovascular (Hendriksen *et al.*, 2000).

Em comparação aos veículos automotivos, a bicicleta se torna um veículo menos agressivo ao meio ambiente por utilizar menos materiais e peças menores em sua fabricação, resultando em menor gasto energético. Por ser mais compacta, a bicicleta necessita de estacionamentos e vias menores que as dos veículos automotivos, ocupando menos espaço (Maizlish; Linesch; Woodcock, 2017).

Dentro do projeto mecânico, o quadro da bicicleta é um componente estrutural responsável pela sustentação e acoplamento dos tubos que compõem a bicicleta. Pode ser fabricado por ligas metálicas que garantem a durabilidade, rigidez e resistência de tal componente. As ligas metálicas são escolhidas também por serem materiais recicláveis, tendo a possibilidade de reprocessamento após o final de sua vida útil, tornando-se novos componentes mecânicos (Ashby, 2022).

A escolha do material mais adequado a um projeto mecânico considera a função do material, suas restrições e seus objetivos. O material escolhido deve cumprir as finalidades de redução de custos de processamento, otimização de componentes industriais, tais como equipamento e matéria prima, durabilidade e a redução de perdas no processo produtivo (Ashby; Shercliff; Cebon, 2013).

Para a confecção de quadros de bicicleta podem ser utilizadas ferramentas de seleção desenvolvidas por Ashby (2005) e Farag (2020), tais como: função ou componente do projeto mecânico, restrições, ou limitações das condições de uso do material, índices de mérito ou divisão numérica de propriedades do material e matriz de importância ou confronto de cada propriedade do material segundo o grau de importância estabelecido pelos projetistas.

Com a escolha do material adequado para o quadro de bicicleta, é possível obter maior durabilidade, maior resistência à fratura, maior segurança pela menor possibilidade de deformação do quadro e uma bicicleta mais leve, na qual o ciclista gasta menos energia para pedalar (Farag, 2020).

A seleção de materiais abrange uma triagem dos materiais específicos que serão utilizados, através das restrições do projeto, dentre os materiais disponíveis no

mercado para minimizar as opções de escolha e gerar uma lista de materiais selecionáveis. Os índices de mérito demonstram as melhores propriedades dentre as que podem ser utilizadas e a matriz de importância estabelece critérios numéricos para a escolha das propriedades mais relevantes que devem ser apresentadas pelo material que deve ser escolhido (Ashby, 2005).

O presente trabalho visa estabelecer uma metodologia de seleção de materiais para a escolha do material mais adequado para o quadro de uma bicicleta, bem como fornecer um material de apoio para o componente curricular Seleção de Materiais do curso de Engenharia de Materiais da UFPE. São utilizados critérios de seleção tais como: densidade, custo, módulo de elasticidade, e tensão de escoamento.

Os critérios de escolha dos materiais serão abordados no componente curricular seleção de materiais, sendo necessária a estruturação do conteúdo didático, bem como conhecimento dos softwares utilizados, histórico, aplicação industrial e o referencial teórico adequado para a compreensão do conteúdo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Comparar os materiais de ligas de alumínio e ligas de titânio para a utilização em quadros de bicicleta, visando estabelecer critérios de seleção do material mais adequado.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Criar uma matriz de seleção entre as propriedades dos materiais, ligas de alumínio e ligas de titânio, tendo por base a literatura de seleção de materiais;
- b) Estabelecer critérios numéricos de escolha entre ligas de alumínio e de titânio para produção de um quadro de bicicleta, bem como os índices de mérito específicos para essa aplicação.
- c) Realizar simulação computacional com os materiais comparados para testar a sua utilização em quadros de bicicleta

- d) Fornecer um conteúdo didático de apoio para o componente curricular seleção de materiais.

1.2 JUSTIFICATIVA

As ligas de titânio e de alumínio são materiais utilizados para a produção de quadros de bicicletas para passeios urbanos ou em trilhas fora da cidade. A compreensão de suas propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade, densidade, tensão limite de escoamento e tenacidade à fratura fornece critérios de escolha ao ciclista, tais como escolher um quadro de bicicleta com maiores rigidez, resistência à deformação e resistência à fratura (Ashby, 2005).

Os custos associados à prática do ciclismo podem ser menores, se escolhidos quadros de bicicleta feitos com materiais que apresentem propriedades mecânicas adequadas à tal atividade. A seleção de materiais atua fornecendo uma lista de materiais que atendem aos requisitos do projeto mecânico de quadros de bicicleta, reduzindo-se os custos e maximizando seu desempenho, beneficiando tanto o produtor de quadros de bicicleta, quanto o ciclista (Frag, 2020).

Sendo um campo de estudo importante para os engenheiros de materiais, a seleção de materiais para quadros de bicicleta necessita da estruturação de um conteúdo didático eficaz, incluindo o material de ensino, o uso de softwares especializados, a análise de cenários históricos, quadros financeiros e a consulta de fontes bibliográficas confiáveis, como os principais autores ligados ao tema, artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado, teses de doutorado ou demais pesquisas. As abordagens influenciadas por Ashby e Frag fornecem uma estrutura adequada para a seleção de materiais em projetos industriais, além de um modo de transmitir os conhecimentos ligados ao tema para os estudantes de engenharia.

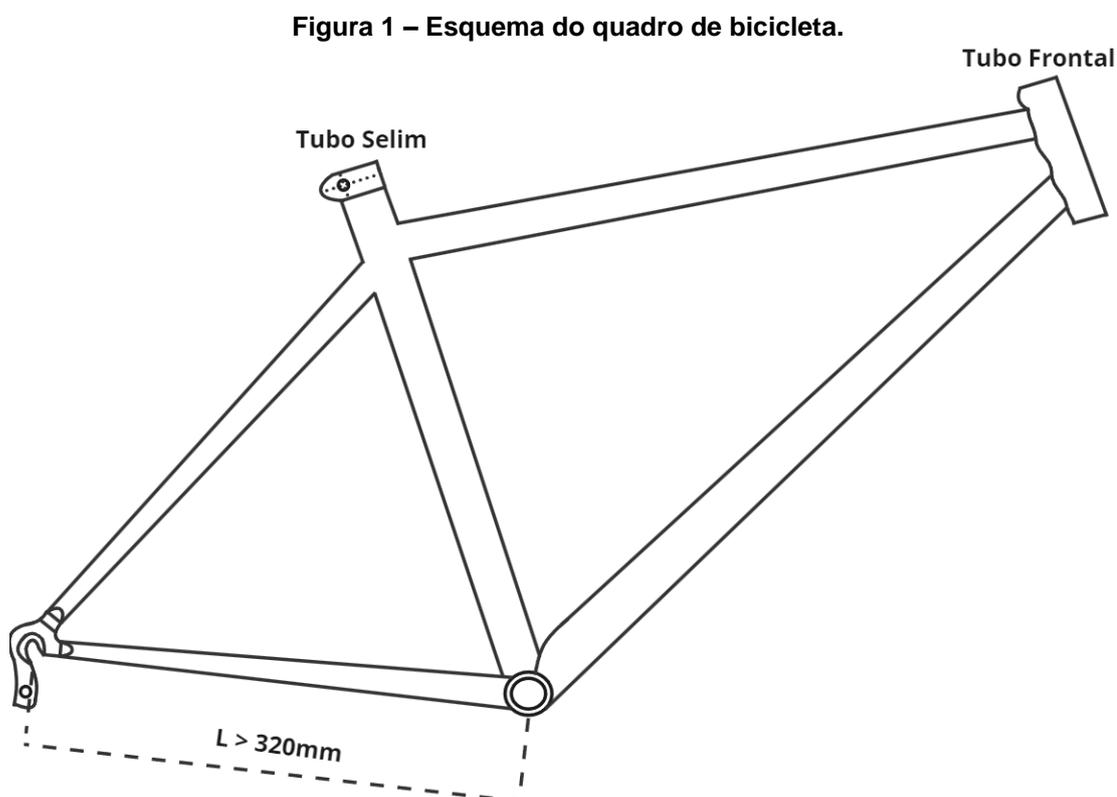
Com os recursos associados à seleção de materiais, é possível filtrar os materiais disponíveis e escolher os que mais se adequam ao projeto mecânico. Para isso o engenheiro deve utilizar os conhecimentos associados à engenharia de materiais, escolhendo aqueles que apresentam melhores propriedades para a fabricação de um quadro de bicicleta resistente mecanicamente e à corrosão, de baixo peso, rígido, dúctil, além de baixo custo.

O presente trabalho é pioneiro na área de seleção de materiais do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e fornece aos estudantes um conteúdo didático de apoio para a disciplina de Seleção de Materiais, de modo a facilitar o aprendizado, trazendo estudos comparativos sobre o tema, aplicando os conhecimentos ligados à engenharia de materiais em um caso de seleção de materiais para quadros de bicicleta, abordando as metodologias de seleção de Ashby e Farag, bem como aplicando tais conteúdos em simulação computacional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 QUADRO DE BICICLETA

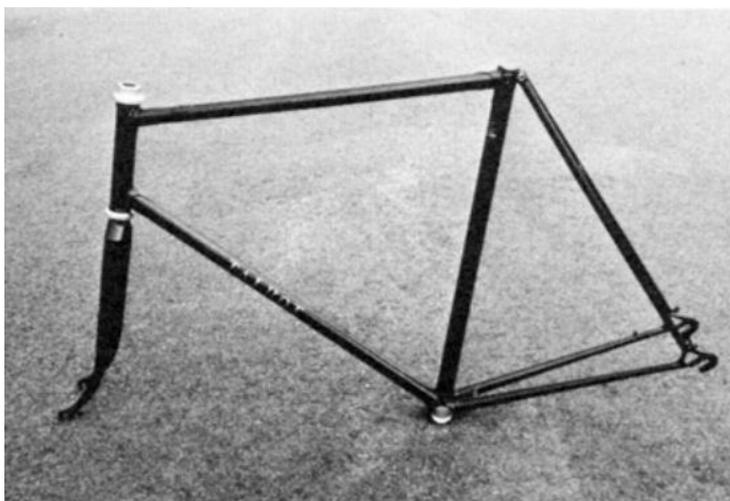
O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), através da Portaria nº 202, de 30 de abril de 2021, do Ministério da Economia do Brasil (Brasil, 2021), define quadro de bicicleta como “componente de bicicleta com estrutura tubular, onde a distância entre o centro do eixo da roda traseira e o centro do eixo da pedivela deve ser superior a 320 mm e tubo frontal (cabeçote) com diâmetro interno menor ou igual a 31 mm”. As delimitações previstas para o quadro de bicicleta estão demonstradas na Figura 1.



Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

A palavra quadro se refere à estrutura de acoplamento dos tubos mecânicos entre os triângulos principal e traseiro da bicicleta (Talbot, 1984). A Figura 2 apresenta a estrutura convencional de um quadro de bicicleta.

Figura 2 – Quadro de bicicleta.



Fonte: Talbot (1984).

O comprimento típico dos quadros de bicicleta, sua distância entre os eixos da roda traseira e da roda dianteira é de 1,02 m e seus formatos variam com o desempenho ou a estética (Alves, 2022). A Figura 3 da empresa KSW, localizada na Vila Socorro em São Paulo (SP), mostra um quadro de bicicleta de liga de alumínio 6061 utilizado na modalidade Mountain Bike (MTB), além da medida do tubo selim, os tratamentos térmicos de têmpera e processamento de forjamento envolvidos na confecção do quadro.

Figura 3 – Quadro KSW XLT 100.



Fonte: Adaptado do Site KSW.

A Figura 4 traz a imagem de um quadro de titânio da empresa No. 22, localizada em Upsate, New York, nos Estados Unidos.

Figura 4 – Drifter Aventura Frame.



Fonte: Site No. 22.

O INMETRO referencia a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 14714 (ABNT, 2013) para os testes designados ao quadro de bicicleta. Caso o quadro atenda aos critérios de segurança estabelecidos, ou seja, obtenha resultados positivos em todos os testes, pode ser comercializado. Inicialmente tal norma estabelece que se deve verificar o estado de integridade do quadro de bicicleta por meio de ensaios não destrutivos. Tais ensaios revelam se não há trincas ou fraturas no quadro. A norma não especifica quais ensaios não destrutivos devem ser realizados, podendo-se utilizar a inspeção visual, revelação por líquido penetrante ou ultrassom.

2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DO QUADRO DE BICICLETA

Os ensaios não destrutivos testam o estado de integridade do quadro de bicicleta antes dos ensaios destrutivos obrigatórios da Norma NBR 14714 (ABNT, 2013), de modo a verificar a existência de trincas ou fraturas que podem ser geradas

por corrosão, contaminação em geral ou concentração de tensão. A Inspeção visual é o ensaio não destrutivo mais comum, onde o instrumento de observação é o olho humano. Podem-se utilizar lentes ou monitores para auxiliar o ensaio que detecta os defeitos a nível superficial (Sampaio, 2009).

Outro ensaio não destrutivo que pode ser utilizado é o ensaio por líquido penetrante, comum quando se trabalha com quadros de bicicleta por detectar falhas a nível superficial e falhas internas próximas à superfície. Para realizar o ensaio a superfície deve estar limpa e seca, pois é utilizado um líquido que molha a superfície, penetra nas cavidades onde há falhas no material e as preenche. Em seguida é utilizado um revelador para que as trincas fiquem evidentes (Souza, 2023).

Na Figura 5, as falhas de um quadro metálico são reveladas pelo ensaio de líquido penetrante, utilizando-se um líquido de cor vinho e posteriormente um revelador:

Figura 5 – Ensaio de líquido penetrante em um quadro metálico.



Fonte: Solda [...] (2018).

Segundo Souza (2023), no resultado do ensaio, a presença da coloração vinho indica o local das trincas e os locais da imagem que aparecem com maior região de tinta vinho são os locais que têm mais trincas. A inspeção visual e o ensaio de líquidos penetrantes são mais utilizados em quadros de bicicleta metálicos, pois

segundo Callister Jr. e Rethwisch (2016, p. 254) “as trincas associadas a falhas por fadiga quase sempre se iniciam (ou nucleiam) na superfície de um componente”.

Quando se deseja uma análise mais profunda da integridade do quadro de bicicleta, onde a inspeção visual e o ensaio por líquidos penetrantes não conseguem captar, pode-se recorrer ao ensaio por ultrassom. Tal ensaio é mais utilizado em bicicletas de quadros não metálicos, como fibras de carbono, que podem apresentar trincas internas, mais distantes da superfície, pela heterogeneidade do material ou defeitos de processamento e para a utilização em quadros metálicos pode-se verificar os defeitos da solda.

O teste consiste na propagação, reflexão e difração de um feixe sônico no material em uma frequência mais alta do que o ouvido humano consegue captar, acima de 20kHz. A onda mecânica se propaga através do movimento dos átomos no interior do quadro e é refletida quando incide numa descontinuidade ou falha interna para em seguida ser captada pelo aparelho de ultrassom (Souza, 2014).

A Ruckus Composites, “uma oficina especializada em inspeção e reparos de fibra de carbono localizada em Portland, no Estado de Óregon, Estados Unidos” utiliza um medidor de espessura Olympus 45MG, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Medidor Olympus 45MG.



Fonte: Kenaston (2020).

A imagem apresenta dois picos no medidor em uma leitura do tipo A-scan. Segundo Andreucci (2002), os picos indicam falhas internas do quadro que se

encontram no interior do material, detectadas numa reta vertical entre o medidor e a descontinuidade.

2.3 ENSAIOS DE SEGURANÇA DO QUADRO DE BICICLETA

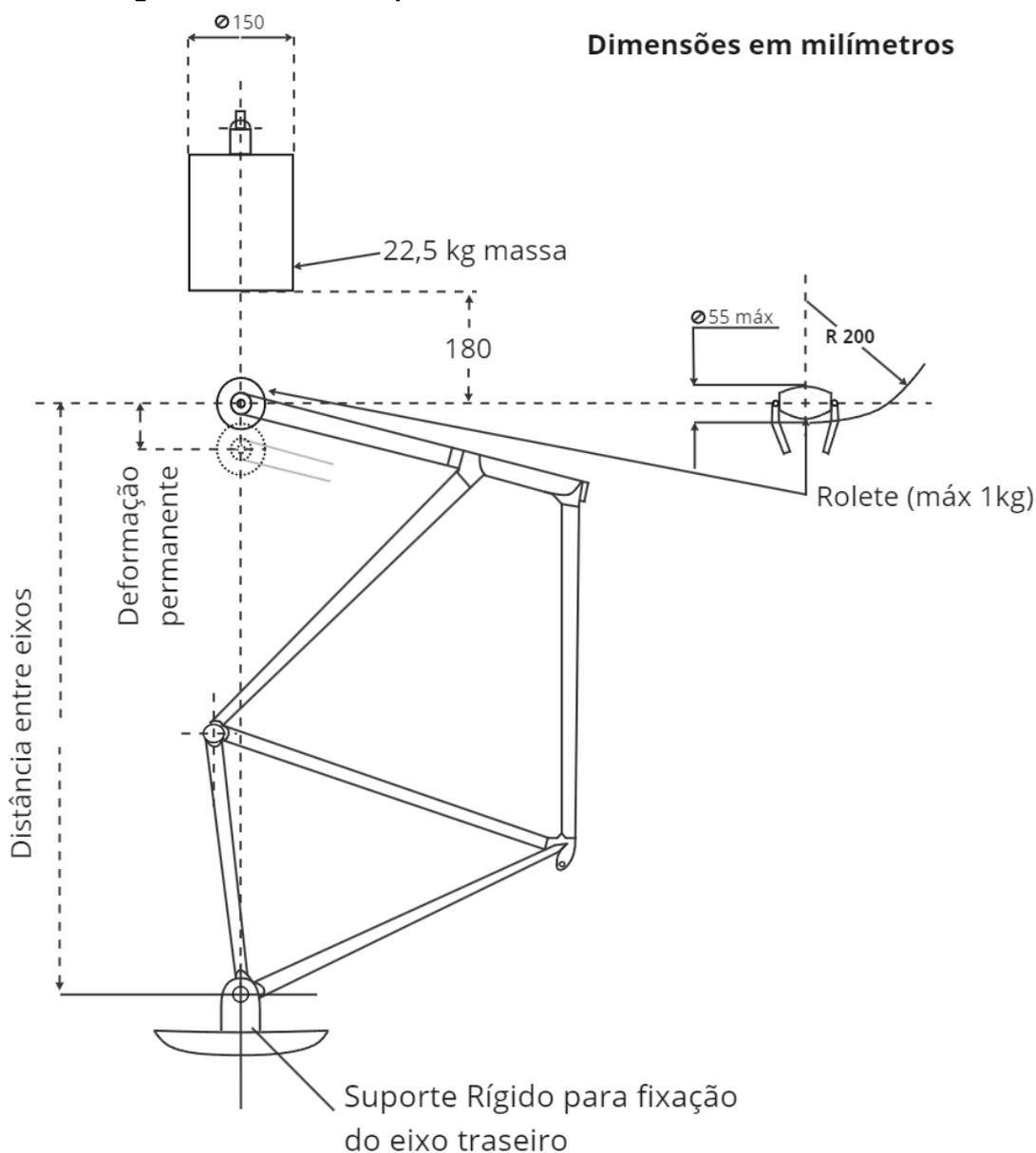
A norma ABNT NBR 14714 (ABNT, 2013) especifica três ensaios como requisitos de segurança para o quadro de bicicleta: ensaio de impacto, ensaio de queda e ensaio de fadiga do garfo rígido, todos são destrutivos. Os fabricantes de quadros de bicicleta devem destinar uma parte de sua produção para os ensaios destrutivos, com critério de escolha segundo o critério 6.2 da Portaria nº 202/2021 (Brasil, 2021). Em todos os ensaios o quadro não pode apresentar trincas ou fraturas (ABNT, 2013).

