



DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)

DEVELOPMENT OF ALTERNATIVE FRAME FOR BICYCLE THROUGH FINITE ELEMENT ANALYSIS (FEA)

DESARROLLO DE CUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)

Argelio Lima Paniago¹, Vinicius Gabriel Nunes Araujo¹

e432891

<https://doi.org/10.47820/recima21.v4i3.2891>

PUBLICADO: 03/2023

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um quadro de bicicleta no qual se tivesse como principais parâmetros resistência mecânica, leveza e custo-benefício, tendo como abordagem para desenvolvimento, primordialmente, a metodologia de seleção de materiais conhecido como Método Ashby. Na sequência, fez-se a definição do design ergonômico para uso urbano, a modelagem utilizando-se das ferramentas Autodesk Inventor® e a utilização da metodologia de Análise de Elementos Finitos - MEF (*Finite Element Analyses* – FEA) com o “software” ANYS®. Estes caminhos foram escolhidos por tornarem a concepção do projeto moderna e com o detalhamento que não seria possível com a utilização de ferramentas tradicionais. Com o uso do método Ashby foi determinada a utilização do compósito de fibra de aramida em matriz epóxi para a construção do quadro, seguido da análise pelo método dos elementos finitos, onde obteve-se a confirmação da rigidez e baixa massa do quadro, seguindo parâmetros que melhorem a ergonomia do usuário.

PALAVRAS-CHAVE: Método Ashby. FEA. Fibra de Aramida. Design de Bicicletas. Quadro Bicicleta.

ABSTRACT

This work aimed to develop a bicycle frame in which the main parameters were mechanical strength, lightness and cost-benefit, having as approach for development, primarily, the methodology of selection of materials known as the Ashby Method. Subsequently, the definition of the ergonomic design for urban use, the modeling using Autodesk Inventor® tools and the use of the methodology of Finite Element Analysis - MEF (FEA) with the software ANYS®. These paths were chosen because they make the design of the project modern and with the detail that would not be possible with the use of traditional tools. With the use of the Ashby method, the use of the aramid fiber composite in epoxy matrix for the construction of the frame was determined, followed by the analysis by the finite element method, where the stiffness and low mass of the frame were confirmed, following parameters that improve the ergonomics of the user.

KEYWORDS: Ashby Method. FEA. Aramid Fiber. Bike Design. Bike Frame.

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar un cuadro de bicicleta en el que los parámetros principales fueran la resistencia mecánica, la ligereza y el costo-beneficio, teniendo como enfoque para el desarrollo, principalmente, la metodología de selección de materiales conocida como el Método Ashby. Posteriormente, la definición del diseño ergonómico para uso urbano, el modelado utilizando herramientas Autodesk Inventor® y el uso de la metodología de Análisis de Elementos Finitos - MEF (FEA) con el software ANYS®. Estos caminos fueron elegidos porque hacen que el diseño del proyecto sea moderno y con el detalle que no sería posible con el uso de herramientas tradicionales. Con el uso del método Ashby, se determinó el uso del compuesto de fibra de aramida en matriz epoxi para la

¹ IFSP - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

construcción del marco, seguido del análisis por el método de elementos finitos, donde se confirmó la rigidez y baja masa del marco, siguiendo parámetros que mejoran la ergonomía del usuario.

PALABRAS CLAVE: Método Ashby. FEA. fibra de aramida. Diseño de bicicleta. Cuadro de bicicleta.

INTRODUÇÃO

Os últimos setenta anos têm sido tempos com grandes transformações climáticas. Grande parte dessa transformação é causada pelo aumento da poluição atmosférica. Muito dessa poluição é produzida por motores à combustão interna que acionam veículos para transporte de pessoas.

Devido à sua grande extensão territorial e grande diversidade geológica, o Brasil tem grande destaque mundial em termos de posse de recursos naturais (CRUZ; RIBEIRO, 2009). Porém, os recursos naturais, tanto no Brasil como no mundo são finitos, como por exemplo o petróleo. Um dos fenômenos do século em curso é a substituição do petróleo ou a busca de fontes sustentáveis de energia (GALEMBECK; BARBOSA; SOUSA, 2009).

Como a propulsão de veículos tem responsabilidade importante na produção de poluentes e no consumo de recursos, a busca de meios alternativos se trata de uma estratégia a ser incentivada pelos governos e valorizada pelos consumidores. Fazendo a bicicleta assumir um papel protagonista (SILVEIRA, 2010). A título de exemplo, a prefeitura da cidade de São Paulo instaurou o Plano de Metas Municipal (2013-2016) que apresenta várias medidas voltadas à melhoria da mobilidade, dando prioridade aos meios de transporte público e estimulando o uso da bicicleta (FABIANO, 2016). Segundo dados da Companhia de Engenharia e Tráfego – CET foram construídos até agosto de 2016, 452 km de vias com tratamento ciclo viário permanente.

À vista disso, este trabalho propõe desenvolver o projeto de um quadro de uma bicicleta para uso urbano, no qual se tenha como principais parâmetros a resistência mecânica, leveza e custo-benefício.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

A abordagem para desenvolvimento deste trabalho se inicia com uma revisão acerca da evolução tecnológica da bicicleta, seguido de uma pesquisa de mercado, visando a definição geométrica, com base no conforto e ergonomia do usuário. Seguindo para a escolha do material, com a metodologia de seleção de materiais conhecido como Método Ashby. A continuidade se faz pelo projeto mecânico utilizando a metodologia de Análise de Elementos Finitos - MEF (*Finite Element Analyses – FEA*).

1.1 Bicicletas Como Meio De Transporte Alternativo

Desde a invenção das bicicletas modernas em 1900, por John Starley, com sua bicicleta Rover III, o número de adeptos ao ciclismo seja como prática esportiva, lazer ou meio de transporte aumentou exponencialmente, ganhando uma maior notoriedade na sociedade, com cada vez mais estudos e



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

fórum de discussão, como o fórum mundial da bicicleta, que visa ressaltar a importância de adotar bicicletas como meio de transporte, menos poluentes e mais eficiente ambientalmente e economicamente.

No Brasil diversas cidades, principalmente grandes capitais, estão se reordenando para a utilização da bicicleta como meio de transporte urbano, por ser um transporte mais ecológico, e que auxilia na redução de grandes engarrafamentos. Em São Paulo, foi instaurado, em 2013, o Plano de Metas Municipal (2013-2016), que apresenta várias medidas voltadas à melhoria da mobilidade, dando prioridade aos meios de transporte público e estimulando o uso da bicicleta (FABIANO, 2016). Segundo dados da Companhia de Engenharia e Tráfego – CET foram construídos até agosto de 2016, 452 km de vias com tratamento ciclo viário permanente.

1.2 Método Ashby

De acordo com Cruz (2018), na fase de projetos interessa ao engenheiro mecânico realizar a escolha dos materiais mais recomendados para as aplicações desejadas na concepção do projeto. Isto é, efetuar a seleção de materiais. Visto que o número de materiais disponíveis para os engenheiros é vasto, em torno de 160 mil, sendo necessária uma maneira sistemática de conduzir a escolha do material para sua dada aplicação, Segundo Ramos (2015), o método Ashby permite além de auxiliar na escolha do material, apontar materiais substitutos com atributos semelhantes ou iguais de acordo com seu índice de mérito.

Ashby (2005) classifica as famílias dos materiais de engenharia em: metais, polímeros, elastômeros, cerâmicas, vidros e híbridos. Os membros dessas famílias têm certas características em comum, propriedades similares, roteiros de processo similares e, muitas vezes, aplicações similares, podendo classificar estes materiais em suas propriedades físicas tais como: densidade, módulo de elasticidade, resistência, rugosidade, condutividade térmica e elétrica etc., sendo a combinação destas o que o engenheiro procura. Porém, comparando somente uma propriedade destes materiais, muitas vezes não é suficiente para atender às necessidades de um projeto. Para isto, Ashby (2005) propôs a criação de mapas de matérias e a criação de índices de mérito (IM), para ranquear os melhores materiais para a aplicação desejada.

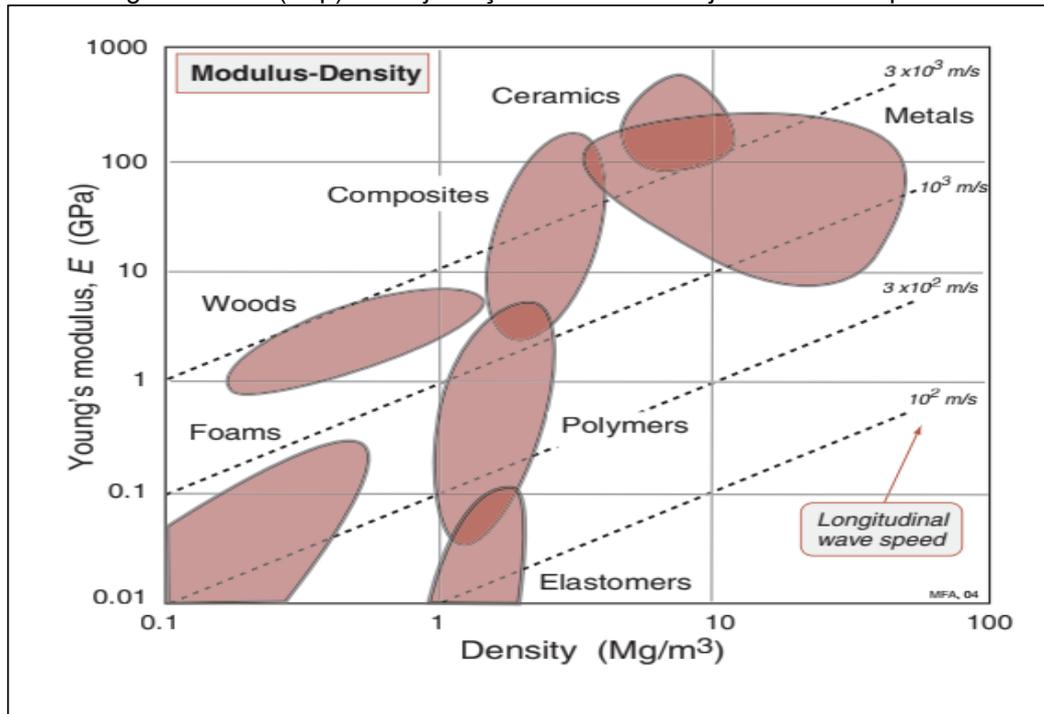
O índice de mérito é definido de acordo com o tipo de carregamento do projeto, a exemplo um projeto limitado por deformação elástica, deve-se comparar materiais em termo de deformação elástica traçando-se uma paralela à linha-guia adequada, passando, por exemplo, sobre o material para o qual deseja-se encontrar alternativas equivalentes ou melhores (Figura 1).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

Figura 1: A ideia de um gráfico de propriedades de materiais: o módulo de Young, E , é plotado em relação à densidade, em escalas logarítmicas. Cada classe de material ocupa uma parte característica do gráfico. As escalas logarítmicas permitem que a velocidade da onda elástica longitudinal $v = (E/\rho)^{1/2}$ seja traçada como um conjunto de linhas paralelas.



Fonte: Ashby (2005).

Como exemplo, uma barra de secção circular sendo tracionada, fazendo-se uso das expressões conhecidas e da expressão de massa obtém-se a equação 1 onde o módulo de elasticidade e a densidade determinam o índice de mérito na equação 2, assim, para cada limitação do projeto encontra-se um índice de mérito diferente.

$$m = \frac{F.L}{\delta} \times \left(\frac{\rho}{E}\right)$$

Equação 1

Onde:

m = massa [Kg];

F = Força de Tração [N];

L = Comprimento da barra [m];

δ = Deflexão [%];

ρ = densidade [Kg m-3];

E = Módulo de Elasticidade [Pa].



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

$$IM = \frac{E}{\rho}$$

Equação 2

Onde:

IM = Índice de Mérito.

De tal forma, concluindo com o pensamento de Lima (2017), a metodologia para seleção de materiais criada por Ashby busca relacionar as características, material, geometria e processo com funções matemáticas compreendidas na forma de índices de mérito, para avaliar o comportamento mecânico e suas funções, de acordo com a carga solicitada ou utilização do material, visando maximizar essas propriedades. Desta forma, o material com maior índice de mérito analisado, juntamente a outros fatores como o custo, irá representar a melhor escolha para o projeto.