Segundo Cheng (2020), a norma da International Organization for Standardization (ISO 4210, 2015) define os requisitos de segurança técnica para bicicletas e foi criada com o objetivo de garantir a segurança das bicicletas fabricadas. A norma traz alguns testes com objetivo de garantir a resistência e durabilidade dos componentes individuais da bicicleta, como testes de impacto e fadiga horizontal. A parte 6 da ISO 4210 traz o teste de fadiga horizontal para todo quadro de bicicleta; já a norma ABNT não aborda testes de fadiga para o quadro, mas apenas para o garfo rígido que é acoplado ao quadro na bicicleta.

2.3.1 Ensaio de Impacto do peso contra o quadro

Segundo o item 2.1 da norma, o quadro de bicicleta deve ser posicionado na vertical, preso por um suporte rígido para a fixação do eixo traseiro. Deve ser acoplado ao quadro um garfo com rolete de massa até 1 kg ou na ausência do garfo deve-se utilizar uma barra de aço que receberá o impacto de um objeto de massa 22,5 kg em uma altura de 180 mm (ABNT, 2013), conforme a Figura 7.

Figura 7 – Ensaio de impacto de acordo com a Norma ABNT 14714.



Fonte: Adaptado de ABNT (2013).

Para passar no teste, além de não haver fratura, a deformação permanente não pode exceder 40 mm na utilização do garfo rígido e 10 mm na utilização da barra de aço. Os criadores da FUBI, uma bicicleta dobrável compacta, que trabalham com design inovadores de quadros de bicicleta, realizaram o teste de impacto, como demonstra a Figura 8.

Figura 8 – Ensaio de Impacto do quadro de bicicleta.



Fonte: ISO 4210 [...] (2019).

A Figura 8, obtida quando o objeto de 22,5 kg atinge o quadro, segue as diretrizes das normas ABNT NBR 14714 e ISO 4210, utilizando o garfo rígido com um rolete.

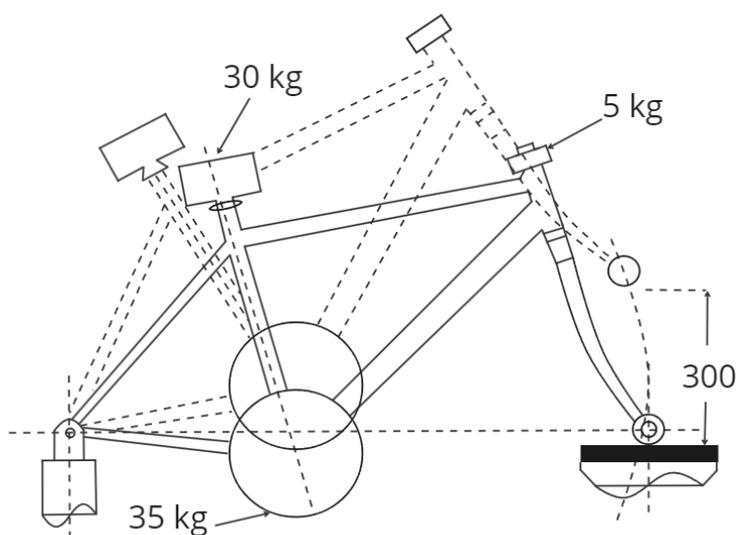
2.3.2 Ensaio de queda do quadro

O segundo ensaio que testa os requisitos de segurança prescritos na norma ABNT NBR 14714 é o ensaio de queda do quadro. Pode-se utilizar um garfo com rolete ou barra rígida, nas mesmas condições do ensaio anterior. Para executar o

ensaio, o quadro é colocado na posição horizontal e tem seu eixo traseiro fixado em um apoio de segunda ordem, que não permite o movimento de translação, apenas de rotação. O quadro deve ter distribuída e fixada uma massa de 70 kg na sua estrutura e ele deve ser rotacionado em uma altura de 300 mm e solto até o impacto, como expressa a Figura 9.

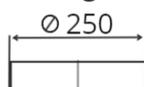
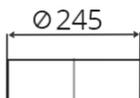
Figura 9 – Esquema do ensaio de queda do quadro.

Dimensões em milímetros



Cabeçote 5kg Tubo selim 30kg Luva central

(17,5kg x 2)



Fonte: ABNT (2013).

A empresa Yoeleo, fundada em 2007 no Canadá, cria produtos e fornece serviços ligados ao ciclismo. A empresa realizou o ensaio de queda do quadro conforme Figura 10.

Figura 10 – Ensaio de queda do quadro.



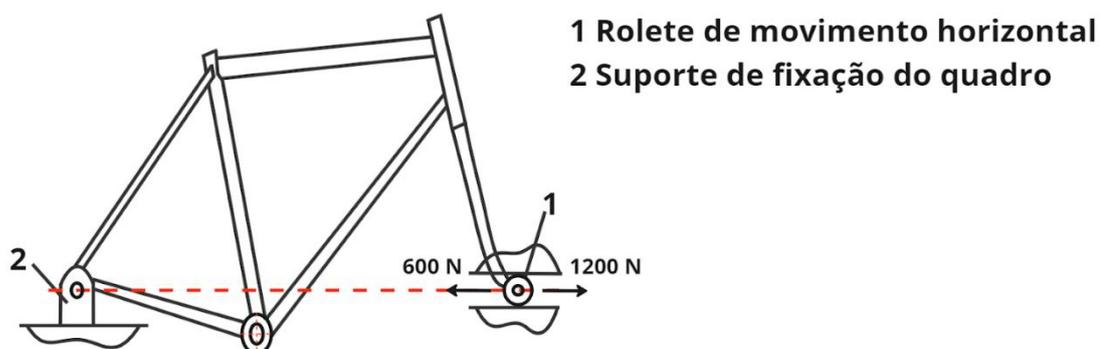
Fonte: R21 Road [...] (2021).

Segundo a norma ABNT NBR 14714 (ABNT, 2013), o mesmo teste deve ser executado duas vezes e, para obter resultado positivo, o quadro não pode apresentar sinais visíveis de trincas e/ou fratura.

2.3.3 Ensaio de fadiga do quadro de bicicleta

Segundo Cheng (2020), a norma ISO 4210 indica um outro teste de fadiga para o quadro de bicicleta, utilizando forças horizontais, em que o quadro é submetido a 10^5 ciclos de forças de 1200N e 600N, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Ensaio de Fadiga do quadro.



Fonte: ISO 4210 [...] (2014)

O rolete se movimenta apenas horizontalmente e transmite os esforços do ensaio ao quadro. A Hung TA Instrument CO., LTD., uma empresa de equipamentos para testes e inspeção, fundada no ano de 1975 em Taiwan, realizou o ensaio de fadiga do quadro de bicicleta com forças horizontais, de acordo com a Figura 12.

Figura 12 – Ensaio de fadiga do quadro de bicicleta.



Fonte: HT2707 [...] (2021).

Segundo a norma ISO 4210, após completar os ciclos de fadiga, o quadro não pode apresentar sinais visíveis de trinca e/ou fratura para obter resultado positivo no teste.

2.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS

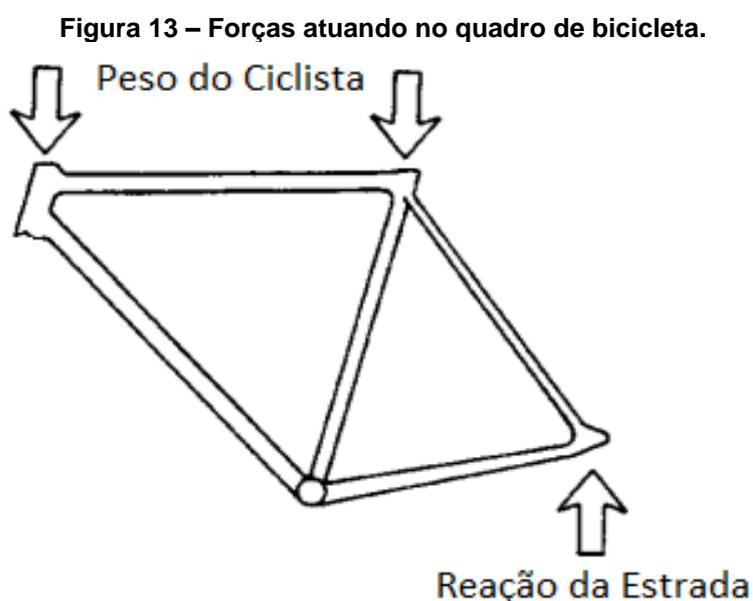
Quadros de bicicleta produzidos industrialmente são escolhidos tendo por base suas funções, restrições e os objetivos do projeto mecânico. As funções se referem ao tipo de carregamento ao qual o material é submetido, tais como eixos, vigas, colunas ou tirantes. Os eixos suportam carregamento de torque, vigas suportam flexão, colunas suportam compressão axial e os tirantes suportam carregamento de tração. O projeto mecânico estabelece as condições de utilização dos materiais, sua forma geométrica, as cargas que o material deverá suportar e o meio ao qual o material será inserido. Os objetivos do material a ser escolhido são de maximizar ou minimizar determinada característica do componente, como peso, resistência, rigidez, durabilidade ou custo (Ashby, 2005).

A seleção de materiais desempenha um papel fundamental na indústria, estabelecendo critérios numéricos para a escolha da matéria prima mais adequada, de acordo com o processo industrial. Tal escolha afeta o desempenho, a eficiência e os custos dos produtos. Essa abordagem estratégica de seleção é abordada por Ashby (2005) e Farag (2020), cujas contribuições na área de engenharia de materiais são de grande relevância.

Ashby (2005) introduz uma abordagem para a seleção de materiais, destacando a importância de considerar não apenas as propriedades individuais dos materiais, mas também as restrições e requisitos específicos de um projeto. Ele propõe o uso de índices de mérito que permitem comparar materiais com base em múltiplas propriedades, facilitando a tomada de decisões sobre o material mais adequado. Farag (2020) faz um comparativo entre a cada propriedade do material para o projeto mecânico de modo a estabelecer uma escala de importância entre tais propriedades.

2.4.1 Função de Seleção

A escolha dos materiais é feita com base em sua função dentro do projeto mecânico, ou seja, o comportamento do material durante o uso, a tarefa de suportar esforços que o material executa. A função de viga é denominada ao componente que sofre esforços de flexão, como os tubos que compõem o quadro de bicicleta (Ashby, 2005).



Fonte: Adaptado de Maleque (2010).

O quadro de bicicleta é o componente que une e sustenta as outras peças da bicicleta, ou seja, recebe esforços mecânicos do peso do ciclista, do apoio no guidão, do movimento do pedal e a reação da roda da bicicleta em contato com a estrada (Ashby, 1995).

2.4.2 Restrições do Projeto Mecânico

Cada material tem limitações em sua utilização na indústria. As condições de uso dos materiais estão numa faixa onde não devem ocorrer falhas mecânicas, de modo que os materiais escolhidos para cada projeto devem suportar as cargas requeridas e a corrosão dos ambientes adversos aos quais serão inseridos. As propriedades do material indicam a possibilidade de atender às restrições do projeto, de modo que devem ser selecionados aqueles materiais com condições de atender ao maior número de restrições, como peso do ciclista, resistência, rigidez, preço e o meio corrosivo. Para praticar o ciclismo de maneira segura, o quadro de bicicleta deve suportar os esforços da prática esportiva sem falhar mecanicamente, ou seja, ter o mínimo de deformação, não romper, não sofrer corrosão (Ashby, 2005).

As restrições servem como filtros para selecionar os materiais que são capazes de atendê-las, dentre todos os materiais disponíveis. Restrições de manufatura como soldabilidade, fundibilidade e conformação, restrições ambientais, como o meio ao qual o material estará inserido, ou a afinidade que se tem com o material, se já foi utilizado antes para determinado produto, limitam os materiais disponíveis para a seleção (Maleque; Salit, 2014).

De acordo com a Portaria nº 202/2021 (Brasil, 2021), o tubo frontal ou cabeçote, onde se encontra o guidão, deve ter um diâmetro máximo de 31mm, mas a norma não especifica o diâmetro do canote selim, onde se encontra o banco da bicicleta. O diâmetro de 27,2 mm e espessura 3 mm do canote de selim da marca KSW, que utiliza liga de alumínio, é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Canote de selim KSW.



Fonte: Site KSW.

A empresa Ti Cycles, fundada em 1990 na cidade de Portland, Óregon, Estados Unidos, que utiliza liga de titânio para o tubo selim, tem a mesma dimensão de 27.2 mm de diâmetro para o canote de selim, como na Figura 15.

Figura 15 – Canote de selim de titânio.



Fonte: Site Ti Cycles.

Segundo Callister Jr. e Rethwisch (2016), a tensão é a divisão da força aplicada em uma direção perpendicular à seção transversal de um corpo de prova. Considerando que o tubo canote de selim receberá integralmente todos os esforços ligados ao peso do ciclista, realizando um movimento de compressão no tubo, o valor da tensão será o valor da divisão do peso do ciclista pela área desse tubo. A tensão admissível deve ter a tensão dividida pelo fator de segurança, sendo o mesmo maior que 1, segundo a fórmula de Hibbeler (2019):

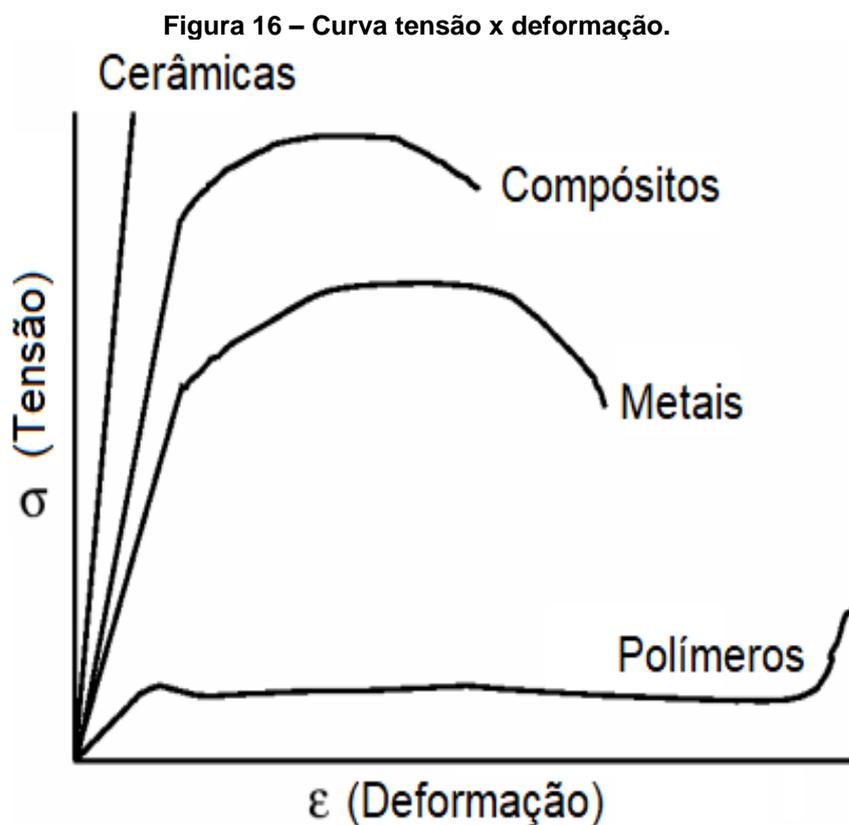
$$Tensão\ admissível = \frac{Tensão}{Fator\ de\ segurança} \quad (1)$$

$$Tensão\ admissível = \frac{(Força/Área)}{Fator\ de\ segurança} \quad (2)$$

$$Tensão\ admissível = \frac{\left(\frac{Peso\ do\ ciclista}{Área\ transversal\ Selim}\right)}{Fator\ de\ segurança} \quad (3)$$

$$Tensão\ admissível = \frac{\left(\frac{Massa \times gravidade}{Área\ transversal\ Selim}\right)}{Fator\ de\ segurança} \quad (4)$$