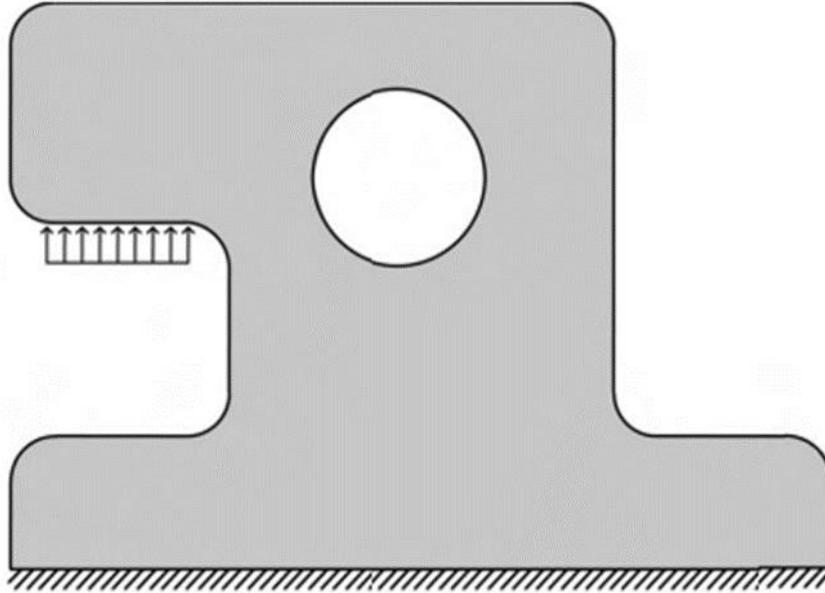
1.3 Método de Análise de Elementos Finitos (MEF)

O método de análise de elementos finitos (MEF) teve sua fundamentação teórica em 1909 por Walter Ritz, que possuía o objetivo de determinar resultados aproximados de deformações em sólidos, como explicado por Chiquesi e Pegoretti (2020).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico desenvolvido para a análise de estruturas e meios contínuos. É uma técnica usada para obter soluções aproximadas de equações diferenciais infinitas em equações diferenciais finitas.

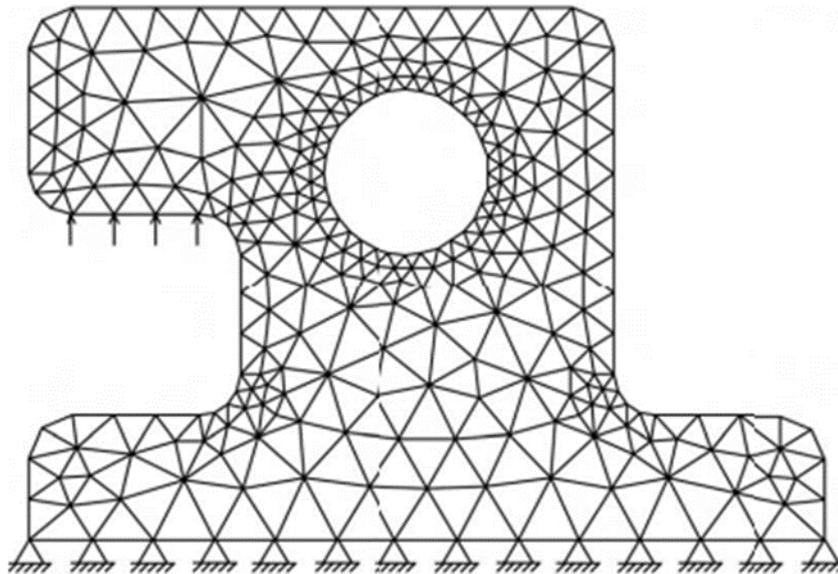
Porém, as ferramentas de cálculo não estavam disponíveis da época, o que só tornou possível realizar as primeiras análises nos anos 1950. Para realizar o estudo, o sólido é dividido em pequenas seções, ou como expresso por Martha (1955), “o modelo discreto é obtido pela subdivisão do domínio da estrutura em subdomínios, chamados de elementos finitos”, sendo que estes subdomínios são formados por formas geométricas simples usualmente triângulos ou quadriláteros, como demonstrado nas figuras 2 e 3.

Figura 2: Estrutura contínua bidimensional



Fonte: Martha (1955).

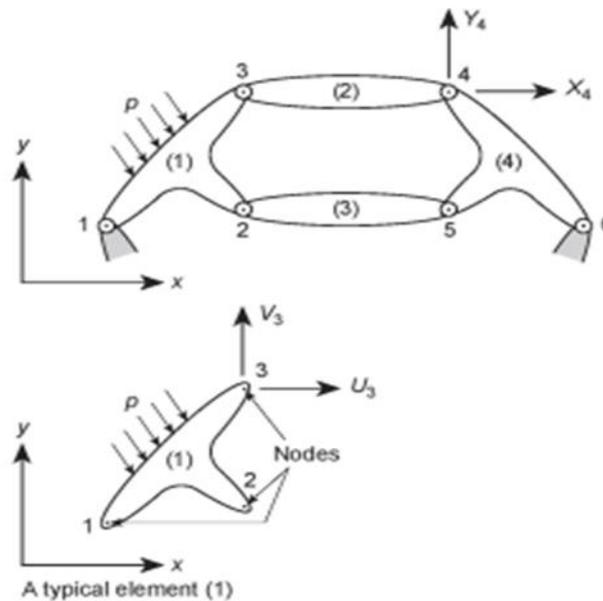
Figura 3: Subdomínios do método dos elementos finitos de uma estrutura contínua



Fonte: Martha (1955).

Na figura 4 cada ponto de união entre os subdomínios é chamado de nó, que juntos formam a rede de elementos finitos ou malha. De acordo com Zienkiewicz; Taylor (2000), a análise é feita através da fundamentação teórica que as uniões entre os nós não transmitem momento.

Figura 4: Uma estrutura típica construída a partir de elementos interligados



Fonte: Zienkiewicz *et al.* (2000).

Ao listar as forças sobre os nós numerados sobre o elemento 1 como uma matriz, obtém-se a equação 3. Para o deslocamento nodal tem-se a equação 4.

$$q^1 = \begin{Bmatrix} q_1^1 \\ q_2^1 \\ q_3^1 \end{Bmatrix} \quad q_1 = \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{Bmatrix} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

q_n = Força [N];

U e V = Componentes de coordenada.

$$a^1 = \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad a_1 = \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{Bmatrix} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

a_n = Deslocamento;

U e V = Componentes de coordenada.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

Assumindo o comportamento elástico linear do elemento, a relação característica sempre será da forma apresentada pela equação 5, sendo que os primeiros termos representam as forças induzidas pelo deslocamento dos nós.

$$q^1 = k^1 \times a^1 + f_p^1 + f_{\varepsilon 0}^1 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

f_p^1 = Forças nodais necessárias para equilibrar quaisquer cargas distribuídas agindo no elemento [N];

$f_{\varepsilon 0}^1$ = Forças nodais necessárias para equilibrar quaisquer deformações iniciais [N];

k^e = Matriz de rigidez do elemento.

Seguindo as ideias de Zienkiewicz *et al.*, (2000), uma análise preliminar permitirá uma definição das reações internas em qualquer ponto especificado do elemento, no quesito de deslocamento nodal. Definindo tais reações por uma matriz σ^1 uma relação da forma é obtida, como demonstrado na equação 6, onde dois termos fornecem as reações devidas as deformações iniciais, quando não ocorre deslocamento nodal.

$$\sigma^1 = Q^1 \times a^1 + \sigma_{\varepsilon 0}^1 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

Q^e = Matriz de tensão do elemento para um elemento.

As equações 5 e 6 foram apresentadas tendo como base um exemplo de um subdomínio com 3 nós com os pontos de interconexão capazes de transmitir somente dois componentes de força devido a sua forma bidimensional, no entanto, os argumentos e definições se aplicam a outros casos, de maneira geral (equação 7).

$$q^e = \begin{matrix} q_1^e \\ \vdots \\ q_n^e \end{matrix} \quad a^e = \begin{matrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{matrix} \quad \text{Equação 7}$$

Em que, q_n^e possuindo o mesmo número de componentes ou graus de liberdade, pois estas quantidades são conjugadas entre si. Ressalta-se também que as matrizes rigidez serão sempre quadradas como demonstrado na equação 8.

$$k^e = \begin{bmatrix} k_{ii}^e & \cdots & k_{im}^e \\ \vdots & & \vdots \\ k_{mi}^e & \cdots & k_{mm}^e \end{bmatrix} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

k_{ii}^e = Sub matrizes que são quadradas, tamanho 1×1 , onde 1 é o número de componentes de força a serem considerados em cada nó.

Para elementos mais complexos, procedimentos de análise mais sofisticados são necessários, mas os resultados serão da mesma forma. A matriz de rigidez completa, obtida para o elemento simples em tensão, acaba sendo simétrica que decorre do princípio da conservação de energia e de seu corolário, o conhecido teorema recíproco de Maxwell-Betti. As propriedades dos elementos são assumidas como lineares. Em princípio, relações semelhantes poderiam ser estabelecidas para materiais não lineares. Sendo assim definido por Moaven (1999) como uma simplificação da complexidade do mundo físico real, na qual o modelo permite uma gradação de sua qualidade, onde é possível representar melhor ou pior a realidade. O MEF se integra aos sistemas computacionais “*Computer Aided Engineering*” (CAE) e “*Computer Aided Desig*” (CAD), dentre outros, e, por meio de sistemas computacionais, soluciona e pode detalhar elementos complexos de análise estrutural.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o início do desenvolvimento do projeto, primeiramente foi definido o modelo base do quadro, seguido da definição da geometria inicial, com base em estudos sobre a ergonomia do usuário em bicicletas, após tal foi desenvolvido a geometria em 3D através do *Autodesk Inventor*® 2018. Na sequência, foi pré-definido o material a ser utilizado, por meio do método Ashby, e a análise por elementos finitos mediante o “*software*” ANSYS® 2021 R2 e seus módulos.

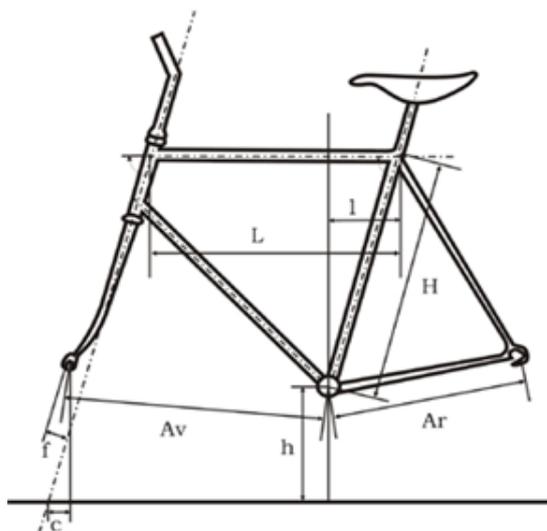
2.1 Definição da Geometria

Preliminarmente foi realizada uma pesquisa de mercado, em revistas relacionadas a utilização de bicicletas como meio de transporte alternativo, como a Revista Pedal, Revista Bicicleta, e Bike Magazine, Mobilidade – Estadão e Dias Bicicleta a fim de definir uma modelo base para o quadro, tendo como opções os tipos: BMX, Dobrável, Estrada, Mountain Bike, e Urbana. Sendo previamente definida a ideia de uma bicicleta com um parâmetro de custo x benefício, a bicicleta do tipo urbana é a melhor opção, em vista de seu porte, peso e usabilidade para o dia-dia como alternativa de transporte. Conforme Flor (2021), a bicicleta do tipo urbana é a escolha ideal para o usuário que decide utilizar a bicicleta como meio de transporte cotidiano.

Para dimensionar o quadro, foram utilizadas as variáveis obtidas pelos resultados dos estudos de Pequini *et al.*, (2010), Hinault; Genzling (1988), Ambrosini (1990), que definem que uma bicicleta caracteriza-se por dois conjuntos de medidas: as que determinam de forma definitiva a sua estrutura, quaisquer que sejam os acessórios montados no quadro, e as que podem variar, pela escolha do espigão do guidão e pelas regulagens do selim, em altura, recuo ou avanço (PEQUINI *et al.*, 2010), como demonstrado nas figuras 5 e 6. Ademais os autores afirmam que a altura do selim é apontada como o principal fator responsável pelo conforto, pois estando acima ou abaixo do recomendado

poderá com o tempo causar lesões. Considera-se que “as referências antropométricas, aqui recomendadas, sirvam como base para o desenvolvimento dos desenhos iniciais da geração de alternativas” (PEQUINI *et al.*, 2010).

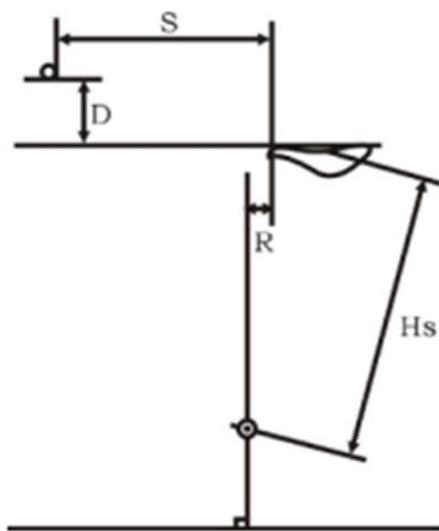
Figura 5: Medidas do quadro de uma bicicleta



H – Altura do quadro - entre eixos
 L – Comprimento do quadro – entre eixos
 h – Altura do eixo da transmissão central - em relação ao solo
 l – Recuo do tubo do selim
 Av – Medida da frente da bicicleta - tirada entre o eixo da transmissão central e o da roda da frente
 Ar – Medida da traseira - tirada entre o eixo da transmissão central e o da roda

Fonte: Mariño, Moraes e Pequini, (2010).

Figura 6: Medidas da posição do selim



Hs – altura do selim - distância que separa o eixo da transmissão central da parte central superior do selim
 R – Recuo do selim - distância que separa o bico do selim da vertical que passa pelo eixo da transmissão central
 S – Distância selim-guião - entre o bico do selim e a parte horizontal do guião onde aperta o espigão do guião
 D – Desnível selim-espigão do guião-correspondente à diferença das alturas do selim e do espigão do guião, no seu topo, acima do quadro.