Quando os materiais são submetidos a uma tensão tendem a se deformar. A Figura 16 demonstra o comportamento de deformação das cerâmicas, metais, polímeros e compósitos, em relação a sua forma original, quando submetidos a uma tensão:



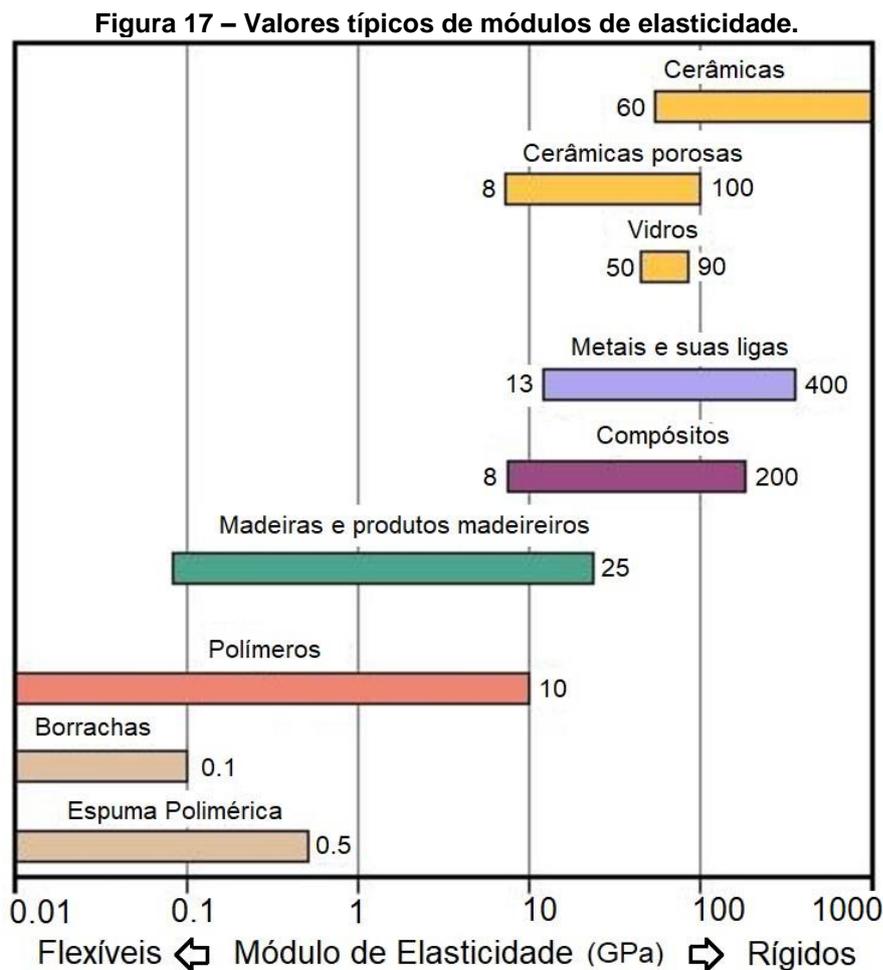
Fonte: Adaptado de Site Web MIT.

A zona retilínea do gráfico indica a região elástica, ou seja, a região onde o material retorna a sua forma original quando retirada a tensão. A lei de Hooke (Equação 5) demonstra que o módulo de elasticidade (E) é a divisão da tensão pela deformação na região elástica (Equação 6), como mostra Hibbeler (2019):

$$\text{Lei de Hooke: } \sigma = E\epsilon \quad (5)$$

$$\text{Módulo de Elasticidade: } E = \sigma/\epsilon \quad (6)$$

A Figura 17 traz uma escala dos módulos de elasticidade de diferentes materiais, desde espumas poliméricas com o módulo mais baixo até as cerâmicas, com o módulo mais alto:

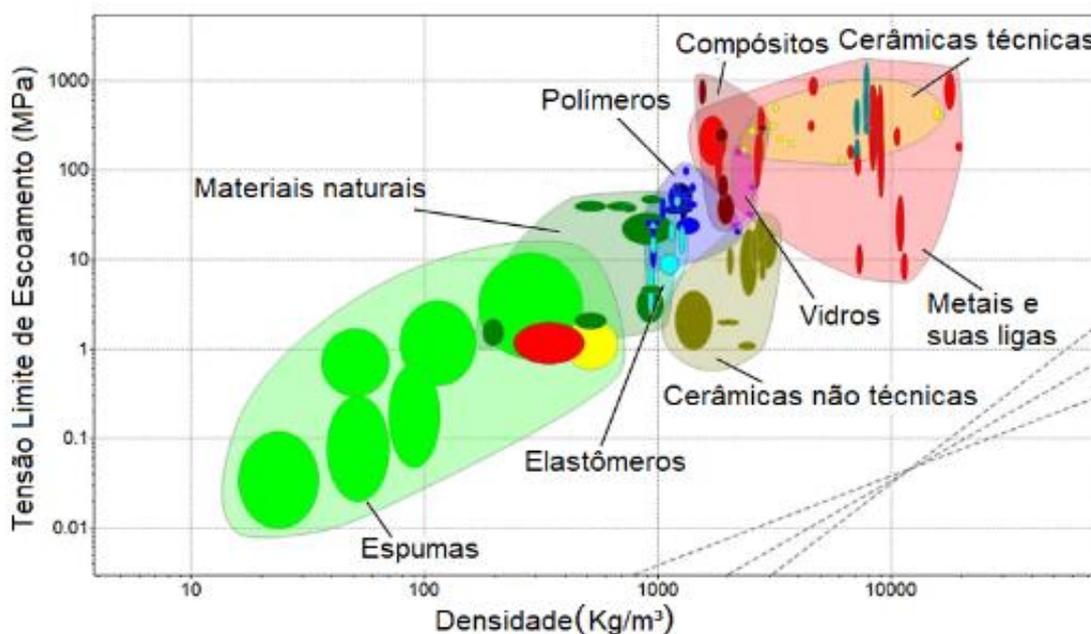


A escala de valores de módulos de elasticidade dos metais e suas ligas está situada entre os polímeros e as cerâmicas, algumas ligas metálicas apresentam comportamento dúctil, ou seja, tendem a se deformar mais quando submetidos aos esforços e outras apresentam comportamento rígido, tendendo a não deformação mediante as tensões (Ashby; Johnson, 2010).

Uma das restrições ligadas aos materiais para quadros de bicicleta é a mínima rigidez necessária, de modo que os materiais utilizados estejam dentro da zona elástica para não haver deformação plástica. Tal restrição pode limitar a utilização de polímeros para quadros de bicicleta, pois em uma baixa tensão tendem a se deformar permanentemente, em comparação com as outras classes de materiais, dessa forma dificilmente atenderá ao primeiro teste destrutivo da norma ABNT NBR 14714, o teste de impacto de peso contra o quadro, que permite apenas a deformação permanente de no máximo 40 mm.

Quando o material é submetido a uma tensão e após um certo tempo é retirada essa tensão, caso o material não retorne ao tamanho original significa que o material se deformou permanentemente ou plasticamente. A tensão limite de escoamento (σ_y) é a tensão a partir da qual o material se deforma permanentemente (Souza, 1982). A Figura 18 apresenta a tensão limite de escoamento em função da densidade de diferentes classes de materiais.

Figura 18 – Tensão Limite de Escoamento x Densidade.

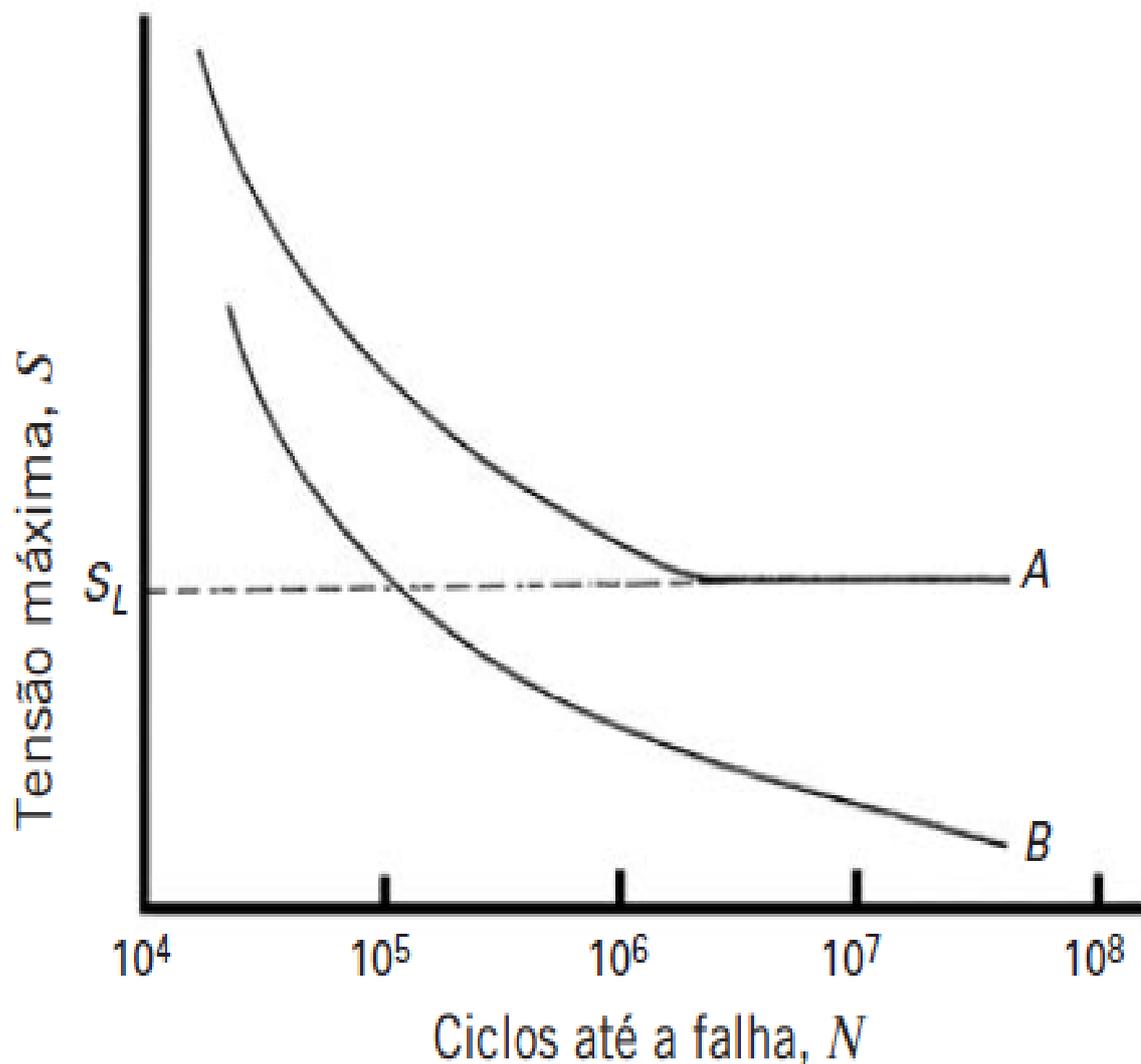


Fonte: Adaptado de Ansys (2021).

Esta figura apresenta a tensão limite de escoamento de diferentes classes de materiais em função de sua densidade, em que os polímeros possuem σ_y de no máximo 100 MPa, já os valores das cerâmicas variam entre 100 e 1000 MPa e o dos metais chega a 1000 MPa. Tais valores indicam uma melhor utilização dos metais para quadros de bicicleta em comparação com os polímeros por possuírem em geral um maior valor de σ_y , ou seja, necessitam de um maior valor de tensão a partir da qual se deformam permanentemente (Ashby, 1995).

O projeto mecânico para quadros de bicicleta busca materiais capazes de suportar esforços cíclicos, tendo como pré-requisito a capacidade de resistir a ensaios de fadiga, como o ensaio proposto pela norma ISO 4210. Segundo Meyers (1999), resistência à fadiga ou limite de fadiga é a capacidade do material de suportar esforços cíclicos. Pode-se observar a resistência a fadiga dos materiais de acordo com o número de ciclos ao qual são submetidos até a falha mecânica, como a Figura 19.

Figura 19 – Curva S-N.

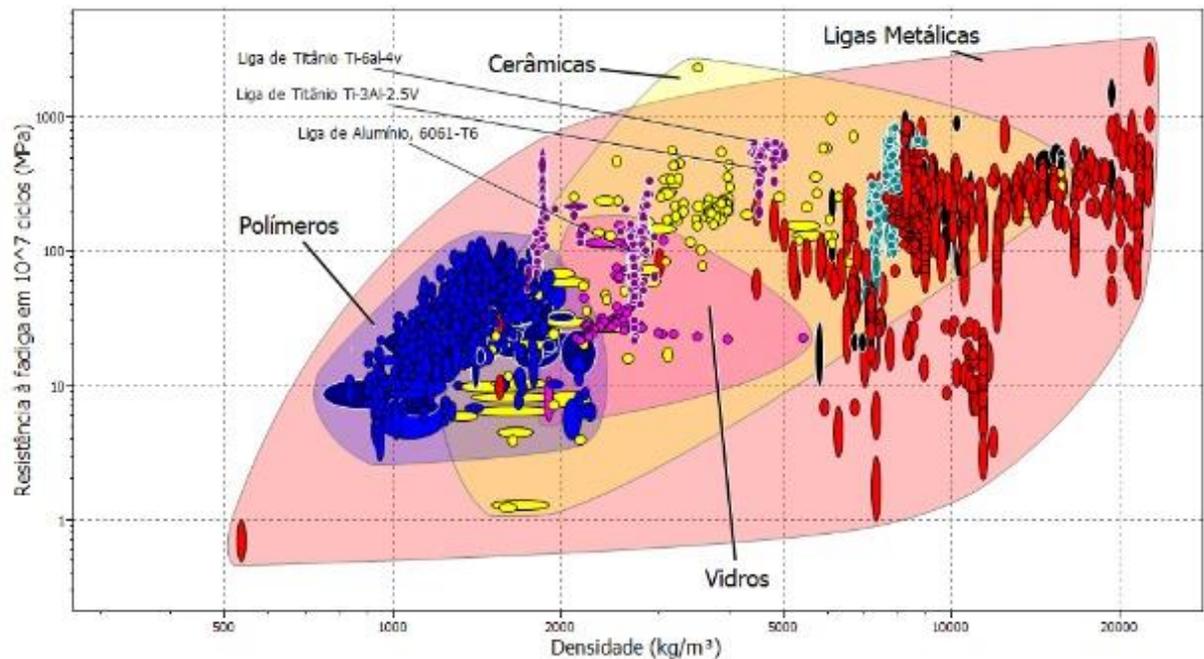


Fonte: Adaptado de Meyer (1999).

A Figura 19 indica as curvas A dos materiais ferrosos e B dos materiais não ferrosos. Para o material B, quando submetido a 10^5 ciclos, a resistência à fadiga é o valor de S_L . Materiais com maior resistência à fadiga suportam um maior número de ciclos de tensões sem falhar mecanicamente. O material A tem vida em fadiga infinita para uma tensão menor que S_L . A

Figura 20 relaciona a resistência à fadiga em 10^7 ciclos (MPa) com a densidade (kg/m^3).

Figura 20 – Resistência à fadiga em 10^7 ciclos (MPa) vs. Densidade (kg/m^3).



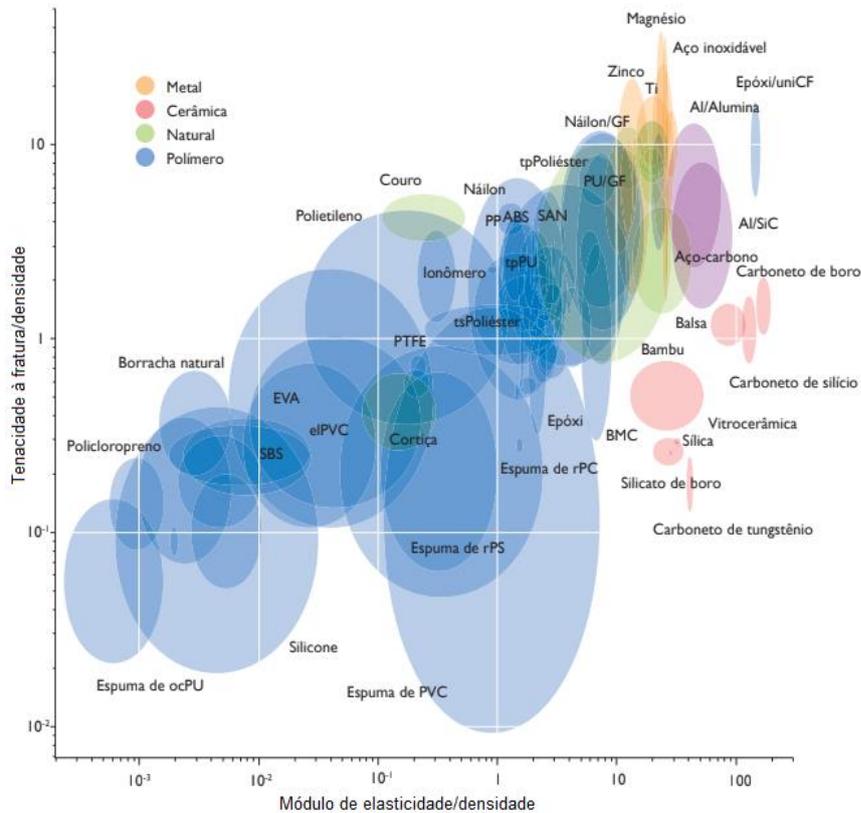
Fonte: Adaptado de Ashby (2018).