Fonte: Mariño, Moraes e Pequini, (2010).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

Para definir a altura do quadro “H” (Figura 05), multiplica-se o coeficiente 0,65 pela altura das entrepernas do usuário. Este coeficiente pode ser aumentado até 0,66 para os modelos de bicicletas que não sejam necessárias posições aerodinâmicas do ciclista e precisem baixar ao máximo o seu espigão de guidão (PEQUINI *et al.*, 2010).

A altura do selim “Hs” (Figura 06), definida por Hinault *et al.*, (1988), é calculada pela multiplicação do coeficiente 0,885 pela altura das entrepernas. Essa altura representa o máximo possível e está de acordo com as noções do ciclismo atualmente, que conjuga a força com a facilidade de movimentos e corresponde sensivelmente à otimização ergonômica dos esforços, na maioria dos casos. Aos iniciantes aconselha-se a elevar o selim pouco a pouco, durante vários meses, a fim de que os tendões e os músculos se adaptem progressivamente. (PEQUINI *et al.*, 2010). A inclinação do tubo do selim, em geral utiliza-se 72°, e não deve ultrapassar 74°, onde se relaciona que com maior inclinação e ângulos menores, obtêm-se agilidade e comodidade para correr; e com menor inclinação e ângulos maiores, diminui-se a agilidade e aumenta-se a força.

O Comprimento do tubo horizontal “L”, segundo Ambrosini (1990) é obtido por meio da tabela 1 utilizando-se como parâmetro o valor da soma do comprimento do tronco com o braço do usuário.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
 Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

Tabela 1: Comprimento tubo horizontal "L"

Soma do comprimento do tronco com o braço (cm)	Comprimento "L" do tubo horizontal (cm)
100	53
101	53,4
102	53,8
103	54,1
104	54,4
105	54,7
106	55
107	55,3
108	55,6
109	55,9
110	56,2
111	56,5
112	56,8
113	57,1
114	57,4
115	57,7
116	58
117	58,3
118	58,6
119	58,8
120	59
121	59,2
122	59,4
123	59,6
124	59,8
125	60

Fonte: Adaptado de Ambrosini (1990).

Em relação a inclinação do tubo da direção, ainda seguindo pensamento de Ambrosini (1990), considera-se a mesma inclinação do tubo do selim. Aumentando a inclinação, haverá mais elasticidade, segurança de direção, estabilidade na postura etc., ainda que o rendimento mecânico seja menor. Diminuindo a inclinação, minimiza-se a estabilidade, se notam mais as vibrações, apesar de que se consegue maior rapidez de saída. A distância entre eixos influencia diretamente na estabilidade em altas velocidades, onde quanto maior a distância maior a estabilidade,

Segundo Mariño; Moraes; Pequini (2010), o *design* de bicicletas envolve análises ergonômicas e aerodinâmicas, que demonstram que o correto dimensionamento, assim como a postura do tronco, são características fundamentais para o conforto do usuário e a prevenção de doenças relacionadas ao ciclismo.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

2.2 Predefinição do Material

Segundo Ferrante (2002), no desenvolvimento de um componente mecânico, estabelecer as exigências a serem atendidas orienta uma primeira descrição funcional do projeto, para isto define-se critérios e requisitos do projeto (tabela 2), onde a primeira restrição é o de que o material não venha a falhar sob as cargas definidas e para um tamanho específico de quadro. Outro requisito é o de mínima massa, melhor custo-benefício, seguido das variáveis livres que são os materiais e as seções transversais do quadro. Conforme Ashby (2005), foram definidos os materiais que podem atender às necessidades do projeto, apresentados na tabela 3.

Tabela 2: Requisitos do projeto

Função:	Formar a estrutura da bicicleta
Restrições:	Não falhar sob o carregamento proposto Tamanho específico
Objetivo:	Minimizar massa Custo-benefício
Variáveis livres:	Material Formato da seção transversal

Fonte: Autor (2022).

Tabela 3: Materiais candidatos

MATERIAL	ρ Kg/m ³	σ_y (Mpa)
Fibra de aramida (matriz epóxi)	0,44	387
Cfrp (matriz epóxi)	1,76	410
Titânio 6-4 (grau 5)	4,55	950
Tritan tx1001	1,18	62
Alumínio (6061-t6)	2,7	250
Policetona (pk)	1,32	25
Aço (reynolds 531)	7,83	800
Aço asme a-36	7,85	525
Magnésio az 61	1,85	15

ρ : Densidade; σ_y : Resistência mecânica

Fonte: Autor (2022).

Para se calcular o índice de mérito, foi definida a equação 9, definida por Ferrante (2002), que descreve índices de mérito para minimização de peso em projetos regidos por deformação elástica, deformação plástica ou tenacidade, em várias situações de carregamento. Foi considerada situação de carregamento de barra tubular em flexão, considerando a equação para resistência a dobramento.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

$$IM = \frac{\sigma^2}{\rho}$$

Equação 9

Onde:

IM: Índice de mérito;

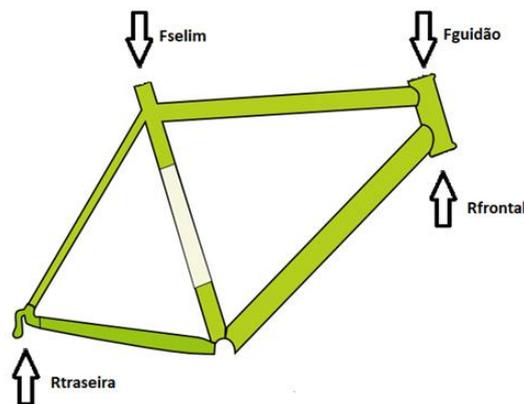
σ : Resistência mecânica [MPa];

ρ : Densidade [Kg/m³].

Como citado anteriormente, o valor do índice de mérito deve ser analisado juntamente a outros fatores, como os parâmetros deste trabalho são leveza e custo, estes foram analisados.

Para definir a possível massa para uma mesma secção do quadro, foram simuladas forças sobre o quadro, considerando o peso de um usuário de 100 kg (cem quilogramas), para a distribuição sobre o tubo do selim e do guidão, foram utilizadas as porcentagens de um estudo publicado por Milheiros *et al.*, (2015), no qual a distribuição de peso do ciclista sobre o quadro foi de aproximadamente 65% para o selim e 35% para o Guidão. Além disso, foram consideradas as reações em cada roda, como demonstrado na figura 7.

Figura 7: Forças sobre o quadro



Fselim: Força sobre o selim [N]; **Fguidão:** Força sobre o guidão [N]; **Rtraseira:** Reação causada pela roda traseira [N]; **Rfrontal:** Reação causada pela roda frontal [N].

Fonte: Autor (2022).