Com o limite de fadiga no eixo Y, a maior parte dos polímeros e das cerâmicas ocupa uma posição inferior, ou seja, possui um menor limite de fadiga que os metais. Para as ligas de alumínio a posição é muito próxima às cerâmicas e superior aos polímeros, já as ligas de titânio possuem um limite de fadiga acima dos polímeros e das cerâmicas destacadas na figura (Ashby, 2012).

Outra restrição importante é a mínima resistência do material à propagação de trincas, para que não haja fratura do material. Dessa forma, a mínima tenacidade à fratura (K_{Ic}) necessária para os quadros de bicicleta restringe a utilização de polímeros e cerâmicas por possuírem tenacidade à fratura menor que os metais (Ashby, 2012).

Cerâmicas e polímeros podem fraturar mais facilmente que os metais durante a atividade do ciclismo pelos impactos inerentes a tal prática. O surgimento e a propagação das trincas poderão romper o material com mais facilidade. A Figura 21 fornece uma escala de tenacidade à fratura dividida pela densidade do material, relacionando-a com o módulo de elasticidade também dividido pela densidade dos materiais (Ashby, 2010).

Figura 21 – (Tenacidade à fratura/densidade) x (módulo de elasticidade/densidade).



Fonte: Adaptado de Ashby (2011).

Esta figura traz uma combinação de propriedades: no eixo y estão relacionadas tenacidade à fratura e densidade, enquanto o eixo x relaciona módulo de elasticidade e densidade. Dessa forma é possível selecionar materiais ao mesmo tempo leves, rígidos e tenazes à fratura. Pela posição no eixo y, os polímeros e as cerâmicas possuem tenacidade à fratura inferior aos metais, assim os metais se tornam melhores candidatos para os quadros de bicicleta, por serem mais capazes de resistir aos impactos inerentes à prática do ciclismo. Os metais são materiais menos porosos e quando possuem trincas têm a sua propagação mais lenta em comparação com a cerâmica e os polímeros (Ashby, 2010).

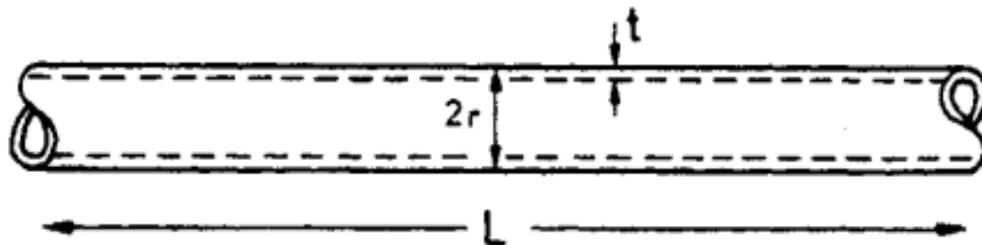
2.4.3 Objetivos dos Materiais

Cada material tem propriedades que viabilizam o projeto mecânico. O material a ser escolhido deve ser capaz de maximizar ou minimizar componentes, como a vida útil do material, redução de custos, resistência à fratura, à corrosão e ao escoamento.

Os materiais que atendem ao maior número de objetivos ou aos mais importantes são os preferíveis para o projeto mecânico (Ashby, 2005).

Para o quadro da bicicleta formado por tubos metálicos, considera-se um tubo oco de espessura t , com massa m , raio r e comprimento L , conforme a Figura 22.

Figura 22 – Tubo que compõe o quadro de bicicleta.



Fonte: Adaptado de Ashby (1995).

Desejando-se obter um tubo leve e resistente mecanicamente são descritas as equações 7, 8, 9 e 10:

$$m = \rho * V \quad (7)$$

$$V = \text{Área lateral} * \text{Espessura} \quad (8)$$

$$V = 2\pi rLt \quad (9)$$

$$m = \rho 2\pi rLt \quad (10)$$

Para o momento fletor do tubo Mf , são levados em consideração o momento de inércia I , limite de resistência σ_r e raio r , segundo a Equação 11:

$$Mf = \frac{(I\sigma_r)}{r} \quad (11)$$

Para um tubo de paredes finas considera-se o momento de inércia, como a Equação 12:

$$I = \pi r^3 t \quad (12)$$

Unindo-se as equações e isolando a massa, obtêm-se as Equações 13 e 14:

$$m = \frac{(\rho 2\pi r L M f)}{\pi r^3 \sigma_r} \quad (13)$$

$$m = \left[\frac{(2LMf)}{\pi r^2} \right] * \left(\frac{\rho}{\sigma_r} \right) \quad (14)$$

Os termos da equação indicam que, para diminuir a massa, deve-se escolher materiais que apresentam baixa densidade e alto limite de resistência. O último termo da equação entre parênteses indica um valor correspondente às propriedades do material que cumprem o objetivo desejado. Esse termo é chamado de índice de mérito ou índice de material, em que, ao inverter os termos, o maior valor do índice indica um melhor candidato para a seleção, conforme a Equação 15:

$$IM1 = \frac{\sigma_r}{\rho} \quad (15)$$

Em uma situação que se queira obter um tubo leve e rígido, deve-se ter um material com alto módulo de elasticidade e baixa densidade. Substituindo o limite de resistência pelo módulo de elasticidade na equação anterior, obtêm-se a Equação 16 e encontra-se o índice de mérito descrito na equação seguinte:

$$\left[\frac{(2LMf)}{\pi r^2} \right] * \left(\frac{\rho}{E} \right) \quad (16)$$

$$IM2 = \frac{E}{\rho} \quad (17)$$

As equações descritas de IM1 e IM2 não levam em consideração a deflexão do material quando sob esforço de flexão, por exemplo com o peso do ciclista sob o quadro de bicicleta. Dessa forma faz-se uma aproximação do quadro de bicicleta por uma viga duplamente apoiada, com o peso do ciclista como a força que atua nessa viga. O material deve resistir ao ponto que possibilita maior deflexão. O Metals Handbook v. 20 (ASM International, 1997) no exemplo 2 “Materiais para mastros de

windsurf”, a partir da Equação 31, apresenta as equações que consideram a deflexão do material para se obter o índice de mérito.

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (18)$$

$$I = \frac{\pi r^4}{4} \quad (19)$$

Onde δ é a deflexão sofrida pelo material, F é o peso do ciclista, L o comprimento do cilindro, E o módulo de elasticidade, r o raio e I o momento de inércia para um círculo.

$$m = \pi r^2 L \rho \quad (20)$$

$$r = \left(\frac{m}{\pi L \rho}\right)^{1/2} \quad (21)$$

$$\delta = \frac{4FL^3}{48E\pi r^4} \quad (22)$$

$$\delta = \frac{FL^3}{12E\pi r^4} \quad (23)$$

$$\delta = \frac{FL^3}{12E\pi \left[\left(\frac{m}{\pi L \rho}\right)^{1/2}\right]^4} \quad (24)$$

$$\delta = \frac{FL^5 \pi \rho^2}{12Em^2} \quad (25)$$

$$m = \frac{(FL^5 \pi)^{1/2}}{12\delta} \frac{\rho}{\sqrt{E}} \quad (26)$$

A redução da massa m depende de uma baixa densidade ρ e de um alto módulo de elasticidade E . Dessa forma, tem-se:

$$IM3 = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (27)$$

Ao considerar uma variável preço (C) do material, as equações são modificadas, dividindo-se os índices de mérito pelo preço:

$$IM1 = \frac{\sigma_r}{\rho C} \quad (28)$$

$$IM2 = \frac{E}{\rho C} \quad (29)$$

$$IM3 = \frac{E^{1/2}}{\rho C} \quad (30)$$

Ferrante (2002) traz uma lista com alguns índices de mérito, o Quadro 1 apresenta os que consideram a tensão, limite de escoamento e a tenacidade à fratura.

Quadro 1 – Índices de mérito de barras e tubos em flexão.

Tabela Ferrante	Minimização de peso para		
Modo de carregamento	Rigidez	Resistência ao dobramento	Resistência à fratura
Barra e tubos em compressão	E/ρ	σ_y/ρ	K_{IC}/ρ
Barras e tubos em flexão	$E^{1/2}/\rho$	$\sigma_y^{2/3}/\rho$	$K_{IC}^{2/3}/\rho$

Fonte: Adaptado de Ferrante (2002).

Para a seleção de materiais, utiliza-se os índices de mérito em um gráfico onde os eixos representam cada uma das propriedades do índice e os materiais são divididos pelo valor numérico das suas propriedades e em classes de materiais. Traça-se uma reta, chamada linha de seleção, na qual o índice de mérito deve ser constante ao longo dessa linha no gráfico. Para designar a inclinação da linha de seleção no gráfico é estabelecida uma função logarítmica, como na equação a seguir, utilizando como exemplo a resistência ao dobramento de barras e tubos em flexão (Ashby, 2018).

$$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho} = M \quad (31)$$

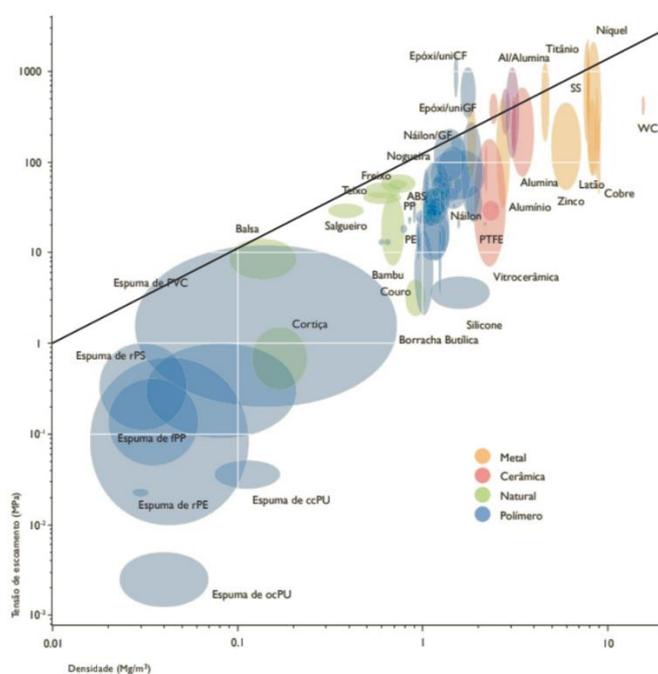
$$\frac{\log \sigma_y^{2/3}}{\rho} = \log M \quad (32)$$

$$\log \sigma_y^{2/3} - \log \rho = \log M \quad (33)$$

$$\left(\frac{2}{3}\right) \log \sigma_y - \log \rho = \log M \quad (34)$$

A inclinação da reta se dá pelo inverso do número que multiplica a propriedade que se deseja maximizar, nesse caso a tensão limite de escoamento, em que a reta tem inclinação de 1,5, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Tensão de Escoamento x Densidade.



Fonte: Ashby (2010).

Na Figura 23, a reta está posicionada na tensão de escoamento de 1MPa, a posição que a linha de seleção toca o eixo Y é escolhida de modo a restringir a região

de busca do material de seleção, quanto mais acima no eixo Y, mais restritas serão as opções de materiais disponíveis, a escolha da posição da linha de seleção depende da etapa de restrições do projeto mecânico. Os materiais que se encontram mais acima da reta são preferíveis para a seleção, pois quanto mais acima possuem um maior número da divisão entre tensão limite de escoamento e densidade, ou seja, possuem um índice de mérito maior (Ashby, 2018).

2.5 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

Escolher um determinado material para uma determinada aplicação é por vezes questão subjetiva que varia de acordo com o contexto no qual o processo de seleção está inserido. Tal processo depende de fatores como a preferência das pessoas da indústria que trabalham diretamente com os materiais do projeto mecânico ou da preferência do cliente ao qual o produto será vendido. A aplicação das metodologias propostas por Ashby e Farag implica em fornecer critérios numéricos de seleção pelos índices de mérito ou pela matriz de seleção que tornam tal processo mais objetivo (Farag, 2020).

Índices de mérito propostos por Ashby (2005) constituem a divisão numérica das propriedades dos materiais para conseguir os objetivos do projeto mecânico, como um quadro de bicicleta leve e rígido. Os materiais que apresentarem o maior valor dessa divisão são os melhores candidatos para a seleção.

O critério proposto por Farag (2020) na matriz de seleção atribui pesos diferentes para as propriedades de modo que algumas propriedades são mais relevantes que outras, dependendo do contexto do projeto mecânico.

2.6 LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio é o elemento químico de número atômico 13 na tabela periódica, possui densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$ e estrutura cristalina cúbica de faces centradas (CFC). (Callister Jr.; Rethwisch, 2016). É encontrado no minério bauxita sob a forma de óxido de alumínio (Al_2O_3) e suas ligas são classificadas segundo Lima (2020) pela norma ABNT NBR 6834 por número de série XXXX sendo X1 o elemento de maior teor na liga; X2 indica o teor mínimo ou máximo de um determinado elemento; X3 e X4 servem para diferenciar as várias ligas de um mesmo grupo. Para X1 diferente de 1, o

elemento químico correspondente será o elemento de maior teor na liga, porém com composição química menor que a do alumínio. Pode-se ainda especificar o tipo de tratamento térmico a que a liga foi submetida ao lado dessa nomenclatura, disposta na Tabela 1 (ABNT, 2000; Barbosa, 2014).

Quadro 2 – Classificação das ligas de alumínio.

Alumínio 99% de pureza	1XXX
Alumínio-Cobre	2XXX
Alumínio-Manganês	3XXX
Alumínio-Silício	4XXX
Alumínio-Magnésio	5XXX
Alumínio-Magnésio + Silício e Cobre	6XXX
Alumínio-Zinco	7XXX
Alumínio-Estanho	8XXX

Fonte: ABNT (2000).

A utilização industrial do alumínio foi possível através dos processos Bayer de obtenção da alumina pela bauxita e Hall-Heroult, de obtenção do alumínio presente na alumina por eletrólise. Para produzir quadros de bicicleta são utilizadas as ligas da série 6XXX e 7XXX (Barbosa, 2014).

Segundo Callister (2016), o termo envelhecimento consiste no aquecimento do material em uma temperatura intermediária por um determinado tempo para favorecer a difusão de precipitados da solução sólida e têmpera consiste no resfriamento rápido de uma temperatura em que há solução sólida até a temperatura ambiente. Segundo Pirolla (2024), a Norma ABNT NBR 12315 classifica T6 como um tratamento térmico da têmpera após o envelhecimento.

As ligas de alumínio são utilizadas na fabricação de quadros e componentes devido à sua leveza e resistência. Esses materiais oferecem uma excelente relação peso-resistência, tornando-os ideais para ciclistas que buscam bicicletas ágeis e responsivas. Neste contexto, é fundamental examinar as diferentes ligas de alumínio, suas propriedades específicas e como essas características afetam o desempenho da bicicleta. Além disso, a seleção da liga de alumínio adequada para um determinado quadro de bicicleta depende das necessidades individuais do ciclista e do estilo de

ciclismo, o que torna a compreensão das propriedades destas ligas ainda mais relevante (Barbosa, 2014).

Segundo Gupta e Rao (2016), as ligas de alumínio Al 6061-T6 e Al 7005-T6, são utilizadas em quadros de bicicleta e possuem as seguintes propriedades, descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas das Ligas Al 6061-T6 e Al 7005-T6.

Liga	Al 6061-T6	Al 7005-T6
Densidade (g/cm ³)	2,7	2,78
Módulo de Elasticidade (GPa)	68,9	71
Coefficiente de Poisson	0,33	0,32
Tensão de Ruptura (MPa)	310	370
Tensão Limite de Escoamento (MPa)	276	317
Módulo de Cisalhamento (GPa)	26	27

Fonte: Adaptado de Gupta e Rao (2016).

De acordo com a tabela anterior, a liga Al 7005 apresenta melhores propriedades mecânicas de módulo de elasticidade e tensão limite de escoamento em comparação com a liga Al 6061. Por outro lado, se necessita de maior massa de material, num volume constante, para produzir a liga Al 7005, pois sua densidade é maior (Gupta; Rao, 2016).

Segundo o Metals Handbook volume 2 (ASM International, 1990), a liga Al 7005 possui tenacidade à fratura de 30,03 MPa√m, enquanto a liga Al 6061 possui tenacidade à fratura de 29,1 MPa√m. As ligas de alumínio descritas são caracterizadas pela composição química na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química da liga Al 6061-T6.

Componente	Peso
Alumínio (Al)	95,8 – 98,6%
Cromo (Cr)	0,04 – 0,35%
Cobre (Cu)	0,15 – 0,4%
Ferro (Fe)	Máx. 0,7%
Magnésio (Mg)	0,8 – 1,2%
Manganês (Mn)	Máx. 0,15%
Silício (Si)	0,4 – 0,8%
Titânio (Ti)	Máx. 0,15%
Zinco (Zn)	Máx. 0,25%

Fonte: Adaptado de ASM International (1990).

Tabela 3 – Composição química da liga Al 7005-T6.

Componente	Peso
Alumínio (Al)	91 – 94,7%
Cromo (Cr)	0,06 – 0,20%
Cobre (Cu)	Máx. 0,10%
Ferro (Fe)	Máx. 0,40%
Magnésio (Mg)	1,0 – 1,8%
Manganês (Mn)	0,20 – 0,70%
Silício (Si)	Máx. 0,35%

Fonte: Adaptado de ASM International (1990).

A empresa Amazon, multinacional de tecnologia norte-americana com sede em Seattle, Washington, nos Estados Unidos, tem uma média de preço para os quadros de bicicleta da liga 6061-T6 de 369\$ e da liga 7005-T6, de 692,5\$.