Posto isso, foi simulada uma mesma secção tubular com base no tubo do selim, e fazendo uso de expressões conhecidas como a equação da massa e de momento fletor máximo foi definida a equação da massa para tal secção (Equação 10).



$$m = \frac{(F_t + \sqrt{F_t^2 + 16 \times \pi \times t \times M_f \times \sigma}) \times L}{2} \times \frac{\rho}{\sigma}$$

Equação 10

Onde:

σ : Resistência mecânica [MPa];

M_f : Momento fletor [N.mm];

ρ : Densidade [Kg/m³];

L: Comprimento [m];

t: espessura [mm];

F_t : Força (flambagem sobre o tubo) [N].

2.3 Análise por elementos Finitos (MEF)

Primeiramente foi criado um projeto de análise estática estrutural, a seguir foram inseridos os dados do material do projeto, na aba dados de engenharia. Logo após, foi importada a geometria do quadro e corrigido qualquer erro não visível a outros “softwares”, através da função “repair” no módulo Spaceclaim® do Ansys®.

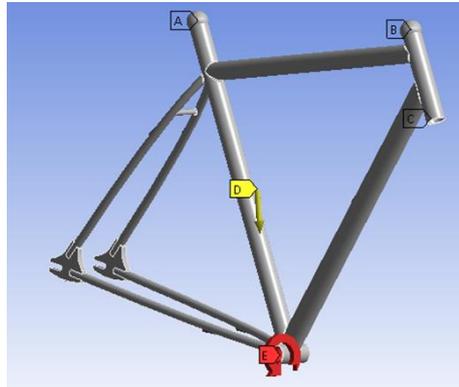
Tendo a geometria pronta para análise, foi utilizado o módulo Mechanical®, onde, inicialmente, foi gerada a malha sobre o elemento, utilizando a função “sizing” para obter um maior refinamento sobre ela. Foram definidos pontos de carregamento, em termos de massa do usuário sobre quadro, conforme mencionado na subseção anterior, 65% sobre o tubo de sustentação do selim e 35% sobre o tubo de suporte do guidão, representados na figura 5 pelos pontos “A” e “B” respectivamente. Conjuntamente, foi considerada a aplicação de um momento sobre o tubo do cubo da bicicleta, equivalente à força aplicada pelo usuário aos pedais, de 15300N.mm na direção esquerda ao observar o quadro pela parte frontal. Os pontos de apoio da roda traseira e do garfo foram considerados como suporte fixo.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

Figura 8: Forças aplicadas sobre o quadro



Fonte: Autor (2022)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando os conceitos citados anteriormente, foi realizada a definição geométrica e desenvolvido um modelo em 3D do quadro, em seguida, utilizando o método Ashby, foi definido o material a ser utilizado. Na sequência foi realizada a análise de elementos finitos sobre a geometria do quadro e material escolhido.

3.1 Definição Geométrica e Modelagem 3D

Utilizando as variáveis definidas através dos estudos de Pequini *et al.*, (2010), Hinault; Genzling (1988), e Ambrosini (1990), foram definidas as dimensões básicas do quadro, ao considerar um usuário típico, com dimensões corporais de 950mm para os entrepernas, 560mm para o tronco, e 550mm para o braço, obtendo a tabela 4, como resultados do pré-dimensionamento.

Tabela 4: Variáveis dimensionais do quadro

MEDIDAS DO QUADRO	
Altura do quadro "H"	627 mm
Altura do selim "Hs"	841 mm
Inclinação tubo selim	72°
Comp. tubo horizontal "L"	565 mm
Distância entre eixos	1020mm
Inclinação tubo de direção	72°

Fonte: Autor (2022).

Para a modelagem 3D do quadro, foi feito uso do “software” Autodesk Inventor®, utilizando dos valores dimensionais definidos na tabela 2, foi criado primeiramente um *sketch* base (Figura 9), e posteriormente para as medidas ausentes, se fez uso de medidas de quadros reais. Como espessuras

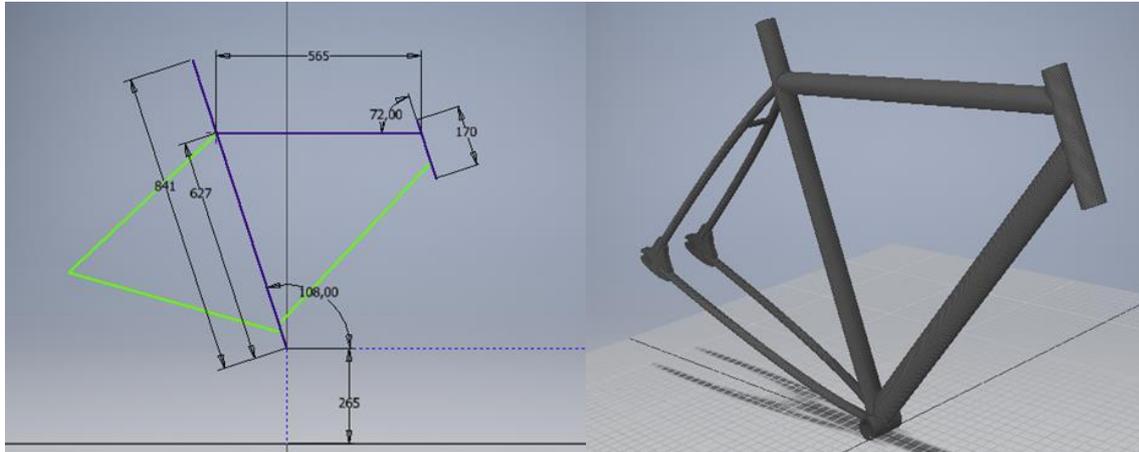


RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

e diâmetros tubos foram considerados os diâmetros de 29 a 36 mm, com espessura de 4 a 5 mm, usualmente utilizados para quadros de fibra de carbono.

Figura 9: Sketch Base e modelagem 3D do quadro



Fonte: Autor (2022).

3.2 Predefinição do Material

Por meio das equações 9 e 10 e do levantamento de custos e de propriedades dos materiais candidatos, estabeleceu-se a tabela 5.

Tabela 5: índice de mérito, massa estimada e custo dos materiais candidatos

MATERIAL	ρ Kg/m ³	σ_y (Mpa)	m (Kg)	IM	Custo (R\$/Kg)	Custo Total (R\$)
Fibra de Aramida (Matriz Epóxi)	2,62	387	2,0	13,5	149,54	299,08
CFRP (Matriz Epóxi)	2,92	410	2,3	11,5	187,43	431,10
Titânio 6-4 (Grau 5)	4,55	950	3,8	6,8	2.065,50	7.847
Tritan TX1001	1,18	62	5,0	6,7	180,00	900
Policetona (PK)	1,32	25	10,7	3,8	13,83	147,98
Aço (Reynolds 531)	7,83	800	7,1	3,6	-	-
Alumínio (6061-T6)	2,7	250	4,7	5,9	32,00	150
Magnésio AZ 61	1,85	15	22,2	2,1	240,00	5.328
Aço ASME A-36	7,85	525	9,0	2,9	12,90	16,1

Fonte: Autor (2022).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

Observa-se que o material com maior índice de mérito e menor massa foi o compósito de fibra de aramida em matriz de resina epóxi. Ao se comparar com outros, como exemplo a densidade entre a fibra de aramida em matriz de resina epóxi e o Tritan TX1001, nota-se que o Tritan possui uma densidade de aproximadamente vinte por cento menor, porém possui uma baixa resistência mecânica o que gera um baixo índice de mérito. Enquanto o titânio 6-4 grau 5 possui uma alta resistência mecânica, ele possui uma densidade maior que a fibra de aramida, assim gerando um índice de mérito menor. O aço ASME A-36 possui um custo menor de matéria prima, porém uma densidade muito maior, aproximadamente 3 vezes maior que a fibra de aramida. De tal forma, a fibra de aramida em matriz de resina epóxi, sendo um material que combina uma resistência mecânica intermediária e uma baixa densidade, fornece um alto índice de mérito e baixa massa, ideal para os objetivos do projeto.

Os compósitos simples são compostos por duas fases, a matriz que envolve a segunda fase, que é chamada de fase dispersa. No caso da fibra de aramida em resina epóxi, a fase matriz é a resina epóxi que possui boas características como resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência química, baixo encolhimento e estabilidade dimensional. A fase dispersa, composta pela fibra de aramida (p-fenileno tereftalamida), possui uma estrutura de poliamida aromática, possui baixa densidade, boa tenacidade e alta resistência a impacto, sendo encontrada em sua forma comercial como Kevlar® (KOEHLER; AMICO; SILVA, 2019).

Usando os dados obtidos pelos testes de Koehler *et al.*, (2019), definiu-se as informações relativas às propriedades físicas do material fabricado em uma infusão a vácuo de tecido de fibra de aramida em resina epóxi (Tabela 6).

Tabela 6: Propriedade físicas da fibra de aramida em resina epóxi

	Propriedade mecânica	Aramida/Epóxi
Tração	Resistência Mecânica [MPa]	387,68 ± 16,23
	Módulo de elasticidade [GPa]	15,56 ± 0,698
	Deformação na ruptura [MPa]	4,75 ± 0,09%
Compressão	Resistência a compressão [Mpa]	95,58 ± 9,10
Flexão	Resistência a flexão [Mpa]	199,58 ± 11,22
	Módulo em flexão [Mpa]	11,69 ± 1,047

Fonte: Adaptado de Koehler *et al.* (2019).

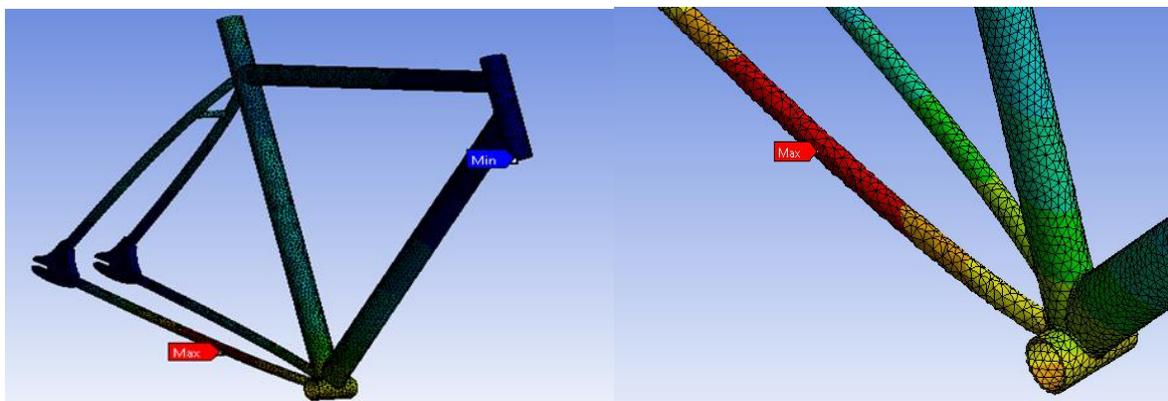
Para realizar o próximo passo do projeto, a análise de elementos finitos (MEF), foi feito uso do *software* Ansys®, para tal, primeiramente foi necessário inserir a fibra de aramida em resina epóxi como um novo material na biblioteca do *software*.

3.3 Análise por elementos Finitos

A análise pelo método dos elementos finitos (MEF), foi realizada com uso do *software* Ansys® e seus módulos, como descrito previamente. Incluiu-se o material selecionado, fibra de aramida e, em seguida, gerada a malha. Obtendo-se um tamanho de elemento de 6 mm.

A primeira análise de deformação, resultou em uma deformação máxima de 1,4844 mm sobre a barra de suporte inferior esquerda da roda traseira (observando-se pela parte frontal), e um deformação mínima de 0mm (Figura 10). Ao realizar o refinamento da malha sobre a geometria com maior deformação, a deformação máxima reduz para 1,2891 mm.

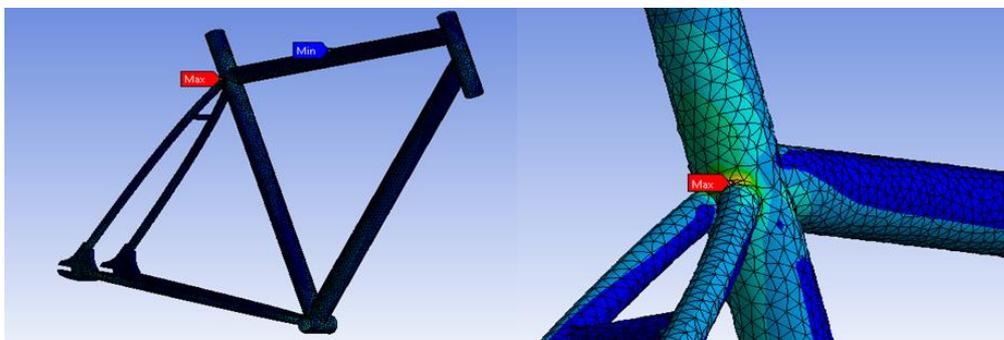
Figura 10: Deformação máxima e mínima do quadro as cargas aplicadas



Fonte: Autor (2022)

Analisando-se as tensões equivalentes, pelo critério de Von-Mises, obteve-se uma tensão máxima de 22,85 Mpa, uma tensão mínima de $5,2876 \cdot 10^{-3}$ Mpa, e uma tensão média sobre o quadro de 1,94 Mpa (Figura 11). Novamente, ao realizar um refinamento da malha sobre a parte com maior tensão, obteve-se uma nova tensão máxima de 32,02 Mpa.