Por ser um material sujeito à passivação, o alumínio reage com o oxigênio - presente no ar e forma uma camada protetiva, aderente e fina de óxido de alumínio (Al_2O_3). Quando essa reação estabiliza não ocorrem maiores perdas de massa de alumínio. Em relação à maresia, gotículas de água com íons de sais dissolvidos, na proximidade com o mar, pode ocorrer corrosão por pit do alumínio e uma perda de massa maior do que em contato com o ar. Deve-se, então, evitar que o alumínio sofra corrosão pela maresia, bloqueando o contato do material com as gotículas de água do mar (Gentil; Carvalho, 2022).

2.7 LIGAS DE TITÂNIO

Titânio é o elemento químico de número atômico 22 da tabela periódica. Foi descoberto em 1791 a partir do mineral rutilo, óxido de titânio (TiO_2) por William Gregor. Por ter densidade de $4,5 \text{ g/cm}^3$ e apresentar alta resistência à corrosão tanto ao ar quanto à água salina, tornou-se boa alternativa quando se deseja materiais leves e resistentes à corrosão. A camada passivadora formada de óxido de titânio (TiO_2), pelo titânio em contato com o ar, é protetora (Barbosa, 2014; Gentil; Carvalho, 2022).

Segundo Zhang *et al.* (2015), a liga Ti-3Al-2.5V é comercialmente utilizada na fabricação de tubos devido à sua boa conformabilidade. Além de apresentar uma boa combinação de propriedades mecânicas, especialmente alta resistência, e, portanto, é utilizada em quadros de bicicletas. A liga Ti-6Al-4V tem o teor de alumínio limitado

ao máximo de 6% em peso devido ao seu efeito prejudicial na ductilidade (Barbosa, 2014).

Barbosa (2014) discorre acerca da estrutura cristalina e microestrutura do titânio: sua estrutura é hexagonal compacta (HC) até a temperatura de 882°C e cúbica de corpo centrado (CCC) em temperaturas mais elevadas, possuindo facilidade de formar maclas. Essa formação de maclas em vários planos cristalográficos se deve à ductilidade do titânio, além da capacidade de deslizamento de discordâncias em planos diferentes do plano basal.

Acerca dos elementos intersticiais, o carbono em até 0,3%, aumenta a resistência mecânica do titânio, mas diminui a tenacidade e ductilidade, tendendo também a formar carbonetos. O hidrogênio em solução pode ser precipitado, sob a forma de hidretos de titânio, reduzindo a ductilidade e tenacidade. Oxigênio e nitrogênio reduzem a tenacidade do titânio por formarem estruturas aciculares, além de restringirem a formação de maclas e a movimentação de discordâncias (Barbosa, 2014).

Os tratamentos térmicos de encruamento e recozimento são utilizados para confecção das ligas de titânio que podem ser endurecidas por solução sólida pela precipitação dos elementos alumínio, em até 7%, e estanho.

Segundo o Metals Handbook volume 2 (ASM International, 1990), o coeficiente de poisson da liga Ti-6Al-4V é de 0,33 e da liga Ti-3Al-2.5V é de 0,3, e as propriedades mecânicas de tensão limite de escoamento, módulo de elasticidade, tenacidade à fratura e densidade das ligas de titânio Ti-3Al-2.5V e Ti-6Al-4V estão expostas na Tabela 4. A caracterização destas ligas conforme sua composição química está presente na Tabela 5 e na Tabela 6.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas das ligas de titânio.

Material/Propriedade	Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tenacidade à Fratura (MPa. \sqrt{m})	Densidade (Kg/m ³)
Ti-3Al-2.5V	551,5	93	73	4480
Ti-6Al-4V	842	114	109	4430

Fonte: ASM International (1990).

Tabela 5 – Composição química da liga Ti-3Al-2.5V.

Componente	Peso
Alumínio (Al)	2,5 – 3,5%
Carbono (C)	Máx. 0,050%
Hidrogênio (H)	Máx. 0,015%
Ferro (Fe)	Máx. 0,20%
Nitrogênio (N)	Máx. 0,030%
Oxigênio (O)	Máx. 0,15%
Titânio (Ti)	92,755 – 95,5%
Vanádio (V)	2,0 – 3,0%

Fonte: Adaptado de ASM International (1990).

Tabela 6 – Composição química da liga Ti-6Al-4V.

Componente	Peso
Alumínio (Al)	5,5 – 6,75%
Carbono (C)	Máx. 0,080%
Hidrogênio (H)	Máx. 0,015%
Ferro (Fe)	Máx. 0,40%
Nitrogênio (N)	Máx. 0,030%
Oxigênio (O)	Máx. 0,20%
Titânio (Ti)	87,725 – 91%
Vanádio (V)	3,5 – 4,5%

Fonte: Adaptado de ASM International (1990).

Segundo informações disponibilizadas no endereço eletrônico da empresa Amazon, o preço da liga Ti-3Al-2.5V é de 749\$, e a liga Ti-6Al-4V tem preço de 1004\$.

2.8 CUSTOS DE MATERIAIS

Alumínio e titânio são matérias primas para a produção de quadros de bicicleta. Dentre os produtores desses metais se destaca a Austrália como a maior produtora do minério bauxita, matéria prima de produção do alumínio e a China como maior produtora da Ilmenita, matéria prima de produção do titânio, segundo dados dos Sumários Mineraiis de 2017 e 2018, levantados pela Agência Nacional de Mineração – ANM (ANM, 2019; Monteiro; Silva, 2021). A Figura 24 e a Figura 25 mostram os valores dessas produções.

Figura 24 – Tabela com os dados mundiais de reservas de bauxita em 2016 e da produção de bauxita em 2016 e 2017.

Discriminação Países	Reservas (10 ⁶ t)	Produção (10 ³ t)		
		2016 ^(r)	2017 ^(p)	%
Brasil	2.685	37.699	36.375	12,1%
Guiné	7.400	31.500	45.000	15,0%
Austrália	6.000	82.000	83.000	27,6%
Vietnam	3.700	1.200	2.000	0,7%
Jamaica	2.000	8.540	8.100	2,7%
Indonésia	1.000	1.400	3.600	1,2%
China	1.000	65.000	68.000	22,6%
Guiana	850	1.700	1.500	0,5%
Índia	590	23.900	27.000	9,0%
Outros países	4.110	24.890	26.330	8,8%

Fonte: Monteiro e Silva (2021).

Figura 25 – Tabela com os dados de reservas e produção mundial de ilmenita e rutilo em 2016.

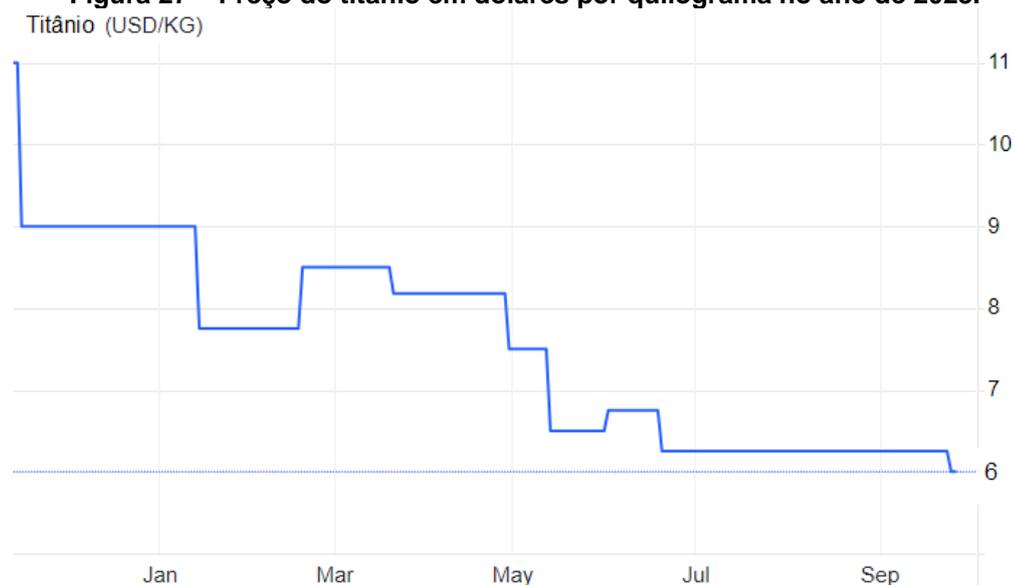
Discriminação Países	Reservas - 2016 ^(p)		Produção - 2016 ^(p)			
	Ilmenita (10 ³ t)	Rutilo (10 ³ t)	Ilmenita		Rutilo	
			(10 ³ t)	(%)	(10 ³ t)	(%)
Brasil	6.145 ^(p)	36 ^(p)	64	1,1	2,7	0,4
África do Sul	63.000	8.300	1.300	22,2	65	-
Austrália	150.000	27.000	720	12,3	350	-
Canadá	31.000	-	475	8,1	-	30,0
China	220.000	-	800	13,7	-	-
Estados Unidos da América	2.000	-	100	1,7	-	11,5
Índia	85.000	7.400	200	3,4	18	-
Quênia	54.000	13.000	280	4,8	80	13,5
Madagascar	40.000	Nd	140	2,4	5	-
Moçambique	14.000	-	490	8,4	-	-
Noruega	37.000	-	260	4,4	-	1,9
Rússia	Nd	-	40	0,7	-	13,1
Senegal	Nd	-	260	4,4	-	-
Ucrânia	5.900	2.500	350	6,0	90	3,8
Vietnã	1.600	-	300	5,1	-	-
Outros países	25.355	764	82	1,4	129	25,8

Fonte: ANM (2019).

Os custos relacionados aos materiais são fundamentais para a seleção. A Trading Economics, empresa de consultoria financeira da cidade de Nova York nos Estados Unidos, informa as cotações dos preços do alumínio em dólares por tonelada e do titânio em dólares por quilograma durante o ano de 2023, como mostram a Figura 26 e a Figura 27 a seguir.

Figura 26 – Preço do alumínio em dólares por tonelada no ano de 2023.

Fonte: Adaptado de Trading Economics (2023a).

Figura 27 – Preço do titânio em dólares por quilograma no ano de 2023.

Fonte: Adaptado de Trading Economics (2023b).

Houve uma diminuição no preço do titânio de aproximadamente 33% durante o ano de 2023. Em janeiro de 2023 o preço do titânio era de 9 (USD/Kg) e em setembro caiu para 6 (USD/Kg). Em relação ao alumínio, o preço em janeiro de 2023 atingiu a alta de 2657 dólares por tonelada (2,657 USD/Kg) e em setembro caiu para 2283 (2,283 USD/Kg), uma redução de aproximadamente 14% (Trading Economics, 2023a, 2023b).

2.9 MATRIZ DE SELEÇÃO

Uma ferramenta que desempenha um papel importante na análise e escolha de materiais para a fabricação de quadros de bicicleta, organizando e comparando as propriedades dos materiais, a matriz de seleção permite uma avaliação das opções disponíveis, fornecendo critérios numéricos para a seleção de materiais. Neste tópico, será explorada a construção e a utilização da matriz de seleção no contexto da seleção de materiais, destacando sua importância na tomada de decisões informadas. (Raman, 2006).

O método lógico digital utiliza a matriz de seleção inicialmente atribuindo um peso W para cada propriedade P do material comparando as propriedades analisadas. Na execução desse método o número de propriedades n é contabilizado e devem ser tomadas decisões $D = n(n-1)/2$ para avaliar as propriedades. As decisões são tomadas pela escolha do número 1 para a propriedade considerada mais importante dentre todas, para isso, pode-se levar em consideração a literatura, o trabalho de especialistas ou a votação dos operadores de determinada fábrica que trabalham com os materiais a serem analisados. A quantidade de vezes que aparecem valores de 1 é contabilizada para cada propriedade e em seguida dividida pelo número de decisões. O resultado demonstra o peso dessa propriedade com relação às demais, conforme Tabela 7 (Frag, 2020).

Tabela 7 – Matriz de decisão.

Propriedade/Decisão	D1	D2	D3	D4	D5	D6	Total	W
P1		1					1	0,167
P2			1				1	0,167
P3				1	1	1	3	0,5
P4	1						1	0,167

Fonte: Frag (2020).

Na matriz do exemplo anterior, a primeira coluna da esquerda é de propriedades e a primeira linha de decisões. Cada decisão escolheu uma propriedade como a mais importante e a que recebeu mais decisões obteve um peso maior. Para comparar os valores das propriedades do material tem-se um fator de escala β , o qual

compara a propriedade do material que está sendo analisado com o valor mais importante dessa mesma propriedade dentre os materiais que estão sendo analisados. Para propriedades em que o valor mais importante é o maior valor, como tensão limite de escoamento, módulo de elasticidade ou tenacidade à fratura, o fator de escala β é calculado segundo a Equação 35 (Farag, 2020).

$$\beta = \frac{(P * 100)}{P_{m\acute{a}x}} \quad (35)$$

Na equação anterior P é o valor da propriedade analisada e $P_{m\acute{a}x}$ é o maior valor da propriedade da lista. Para propriedades em que se deseja o menor valor, como custo ou densidade, o fator de escala β é calculado tomando-se o menor valor, dentre os valores listados, multiplicando tal valor por 100 e dividindo pelo valor da propriedade analisada, segundo a Equação 36:

$$\beta = \frac{(P_{m\acute{i}n} * 100)}{P} \quad (36)$$

Na equação anterior $P_{m\acute{i}n}$ é o menor valor da propriedade na lista. Em seguida elabora-se uma nova matriz cuja primeira coluna da esquerda é de materiais e as demais colunas são de propriedades que se deseja maximizar. Para cada material há um valor da propriedade correspondente, como apresenta a Tabela 8.

Tabela 8 – Matriz de propriedade.

Material/Propriedade	P1	P2	P3	P4
Material 1	200	40	300	50
Material 2	310	65	800	10
Material 3	500	15	400	5

Fonte: Farag (2020).

Nesse exemplo, tomando as propriedades como as que se deseja o maior valor, cada valor de cada propriedade é multiplicado por 100 e dividido pelo maior valor da mesma propriedade dentre aquelas listadas, conforme a matriz da Tabela 9.

Tabela 9 – Fator de escala.

Material/Fator de Escala	β_1	β_2	β_3	β_4
Material 1	40	61,5385	37,5	100
Material 2	62	100	100	20
Material 3	100	23,0769	50	10

Fonte: Farag (2020).

O fator de escala β deve ser multiplicado pelo peso das propriedades dos materiais e encontrado um valor denominado fator de importância y , segundo a equação:

$$y = W * \beta \quad (37)$$

Cada material deve ter somados os fatores de importância de cada uma das propriedades listadas. A soma dos fatores de importância possibilita o ranqueamento dos materiais candidatos, sendo os materiais com maior valor de soma preferíveis para a seleção, como demonstra a matriz da Tabela 10 (Farag, 2020).

Tabela 10 – Fator de importância.

Material/Fator de Importância	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	Soma	Rank
Material 1	6,68	10,277	18,75	16,7	52,407	2
Material 2	10,354	16,7	50	3,34	80,394	1
Material 3	16,7	3,8538	25	1,67	47,224	3

Fonte: Farag (2020).

Na matriz do exemplo anterior, a primeira coluna é de materiais, as quatro colunas seguintes são de fatores de importância, a sexta coluna apresenta a soma desses fatores para um mesmo material e a última coluna da direita demonstra o ranqueamento dos materiais, sendo o material com número 1 no rank preferível para a seleção segundo o método lógico digital (Farag, 2020).

Para a matriz de decisão de um material em um quadro de bicicleta, o estudo de Khan e Islam (2011) compara as ligas Al 7075-T6 e Ti-6Al-4V, baseando-se no

método lógico digital. Em sua matriz, os autores utilizam 42 decisões e sete propriedades do material, como apresenta a Tabela 11.

Tabela 11 – Peso das propriedades.

Propriedade do Material	Número de Decisões	W
Resistência à Tração	4	0,095
Tensão Limite de Escoamento	11	0.262
Módulo de Elasticidade	11	0.262
Tenacidade	7	0.167
Resistência à Fadiga	3	0.071
Densidade	4	0.095
Tenacidade à Fratura	2	0.048

Fonte: Khan e Islam (2011).

De acordo com a Tabela 11, a tensão limite de escoamento possui o mesmo peso que o módulo de elasticidade, um peso maior que a densidade e que a tenacidade à fratura. O estudo de Khan e Islam (2011) fornece uma base de dados para as decisões e o peso das propriedades referentes aos estudos para quadros de bicicleta que comparam ligas de alumínio e de titânio, porém o estudo não fornece decisões para a propriedade preço.

Outros estudos que utilizam o método lógico digital para selecionar materiais para quadro de bicicleta como o de Maleque e Dyuti (2010), que utiliza ligas de titânio, mas não ligas de alumínio, indica três decisões para tensão limite de escoamento, duas decisões para o módulo de elasticidade e uma decisão para a densidade. Yoon, Kim e Kim (2016) não utilizam ligas metálicas em seus estudos, mas apenas materiais compósitos de fibra de vidro e fibra de carbono. Atribuem três decisões para a densidade e quatro para o custo.

2.10 ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos utiliza equações diferenciais parciais para resolução de problemas. Para resolver tais equações, o método discretiza o volume do desenho de simulação em elementos geométricos. O método é utilizado para a simulação computacional, as malhas são o domínio das equações diferenciais e o conjunto dos nós. Tal conjunto, unido à geometria, determinará a precisão da resolução das equações matemáticas (Fish, 2009).

Pode-se utilizar o método de elementos finitos para uma análise estrutural, em que as forças que incidem sobre um determinado objeto são preenchidas, como 'input' para a resposta do material, ou seja o seu comportamento, quando submetido a essas forças. Tal comportamento não se dá de maneira exata, mas de maneira aproximada. Para isso devem ser considerados o maior número de fatores que influenciam a simulação e os mais importantes (Fernando, 2003).

A tensão equivalente de Von Mises pode ser considerada para calcular o fator de segurança do material. Segundo Hibbeler (2019) pela tensão máxima de de Von Mises em um dado componente do material, ou seja, a região em que o material sofre maior esforço, pode-se calcular o fator de segurança, com o objetivo de que a máxima tensão de Von Mises não deve ser maior que a tensão limite de escoamento do material. O fator de segurança é calculado segundo a Equação 38:

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Tensão limite de escoamento}}{\text{Tensão máxima de Von Misses}} \quad (38)$$

3 METODOLOGIA

Para elaborar o presente trabalho, foram realizadas atividades de revisão de literatura, buscando aprofundamento no processo de seleção de materiais, utilizando as propriedades tensão limite de escoamento, módulo de elasticidade, tenacidade à fratura, densidade e custo dos materiais: ligas de alumínio e ligas de titânio, comparando as ligas AA6061-T6, AA7005-T6, Ti-3Al-2.5V e Ti-6Al-4V, em sua viabilidade de utilização em um quadro de bicicleta. Para isso foram utilizadas referências bibliográficas, tais como: livros de Seleção de Materiais citados no presente trabalho, artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado.

Para a metodologia de seleção de materiais foram estabelecidas as funções, restrições e objetivos ligados a seleção do material para o quadro de bicicleta e foram abordados os critérios de seleção de índices de mérito e método lógico digital, a fim de avaliar objetivamente o material melhor candidato para a seleção.

Foi considerado o estudo de Khan e Islam (2011) como uma base comparativa, fornecendo alguns dados referentes as decisões e os pesos (W) para a matriz de seleção do método lógico digital, por ser um estudo que busca selecionar materiais para um quadro de bicicleta, utilizando ligas de alumínio e ligas de titânio.

Para aplicar o método dos elementos finitos são utilizados softwares de simulação computacional, dentre eles o COMSOL Multiphysics® possui diversas ferramentas de simulação divididas em módulos, como em seu banco de dados as equações diferenciais para a resolução dos problemas de simulação. É possível realizar análises a partir de modelagem por geometrias de desenho assistido por computador (CAD) 2D ou 3D a partir do próprio software ou exportado de outros softwares CAD. São realizadas análises mecânicas, térmicas ou químicas dentre outros módulos possíveis, em que as análises podem ser feitas uma por vez ou todas ao mesmo tempo (Santos, 2023).

Na interface do software podem ser aplicados modelos em branco, onde o usuário entra com todos os parâmetros de equações para as análises, propriedades do material, além de realizar o desenho do modelo ou o exportar. Podem ainda serem aplicados também modelos de estudo, como o estudo de fadiga ou o estudo de absorção de água já disponíveis nos módulos da plataforma e o usuário entra com os

dados que deseja analisar, a quantidade e o local das forças atuantes, o material e suas propriedades.

Foi utilizado o software COMSOL Multiphysics® para simular as condições de carregamento do peso do ciclista sobre o quadro de bicicleta, a fim de verificar as tensões de Von Mises que o material é submetido, os locais de maior tensão e se as ligas de alumínio e de titânio estudadas suportam tal carregamento, para isso se verificou o fator de segurança necessário de acordo com a tensão limite de escoamento do material. O carregamento foi aplicado na área do tubo selim e do tubo frontal (cabeçote), e a malha utilizada foi do tipo tetraédrica fina. O módulo utilizado foi o Solid Mechanics, modelo 3D.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram descritas as condições para a seleção dos materiais do quadro de bicicleta, tais como: função, restrições, objetivos. Para a função foi considerado um quadro de bicicleta como: tubos cilíndricos carregados por flexão e por compressão.

Dentre as restrições ligadas ao quadro de bicicleta foi considerada uma bicicleta de passeio em um ambiente urbano, o material deve trabalhar em regime elástico e não falhar mecanicamente.

Para uma situação em que o ciclista se encontra parado com a bicicleta, foi calculado o carregamento exercido no tubo selim pelo peso do ciclista, considerando a aplicação apenas sobre a área do tubo, considerando também que o tubo receberá integralmente todos os esforços e a força será aplicada totalmente na vertical. A área transversal do selim vazado pode ser calculada utilizando o raio como a diferença entre os raios externo e interno, ou seja, a espessura, conforme a fórmula a seguir:

$$\text{Área transversal selim} = \pi * \text{espessura}^2 \quad (39)$$

O valor de espessura considerado foi de 3 mm ou 0,003 m, o valor de $\pi = 3,14$ e o fator de segurança = 1,2, conforme as equações a seguir:

$$\sigma_y = \frac{\left(\frac{\text{Peso do ciclista}}{\text{Área transversal selim}} \right)}{1,2} \quad (40)$$

$$\sigma_y = \frac{\left(\frac{\text{Peso do ciclista}}{\pi * \text{espessura}^2} \right)}{1,2} \quad (41)$$

$$\sigma_y = \frac{\left(\frac{\text{Peso do ciclista}}{\pi * 0,003^2} \right)}{1,2} \quad (42)$$

$$\sigma_y = \frac{\left(\frac{\text{Peso do ciclista}}{\pi * 0,000009} \right)}{1,2} \quad (43)$$

$$\sigma_y = \frac{\left(\frac{\text{Peso do ciclista}}{0,00002826}\right)}{1,2} \quad (44)$$

A Tabela 12 traz as tensões referentes a diferentes pesos do ciclista, considerando a massa do ciclista em kg, começando por 70 kg na coluna da esquerda e 130 kg na coluna da direita. A aceleração da gravidade foi considerada em 10 m/s²:

Tabela 12 – Pesos do ciclista.

Peso (N)	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Tensão (MPa)	20,6417	23,5905	26,5393	29,4881	32,4369	35,3857	38,3345

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

As tensões servem para o cálculo da tensão equivalente de Von Mises, ao qual o material é submetido, que foi calculada por meio da simulação. Os objetivos da seleção de materiais são: quadro de bicicleta leve e rígido; quadro de bicicleta leve e resistente à flexão; quadro de bicicleta leve e tenaz à fratura e redução do preço.

Os materiais analisados têm os valores das propriedades como descritos no presente trabalho e cumprem tais condições de seleção. As propriedades dos materiais são descritas na Tabela 13, com base no Metals Handbook v. 2 (ASM International, 1990) e a coluna de preços foi preenchida com base nos preços citados na fundamentação teórica.

Tabela 13 – Propriedades mecânicas das ligas metálicas.

Material/Propriedade	Tensão Limite de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Tenacidade à Fratura (MPa√m)	Densidade (Kg/m ³)	Preço USD/Kg
AA 6061-T6	276	68	29,1	2730	369
AA 7005-T6	317	71	30,3	2780	692
Ti-3Al-2.5V	551,5	93	73	4480	749
Ti-6Al-4V	842	114	109	4430	1004

Fonte: Adaptado de ASM International (1990) e Site da Amazon.

A partir das propriedades, foram escolhidos dois critérios de seleção. O primeiro critério utiliza os índices de mérito e o segundo critério utiliza a matriz de seleção. No primeiro critério buscou-se selecionar os materiais a partir dos índices de mérito e dos

respectivos gráficos de propriedades. Para obter um quadro leve e rígido, resistente à flexão, tem-se:

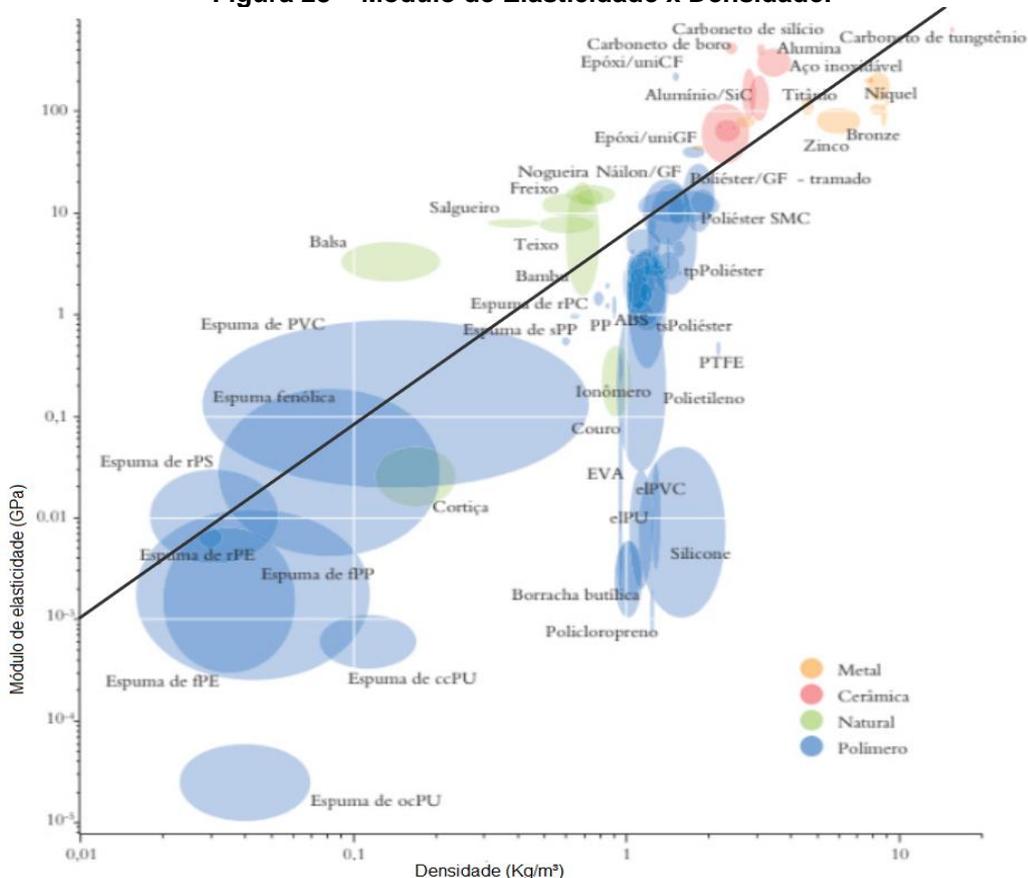
$$\frac{E^{1/2}}{\rho} = M \quad (45)$$

$$\log E^{1/2} - \log \rho = \log M \quad (46)$$

$$\left(\frac{1}{2}\right) \log E - \log \rho = \log M \quad (47)$$

Assim, foi traçada a reta de inclinação 2. Foi fixada a reta no valor do módulo de elasticidade = 10^{-3} para restringir o campo de busca dos materiais e ter um parâmetro de comparação entre as ligas de titânio e as ligas de alumínio. conforme a Figura 28.

Figura 28 – Módulo de Elasticidade x Densidade.



Fonte: Adaptado de Ashby (2010).

As ligas de titânio possuem maior módulo de elasticidade que as ligas de alumínio, porém são mais densas. Dessa forma estão sendo atravessadas pela reta enquanto as ligas de alumínio estão um pouco acima. Os materiais abaixo da reta não são preferíveis para a seleção, enquanto os materiais acima da reta são preferíveis por apresentarem uma melhor relação do módulo de elasticidade com a densidade, ou seja, as ligas de alumínio apresentam um maior valor de divisão do módulo de elasticidade pela densidade que as ligas de titânio.

Para selecionar os materiais com o objetivo de um quadro de bicicleta leve, resistente ao escoamento e à flexão, foram utilizadas as seguintes equações para determinar a inclinação da reta no gráfico:

$$\sigma_y^{2/3} \rho = M \quad (48)$$

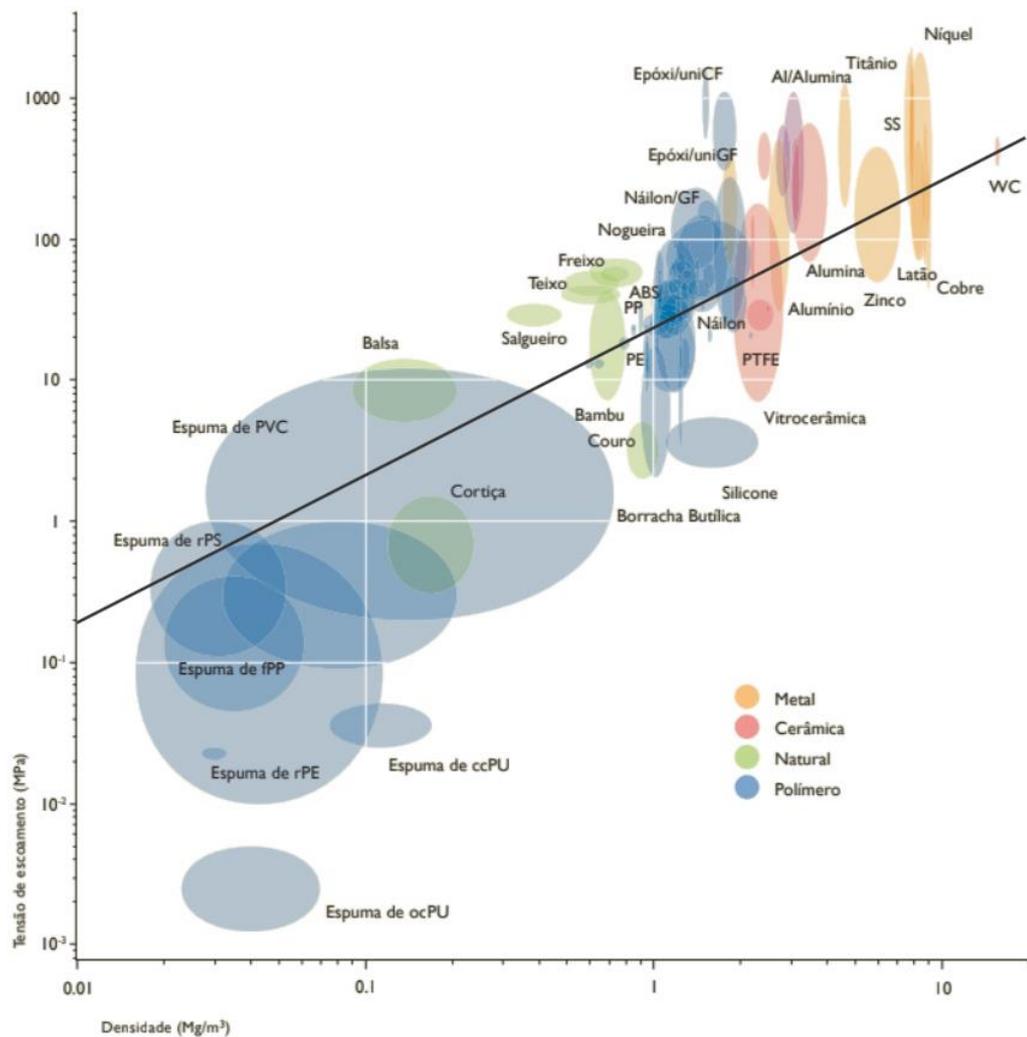
$$\frac{\log \sigma_y^{2/3}}{\rho} = \log M \quad (49)$$

$$\log \sigma_y^{2/3} - \log \rho = \log M \quad (50)$$

$$\frac{2}{3} \log \sigma_y - \log \rho = \log M \quad (51)$$

A reta de inclinação 1,5 foi traçada no gráfico da Figura 29.

Figura 29 – Tensão Limite de Escoamento x Densidade.



miro

Fonte: Adaptado de Ashby (2010).

A reta inclinada tem sua posição próxima de 0,2 MPa para restringir o campo de busca entre os materiais com índices de mérito próximos aos das ligas de alumínio e de titânio. As ligas de titânio estão mais acima da reta de inclinação 1,5 em relação às ligas de alumínio, sendo preferíveis para a seleção por esse critério.

Para se obter materiais para um quadro de bicicleta leve e tenaz à fratura, foram utilizadas as seguintes equações:

$$K_{IC}^{2/3} \rho = M \quad (52)$$

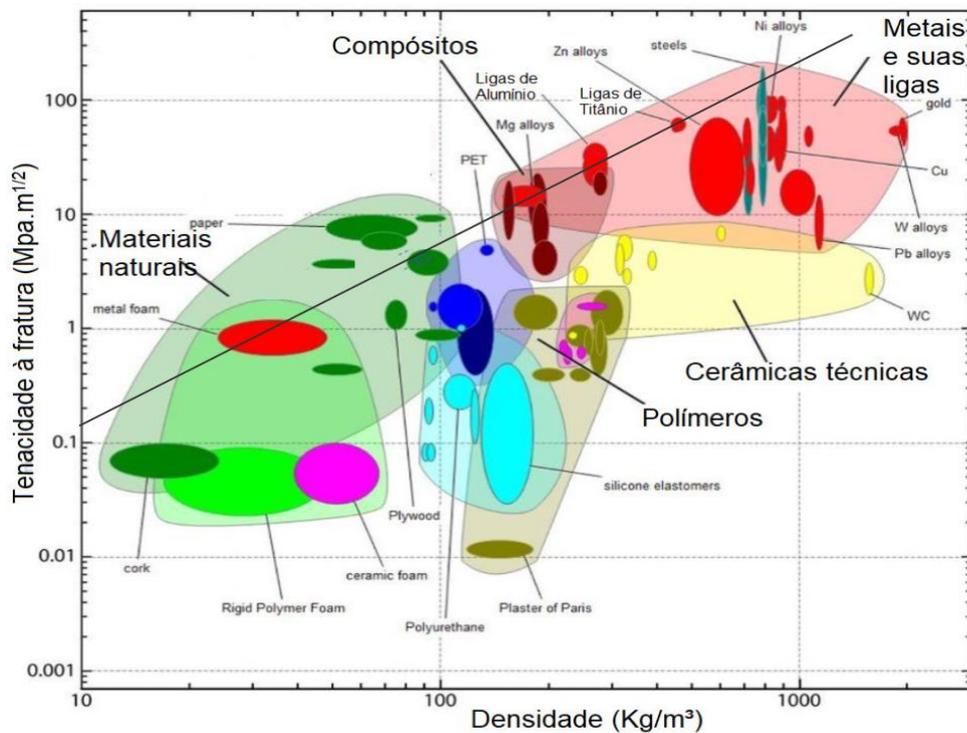
$$\frac{\log K_{IC}^{2/3}}{\rho} = \log M \quad (53)$$

$$\log K_{IC}^{2/3} - \log \rho = \log M \quad (54)$$

$$\frac{2}{3} \log K_{IC} - \log \rho = \log M \quad (55)$$

A reta de inclinação 1,5 foi traçada no gráfico da Figura 30.

Figura 30 – Tenacidade à fratura x Densidade.



Fonte: Adaptado de Hsieh (2020).

A reta de inclinação 1,5 passa pelas ligas de titânio, enquanto as ligas de alumínio estão em uma posição um pouco acima da reta, indicando que as ligas de alumínio são preferíveis para a seleção nesse critério.

Como segundo critério de seleção utilizou-se a matriz de seleção pelo método lógico digital, as decisões escolhidas foram baseadas no estudo de Khan e Islam (2011), que considerou o mesmo número de decisões para a tensão limite de escoamento e módulo de elasticidade e menos decisões para a tenacidade à fratura

e densidade. Como o preço não foi considerado no estudo citado, foi dada a essa propriedade apenas uma decisão, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Matriz de decisões.

Propriedade/Decisão	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	Total	W
Tensão Limite de Escoamento	1					1		1			3	0,3
Módulo de Elasticidade				1					1	1	3	0,3
Tenacidade à Fratura			1		1						2	0,2
Densidade							1				1	0,1
Preço		1									1	0,1

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

As propriedades tensão limite de escoamento e módulo de elasticidade obtiveram maior peso W de 0,3 com relação às demais, como tenacidade à fratura W de 0,2, densidade W de 0,1 e preço com W de 0,1. A partir da tabela anterior e as propriedades dos materiais descritas anteriormente foram calculados os fatores de escala β , conforme a Tabela 15.

Tabela 15 – Matriz fator de escala.

Material/Fator de Escala	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
AA 6061-T6	32,78	59,65	26,70	100,00	100,00
AA 7005-T6	37,65	62,28	27,80	98,20	53,32
Ti-3Al-2.5V	65,50	81,58	66,97	60,94	49,27
Ti-6Al-4V	100,00	100,00	100,00	61,63	36,75

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A partir dos fatores de escala, foram calculados os fatores de importância que posteriormente foram somados e os materiais ranqueados conforme o número da soma dos fatores de importância, de acordo com a Tabela 16.

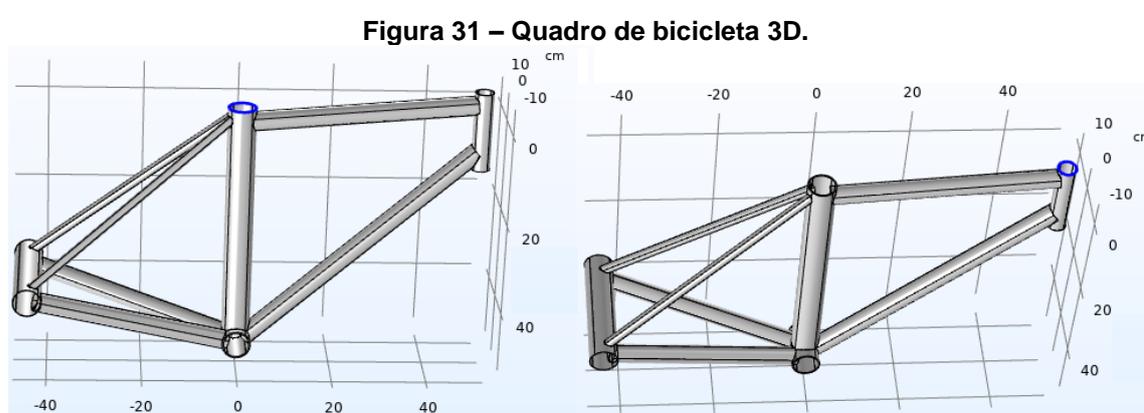
Tabela 16 – Matriz fator de importância.

Material/Fator de Importância	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	γ_5	Soma	Rank
AA 6061-T6	9,83	17,89	5,34	10,00	10,00	53,07	3,00
AA 7005-T6	11,29	18,68	5,56	9,82	5,33	50,69	4,00
Ti-3Al-2.5V	19,65	24,47	13,39	6,09	4,93	68,54	2,00
Ti-6Al-4V	30,00	30,00	20,00	6,16	3,68	89,84	1,00

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A liga Ti-6Al-4V apresentou o melhor ranqueamento em comparação aos demais materiais listados na tabela, sendo o melhor candidato para a seleção, seguido das ligas Ti-3Al-2.5V em segundo, AA 7005-T6 em terceiro e, por fim, a liga AA 6061-T6.

Foi desenhado um modelo de quadro de bicicleta no software COMSOL Multiphysics® para ser utilizado na simulação, como mostra a Figura 31. As propriedades dos materiais e as medidas utilizadas na simulação estão listadas na Tabela 17 e na Tabela 18.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Tabela 17 – Propriedades dos materiais utilizados na simulação.

Materiais	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade (Kg/m ³)	Coefficiente de Poisson	Tensão Limite de Escoamento (MPa)
AA6061-T6	68	2730	0,33	276
AA7005-T6	71	2780	0,32	317
Ti-3Al-2.5V	93	4480	0,3	551,5
Ti-6Al-4V	114	4430	0,33	842

Fonte: ASM International (1990).

Tabela 18 – Tabela de medidas geométricas utilizadas na simulação

Valores Simulação COMSOL	Espessura (cm)	Área Selim (m ²)
Tubo Selim	0,3	0,00002826
Tubo Frontal	0.2	0,00001256

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os círculos em azul indicam a área de aplicação do carregamento, foram utilizadas forças referentes a massas de 70 a 130Kg, a aceleração da gravidade de 10m/s² e dados das tabelas de propriedades dos materiais e tabelas de medidas

geométricas. Foi considerado 90% do peso do ciclista no carregamento do tubo selim e 10% no carregamento do tubo frontal, conforme Tabela 19.

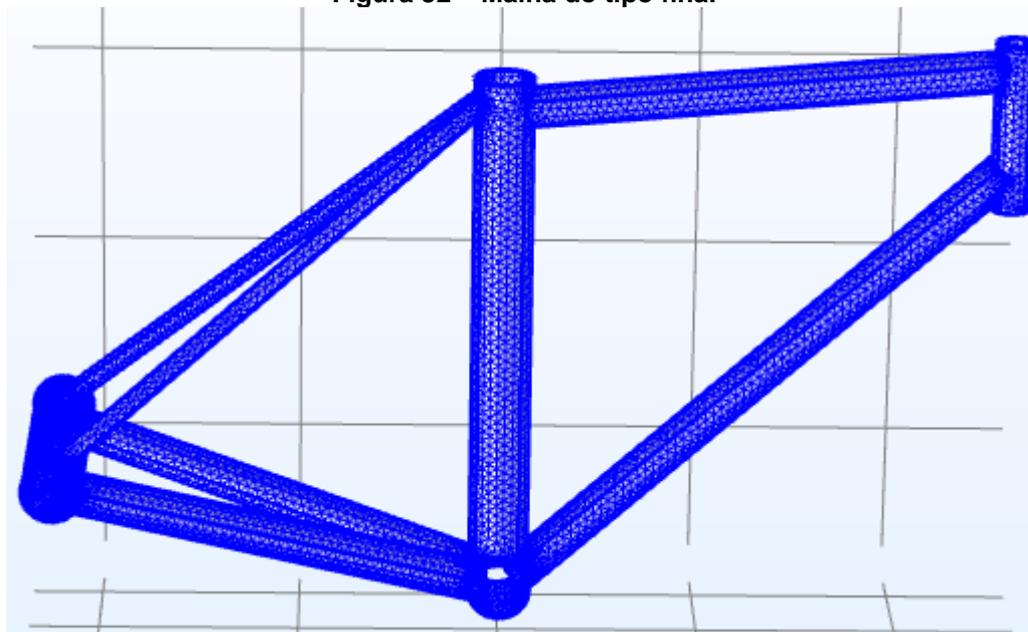
Tabela 19 – Divisão do carregamento.

Divisão do Carregamento	Carregamento Selim (MPa)	Carregamento Tubo Frontal (MPa)
Peso 1 = 700 (N)	22,29	5,57
Peso 2 = 800 (N)	25,47	6,37
Peso 3 = 900 (N)	28,66	7,16
Peso 4 = 100 (N)	31,84	7,96
Peso 5 = 1100 (N)	35,03	8,75
Peso 6 = 1200 (N)	38,21	9,55
Peso 7 = 1300 (N)	41,40	10,35

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os materiais utilizados foram as ligas de alumínio AA 6061-T6, AA 7005-T6, Ti-6Al-4V e Ti-3Al-2.5V. A Figura 32 apresenta a malha utilizada na simulação.

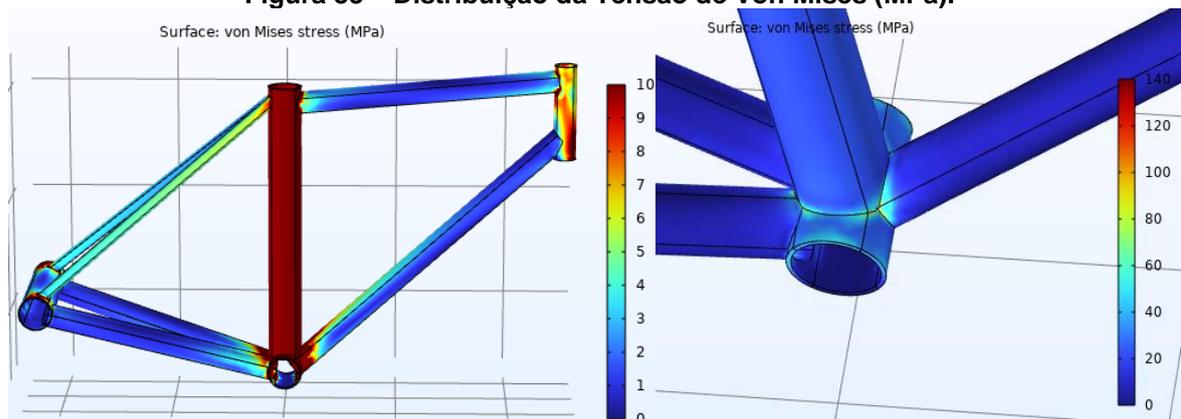
Figura 32 – Malha do tipo fina.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A primeira simulação foi feita com a liga AA 6061-T6 e foram consideradas escalas de até 10 MPa e de até 140 MPa para a tensão de Von Mises com o objetivo de demonstrar a distribuição dos esforços no quadro (Figura 33).

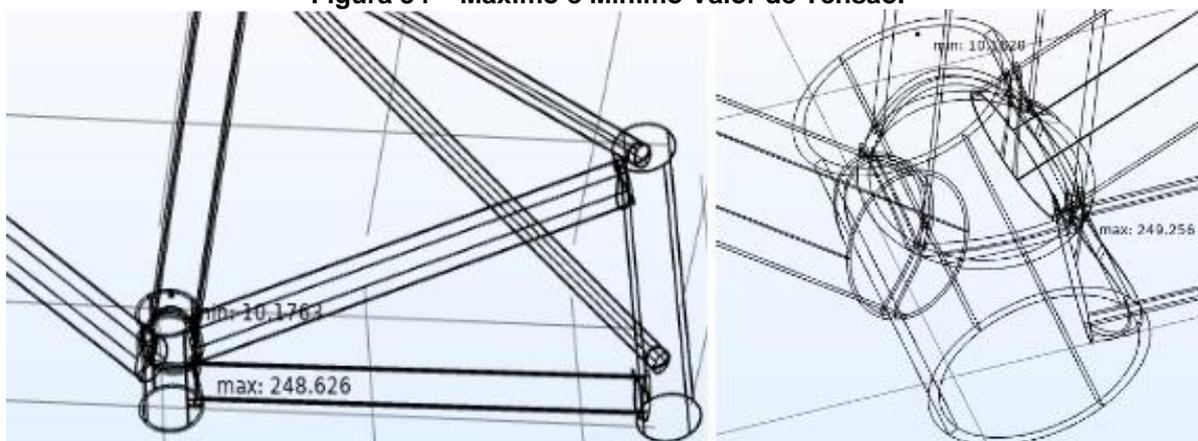
Figura 33 – Distribuição da Tensão de Von Mises (MPa).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A distribuição de esforços no quadro se repete para todos os pesos, o tubo abaixo do tubo selim recebe a maior quantidade de esforços e é onde se encontra o ponto da maior tensão, conforme a Figura 34.

Figura 34 – Máximo e Mínimo Valor de Tensão.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

O ponto de máxima tensão ocorre entre a conexão do tubo selim, o tubo abaixo do selim e o tubo de conexão com a parte traseira do quadro. O tempo de simulação foi de um minuto e seis segundos, utilizando a malha tetraédrica fina com 93581 elementos, uma memória física de 2,78 GB e memória virtual de 4,97 GB.

A Tabela 20 traz os valores máximos de Von Mises nas simulações de acordo com todos os pesos para a liga AA 6061-T6, bem como o fator de segurança calculado segundo Hibbeler (2019):

Tabela 20 – Tensões máximas de Von Mises – Simulação 1.

Liga AA 6061-T6	Tensão Máxima de Von Mises (MPa)	Fator de Segurança
Peso 1 = 700 (N)	145,39	1,90
Peso 2 = 800 (N)	166,74	1,66
Peso 3 = 900 (N)	186,82	1,48
Peso 4 = 1000 (N)	207,51	1,33
Peso 5 = 1100 (N)	228,26	1,21
Peso 6 = 1200 (N)	248,94	1,11
Peso 7 = 1300 (N)	269,7	1,02

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A partir da tensão Máxima de Von Mises, os valores próximos ao limite de escoamento do material indicam a possibilidade de falha mecânica (Chandrupatla e Belegundu, 2002). Após peso 5 os valores indicam a proximidade da falha mecânica por estarem próximos do valor de tensão limite de escoamento da liga AA 6061-T6

A segunda simulação foi feita com a liga AA 7005-T6, cujos valores da máxima tensão de Von Mises, de acordo com a força exercida, são mostrados na Tabela 21.

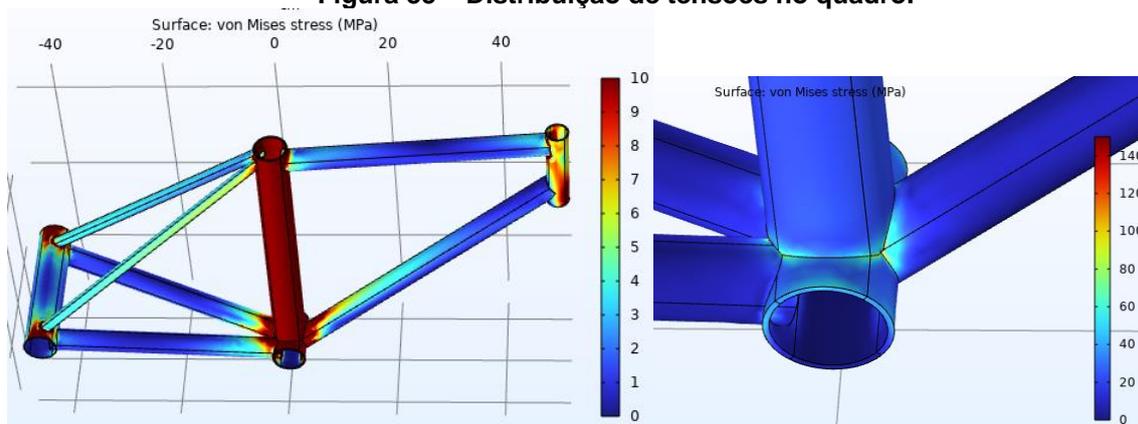
Tabela 21 – Tensões máximas de Von Mises – Simulação 2.

Liga AA 7005-T6	Tensão Máxima de Von Mises (MPa)	Fator de Segurança
Peso 1 = 700 (N)	145,52	2,18
Peso 2 = 800 (N)	166,3	1,91
Peso 3 = 900 (N)	187	1,70
Peso 4 = 1000 (N)	207,7	1,53
Peso 5 = 1100 (N)	228,47	1,39
Peso 6 = 1200 (N)	249,17	1,27
Peso 7 = 1300 (N)	269,94	1,17

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

As tensões máximas de Von Mises das ligas AA 6061-T6 e AA 7005-T6 foram muito semelhantes, como a liga AA 7005-T6 tem um módulo de elasticidade mais elevado, os fatores de segurança também são maiores. Os valores encontrados estão próximos do valor da tensão máxima de Von Mises de Pereira (2020) de 193,1 MPa, utilizando a liga AA 6061-T6 em uma simulação de força estática em um quadro de bicicleta.

A terceira simulação foi feita com a liga Ti-3Al-2.5V. A distribuição de tensões sob o quadro é mostrada na Figura 35.

Figura 35 – Distribuição de tensões no quadro.

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

O comportamento do quadro das ligas de titânio é muito semelhante aos da liga de alumínio, os maiores esforços se concentram no cilindro abaixo do tubo selim, em seguida no tubo selim e no tubo frontal. A Tabela 22 traz os valores máximos de Von Mises nas simulações de acordo com os pesos de 70 a 130 kg para a liga Ti-3Al-2.5V e os fatores de segurança correspondentes:

Tabela 22 – Tensões máximas de Von Mises – Simulação 3.

Liga Ti-3Al-2.5V	Tensão Máxima de Von Mises (MPa)	Fator de Segurança
Peso 1 = 700 (N)	146,03	3,78
Peso 2 = 800 (N)	166,83	3,31
Peso 3 = 900 (N)	187,58	2,94
Peso 4 = 1000 (N)	208,38	2,65
Peso 5 = 1100 (N)	229,13	2,41
Peso 6 = 1200 (N)	249,93	2,21
Peso 7 = 1300 (N)	270,68	2,04

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Com a tensão limite de escoamento para essa liga no valor de 551,5 MPa, o menor fator de segurança será de 2,04, de tal modo que a liga tem seu uso favorável em quadros de bicicleta, minimizando o risco de falha mecânica.

A quarta simulação foi feita com a liga Ti-6Al-4V. O comportamento do quadro submetido aos esforços foi semelhante ao da liga Ti-3Al-2.5V e a Tabela 23 com as máximas tensões de Von Mises é mostrada a seguir:

Tabela 23 – Tensões máximas de Von Mises – Simulação 4.

Liga Ti-6Al-4V	Tensão Máxima de Von Mises (MPa)	Fator de Segurança
Peso 1 = 700 (N)	146,03	5,77
Peso 2 = 800 (N)	166,38	5,06
Peso 3 = 900 (N)	187,06	4,50
Peso 4 = 1000 (N)	207,81	4,05
Peso 5 = 1100 (N)	228,5	3,68
Peso 6 = 1200 (N)	249,25	3,38
Peso 7 = 1300 (N)	269,94	3,12

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os valores da máxima tensão de Von Mises para a liga Ti-6Al-4V mudam um pouco com relação ao máximo valor encontrado por DINESH (2022) de 43,98 MPa considerando um peso de 588N em uma liga de titânio. A tensão de Von Mises máxima para o peso de 700 N é a que mais se aproxima, no valor de 145,63 MPa.

Como as máximas tensões de Von Mises não variaram muito com a mudança do material, a liga Ti-6Al-4V, dentre todas as ligas analisadas, foi a que obteve o melhor desempenho no que se refere ao fator de segurança, por ter o maior módulo de elasticidade, portanto é o material com menor chance de falha mecânica quando utilizado em um quadro de bicicleta nessas condições.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou abordar a seleção de materiais na escolha do material mais adequado a ser utilizado em um quadro de bicicleta, dentre as ligas metálicas AA 6061-T6, AA 7005-T6, Ti-3Al-2.5V e Ti-6Al-4V, tendo por base as metodologias de Ashby e Farag, aplicando-as de uma forma mais simplificada, bem como as normas relacionadas ao quadro de bicicleta e a simulação do comportamento do material quando submetido a esforços mecânicos e sua resposta aos esforços com a tensão de Von Mises. Os critérios de escolha do material mais adequado ao quadro tiveram por objetivo a não falha mecânica, com os fatores de segurança encontrados como uma margem de segurança para a utilização dos materiais no quadro, e a otimização do uso do quadro na prática do ciclismo, como quadros ao mesmo tempo mais leves e resistentes.

Foi proposta uma apresentação das propriedades das ligas metálicas mais comumente utilizadas em quadros de bicicleta para conhecimento mais aprofundado do material e utilização das propriedades no processo de seleção e nos testes de simulação, procurando fornecer as forças envolvidas no peso do ciclista sobre o quadro de bicicleta, o valor da área e o local de aplicação do carregamento, bem como especificar o material utilizado em cada simulação, a distribuição dos esforços, o tipo de malha utilizada e o comparativo de qual material obteve os melhores resultados, dentre os materiais analisados, para assim realizar a seleção de materiais segundo critérios numéricos.

Buscou-se também fornecer um conteúdo didático que pudesse apresentar a importância da seleção de materiais para o engenheiro de materiais, bem como incentivar a presença de tal disciplina na estrutura curricular de graduação, trazendo as metodologias mais consolidadas de seleção de materiais, seus principais autores e trabalhos nessa área, o conhecimento dos materiais, as normas envolvidas na utilização dos materiais de acordo com o projeto mecânico e testando os materiais envolvidos na seleção através de simulação computacional.

O critério de seleção do presente trabalho que utilizou os gráficos de Ashby foi adequado para filtrar os materiais selecionáveis através da linha de seleção, que são inclinadas de acordo com o índice de mérito analisado, de modo que são reduzidas as opções de escolha dos materiais, restando apenas os que se encontram acima da linha de seleção. Para o índice de mérito correspondente ao quadro de bicicleta leve

e rígido, as ligas de alumínio obtiveram melhor resultado, sendo preferíveis para a seleção. Para um quadro leve e resistente ao escoamento as ligas de titânio obtiveram melhor desempenho, sendo preferíveis para a seleção. Para um quadro leve e tenaz à fratura, as ligas de alumínio obtiveram os melhores índices de mérito, sendo preferíveis para a seleção.

A matriz de seleção foi utilizada conforme o método lógico digital para selecionar o material mais adequado para ser utilizado em um quadro de bicicleta, dentre as ligas metálicas AA 6061-T6, AA 7005-T6, Ti-3Al-2.5V e Ti-6Al-4V. Foram consideradas dez decisões e as propriedades do material: módulo de elasticidade, tensão limite de escoamento, tenacidade à fratura, densidade e preço. A liga de titânio Ti-6Al-4V obteve o melhor resultado, sendo portanto o material preferível para a seleção.

Utilizando-se a simulação computacional, foram calculadas as tensões de Von Mises sofridas pelo quadro de bicicleta, nos locais de carregamento do tubo selim e do tubo frontal em uma condição estática, bem como os fatores de segurança necessários para a utilização dos materiais no quadro. A liga de titânio Ti-6Al-4V obteve o mais alto fator de segurança, dentre as ligas metálicas analisadas, o que influencia no seu preço mais elevado.

Para trabalhos futuros, sugere-se utilizar a seleção de materiais com o objetivo de escolher um material capaz de resistir aos ensaios de fadiga vertical, presente na norma ISO 4210, realizar testes de simulação para selecionar um material adequado que atenda aos critérios da norma ABNT NBR 14714 e realizar testes laboratoriais do quadro de bicicleta que validem a simulação.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Norma NBR 6834:2000 - Alumínio e suas ligas – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ABNT. **Norma NBR 14714:2013 – Veículo de duas rodas – Bicicleta – Quadro e garfo rígido – Requisitos de segurança**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultrassom**. São Paulo: ABENDI, 2014. E-book.

ANM. **Sumário Mineral 2017**. Brasília: ANM, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 27 set. 2023.

ANSYS. **Chart: Yield Strength vs. Density**. Canonsburg: Ansys, 2021. Disponível em: <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2021/august/webpage-requests/education-resources-dam-upload-batch-1/y-strength-vs-density-chart-PSTSDNEN21.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2024.

ARAÚJO, J. F. **Nova metodologia baseada nos critérios de Von Mises e de fadiga para avaliação dos esforços eletromecânicos causados pela circulação de correntes de curto circuito nos enrolamentos de transformadores**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

ASHBY, M. F. **Materials and Sustainable Development**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2022.

ASHBY, M. F. Materials, bicycles, and design. **Metallurgical and Materials Transactions B**, [s./l.], v. 26, p. 1101-1108, 1995. Disponível em: <https://link.springer.com/journal/11663>. Acesso em: 26 fev. 2024.

ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. **Materiais e Design. Arte e Ciência na Seleção de Materiais no Design do Produto**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

ASHBY, M. F.; SHERCLIFF, H.; CEBON, D. **Materials: Engineering, Science, Processing and Design**. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook v. 2: Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. Ohio: ASM International, 1990.

BARBOSA, C. **Metais Não Ferrosos e Suas Ligas: Microestruturas, propriedades e suas aplicações**. Rio de Janeiro: E-papers, 2014.

BEUTEL, A. P. **Optimal mix design for epoxy resin polymer concrete**. 2015. Dissertation (Bachelor of Civil Engineering) - Faculty of Health, Engineering and Science, University of Southern Queensland, Queensland, 2015.

BRASIL. Ministério da Economia. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO. **Portaria nº 202, de 30 de abril de 2021**. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Componentes de Bicicletas de Uso Adulto - Consolidado. Brasília: INMETRO, 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002761.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2024.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. E-book.

CES EDUPACK. **CES EduPack 2011.2**. Versão 7.0.0. Cambridge: Granta Design Limited, 2011.

CHANDRUPATLA, T. R.; BELEGUNDU, A. D. **Introduction to Finite Elements in Engineering**. 3 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

CHENG, Y-C.; LEE, C-K.; Pornteparak, P. An improved design of an on-road bicycle frame under fatigue testing simulations. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, London, v. 43, n. 4, p. 319-327, 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02533839.2020.1719894>. Acesso em: 01 mar. 2024.

CICERO, S.; LACALLE, R.; CICERO, R.; FERNÁNDEZ, D.; MÉNDEZ, D. Analysis of the cracking causes in an aluminium alloy bike frame. **Engineering Failure Analysis**, [s./l.], v. 18, n. 1, p. 36-46, jan. 2011.

CRUZ, I. R. **Dimensionamento do sistema de frenagem para veículo fórmula SAE**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

DINESH, G. *et al.* **Design and Structural Analysis of a Bicycle Frame Under Static Loading Conditions**. 2022. Project (Bachelor of Technology in Mechanical Engineering) - Andhra University, Visakhapatnam, 2022.

DWYER, F.; SHAW, A.; TOMBARELLI, R. **Material and Design Optimization for an Aluminum Bike Frame**. 2012. Major Qualifying Project (Degree of Bachelor of Science) - Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, 2012.

FARAG, M. M. **Materials and Process Selection for Engineering Design**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020.

FERRANTE, M. **Seleção de Materiais**. 2. ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2002.

FISH, J. **Um primeiro curso em elementos finitos**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

GENTIL, V.; CARVALHO, L. J. **Corrosão**. 3. ed. Barueri: LTC, 1996.

GUPTA, R.; RAO, G. V. R. S. Analysis of Mountain Bike Frame By F.E.M. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, Haryana, v. 13, n. 2, p. 60-71, mar./abr. 2016. Disponível em: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue2/Version-2/L1302026071.pdf>. Acesso em: 16 set. 2023.

HENDRIKSEN, I. J. M.; ZUIDERVELD, B.; KEMPER, H. C. G.; BEZEMER, P. D. Effect of commuter cycling on physical performance of male and female employees. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, Indianápolis, v. 32, n. 2, p. 504-510, mar. 2000. Disponível em: https://journals.lww.com/acsm-msse/fulltext/2000/02000/effect_of_commuter_cycling_on_physical_performance.37.aspx. Acesso em: 17 jan. 2024.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 10. ed. London: Pearson, 2019.

HT2707 HORIZONTAL fatigue test ISO 4210 frame and fork test methods. [s. l.: s. n.], 2021. 1 vídeo (43 seg). Publicado pelo canal 弘達儀器股份有限公司弘達儀器股份有限公司. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=9aA72jliPQI>. Acesso em: 10 fev. 2024.

ISO 4210-6: **Cycles – Safety requirements for bicycles** – Part 6: Frame and fork test methods. Geneva, CH, ISO, 2015.

ISO 4210 frame testing. Direção: Full-size folding bike. Finland: [s. n.], 2019. 1 vídeo (47 seg). Publicado pelo canal Full-size folding bike. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=tMImGv2-AT8&ab_channel=Full-sizefoldingbike. Acesso em: 27 fev. 2024.

JONES, D. R. H.; ASHBY, M. F. **Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011.

KENASTON, B. Ruckus Composites Inspects Thousands of Bikes with One Ultrasonic Thickness Gauge. **Evident**, [s. l.], 23 jul. 2020. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/insight/ruckus-composites-inspects-thousands-of-bikes-with-one-ultrasonic-thickness-gage/>. Acesso em: 02 mar. 2024.

KHAN, M. H.; ISLAM, M. N. Comparative Study on the Material Selection Process for Rickshaw Frames by Weighted Property Method Using Modified Digital Logic and Analysis of Failure. **Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research**, [s. l.], v. 46, n. 4, p. 415-424, 2011. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2a0c6a284741f8c18a66bc468fdb18cc0f564fe4>. Acesso em: 19 jan. 2024.

MAIZLISH, N.; LINESCH, N. J.; WOODCOCK, J. Health and greenhouse gas mitigation benefits of ambitious expansion of cycling, walking, and transit in California. **Journal of Transport & Health**, [s. l.], v. 6, p. 490–500, 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214140516302419?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=866253a24f0564eb. Acesso em: 29 jan. 2024.

MALEQUE, M. A.; DYUTI, S. Materials selection of a bicycle frame using cost per unit property and digital logic methods. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, [s./l.], v. 5, n. 1, p. 95-100, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228889505>. Acesso em: 19 jan. 2024.

MALEQUE, M. A; SALIT, M. S. **Materials Selection and Design**. New York: Springer, 2014.

MENDKE, A.; SHARMA, S. Finite Element Analysis of All Terrain Bike. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, [s./l.], v. 43, n. 2, p. 69-78, jan. 2017. Disponível em: <http://ijettjournal.org/2017/volume-43/number-2/IJETT-V43P212.pdf>. Acesso em: 05 set. 2023.

MEYERS, M. A. **Mechanical Behavior of Materials**. 1. ed. Prentice Hall: NJ, 1999.

MIT. **Review vocabulary for mechanical properties of Materials**. Cambridge: MIT, 2003. Disponível em: <https://web.mit.edu/course/3/3.11/www/pset03/Rec11.pdf>. Acesso em 11 mar. 2024.

MONTEIRO, C. C.; SILVA, J. P. A. Alumínio. *In*: ANM. **Sumário Mineral Brasileiro 2018**. Brasília: ANM, 2021. p. 1-4. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2018>. Acesso em: 27 set. 2023.

MTB BRASÍLIA. **Como escolher corretamente um canote de selim para sua bicicleta**. Brasília: MTB Brasília, 2016. Disponível em: <https://www.mtbbrasil.com.br/2016/03/23/como-escolher-corretamente-um-canote-de-selim-para-sua-bicicleta/>. Acesso em: 21 fev. 2024.

PEREIRA, A. Y. **Comparação de ensaios mecânicos e simulações numéricas em quadros de bicicleta de alumínio**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2018.

R21 ROAD Bike Frame Test - Yoeleo Guarantees Your Safety. Direção: Yoeleo. Indonesia: [s. n.], 2021. 1 vídeo (1 min). Publicado pelo canal Yoeleo. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=SPpitw_m9vw&ab_channel=YOELEO. Acesso em: 18 fev. 2024.

RAMAN, A. **Materials selection and applications in mechanical engineering**. New York: Industrial Press Inc., 2006.

RONTESCU, C.; CICIC, D. T.; AMZA, C. G.; CHIVU, O. R. Choosing the optimum material for making a bicycle frame. **Metalurgija**, Zagreb, v. 54, n. 4, p. 679-682, abr. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/275521511>. Acesso em: 26 set. 2023.

SAMPAIO, M. V. C. **Aplicação da inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de pampo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) -

Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

SANTOS, A. E. **Estudo do fenômeno de espalhamento acústico por meio do Método de Elementos Finitos FEM**. 2023. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

SOLDA quadro de bicicleta (Alumínio) {Líquido Penetrante}. Direção: Arlindo Fernandes. [s./l.]: Arlindo Fernandes, 2018. 1 vídeo (6 min). Publicado pelo canal Arlindo Fernandes. Disponível em:
<https://www.youtube.com/watch?v=Dz1DJ6Dah24>. Acesso em: 25 fev. 2024.

SITE AMAZON. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/>. Acesso em: 01 mar. 2024.

SOUZA, J. A. **Caracterização dos defeitos em materiais compostos utilizando a técnica do ultrassom**. 2014. Trabalho Técnico (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2014. Disponível em:
<http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/182/2/TTEM017-14.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2024.

SOUZA, P. C. P. **Projeto adaptativo da estrutura metálica de uma bicicleta**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2023.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. São Paulo: Blucher, 1982.

STORE. Tamanho de quadro de bike: Como escolher o ideal? 2021. Disponível em:
https://superrask.xyz/product_details/8882670.html. Acesso em: 21 fev. 2024.

TALBOT, R. T. **Designing and building your own frameset: an illustrated guide for the amateur bicycle building**. 2. ed. USA: The Manet Guild, 1984.

TRADING ECONOMICS. **Aluminium**. [s./l.]: Trading Economics, 2023a. Disponível em: <https://tradingeconomics.com/commodity/aluminum>. Acesso em: 28 set. 2023.

TRADING ECONOMICS. **Titanium**. [s./l.]: Trading Economics, 2023b. Disponível em: <https://tradingeconomics.com/commodity/titanium>. Acesso em: 28 set. 2023.

YOON, W. S.; KIM, D. H.; KIM, H. S. Optimization of Lightened Fiber-Reinforced Composite City & Trekking Bicycle Frame. **Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers**, Daejeon, v. 40, n. 2, p. 147-156, 2016. Disponível em:
<https://koreascience.kr/article/JAKO201611639306784.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

ZHANG, H.; SHENG, Z. M.; ZHANG, W. F.; WANG, Y. H.; YAN, M. Q. Measurement and Evaluation of Crystallographic Texture in Ti-3Al-2.5V Tubing. **Journal of Materials Engineering and Performance**, [s./l.], v. 24, n. 6, p. 2312-2318, jun. 2015.