Figura 11: Tensões máximas e mínimas sobre quadro as cargas aplicadas



Fonte: Autor (2022).



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

Ao utilizar a função de análise do fator de segurança, foi encontrado um fator máximo de 15, sendo que sobre todo o quadro, o fator alcançou um valor superior a 10, o que garantiria a integridade do quadro sobre os esforços submetidos inicialmente.

Assim, a minimização da massa, um dos objetivos do projeto, foi alcançada, em parte devido à baixa densidade do compósito de fibra de aramida em resina epóxi, aproximadamente $2,5 \times 10^{-3}$ kg/m³, resultando uma massa total do quadro, com um alto fator de segurança, de 2,6037 quilogramas. Ademais, em relação ao custo do quadro, ao se considerar somente o custo da matéria prima, desconsiderando fabricação e os equipamentos necessários para tal, tem-se o valor de 65 reais por quilograma para o tecido de fibra de aramida, e 84 reais para o quilograma da resina epóxi 2001 transparente e endurecedor 3154. Assim, com os resultados apresentados na tabela 7, considera-se que os resultados obtidos foram satisfatórios.

Tabela 7: Resumo de resultados da análise de elementos finitos

Deformação máxima	1,2891 mm
Tensão equivalente máxima	32,02 MPa
Tensão equivalente média	1,94 MPa
Peso final do quadro	2,6037 Kg
Custo matéria prima do quadro	R\$ 299,08

Fonte: Autor (2022).

4 CONSIDERAÇÕES

Considera-se que o objetivo deste foi alcançado. Foi obtido o projeto de um quadro de bicicleta alternativo, com minimização do peso, um maior custo-benefício e alta resistência mecânica. Por meio dos estudos previamente definidos, foi selecionado um material alternativo, de baixo custo, que possui resistência mecânica adequada ao ser aplicado na geometria definida por base no conforto e ergonomia do usuário. Gerou um alto fator de segurança, e um peso total do quadro conveniente ao propósito.

Houve alguma dificuldade para obtenção de propriedades mecânicas do material proposto. A utilização de uma licença estudantil do *software* ANSYS, limitou a quantidade de elementos para geração de malha, porém, os resultados finais não foram fortemente afetados pelo fato.

Como próximos passos, espera-se um suporte para se custeio da fabricação do quadro proposto, o que traria um adicional e considerável conhecimento aos futuros envolvidos.

REFERÊNCIAS

ASHBY, Michael F. **Material Selection in Mechanical Design**. 3. ed. Jordan Hill: Elsevier, 2005.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

BALLARIN, Adriano W.; NOGUEIRA, Marcelo. **Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de Pinus taeda por ultra-som**. Botucatu: UNESP, 2005.

BIKE MAGAZINE. Como escolher sua primeira bike. **Bike Magazine**, 1 fev. 2012. Disponível em: <https://www.bikemagazine.com.br/2012/02/primeira-bike/>. Acesso em: 23 ago. 2021.

CAMPOS, A. B. D. G. **Concepção de uma Base Articulada para Simulador Passivo de Bicicletas**. 2018. Projeto (Graduação em Engenharia Mecânica) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2018.

CEZAR, Therbio Felipe M. Urbanas – A cidade agradece! **REVISTA BICICLETA**, 04 set. 2021. Disponível em: <https://revistabicicleta.com/mobilidade/urbanas-a-cidade-agradece-2/>. Acesso em: 23 ago. 2021.

CRUZ, J. L. A. Seleção de materiais e processos em um protótipo de eficiência energética pelo método ashby: estudo de caso de uma biela do motor. 2018. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

DAVIS, R.; HULL, Maury L. Design of Aluminum Bicycle Frames. **Journal of Mechanical Design**, 1981.

DINÂMICA BICICLETAS. **A Origem da Dinâmica Bicicletas**. São Paulo: Dinâmica bicicletas, s. d. Disponível em: <https://dinamicabicicletas.com.br/blog/a-origem-da-dinamica-bicicletas/>. Acesso em: 23 jun. 2021.

FABIANO, Maria Lucia Alves. A mobilidade urbana e o papel da bicicleta como indutor de inclusão social e de transformação da cidade. *In: 4 Coloquio Brasil - Portugal*. 7 a 10 de novembro 2016.

FERRANTE, Maurizio. **Seleção de materiais**. 3. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2021.

GALEMBECK, F.; BARBOSA, C. A. S.; SOUSA, R. A. Aproveitamento sustentável de biomassa e de recursos naturais na inovação química. **Quim. Nova**, v. 32, n. 3, p. 571-581, 2009.

KOEHLER, Bruna O.; AMICO, Andro Campos; SILVA, A. A. X. Propriedades mecânicas de compósitos aramida/epóxi e aramida/poliéster produzidos por infusão á vácuo. *In: 15º Congresso Brasileiro de Polímeros*, Bento Gonçalves, 2019.

LIMA, G. R. D. **Avaliação de um método de seleção de materiais**: quadro de bicicleta. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LONGUINHO, Bruno Moreira. Estudo das propriedades mecânicas do bambu. 2006. TCC (Graduação) - Departamento de Engenharia Civil UFSC, São Carlos, 2006.

MALEQUE, M. A.; DYUTI, Sarker. Materials for Bicycle Frame System – A Case Study on the Development of Selection Method. *In: Conference: The third international conference on structure, processing and properties of materials SPPM2010At: Dhaka, Bangladesh*, Bangladesh, 2010.

MARQUES, Jessica. Como escolher a bicicleta certa para pedalar todos os dias. **MOBILIDADE-ESTADÃO**, 25 nov. 2019. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/como-escolher-a-bicicleta-certa-para-pedalar-todos-os-dias/>. Acesso em: 23 ago. 2021.

MILHEIRO, V. *et al.* **Análise biomecânica da posição do ciclista na bicicleta**. Buenos Aires: EFDeportes, 2015.

NOSSA, T. D. S. **Estudo Comparativo das Tensões nas Interfaces de Compósitos de Resina Epoxi Reforçados com Fibras de Carbono, Aramida e Vidro**. 2011. TCC (Pós-Graduação em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal De São Carlos Campus Sorocaba, Sorocaba, 2011.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

DESENVOLVIMENTO DE QUADRO ALTERNATIVO PARA BICICLETA POR MEIO DA ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)
Argelio Lima Paniago, Vinicius Gabriel Nunes Araujo

PEQUINI, Suzi Marinõ. **A evolução tecnológica da bicicleta e suas implicações ergonômicas para a máquina humana**: problemas na coluna vertebral X bicicletas dos tipos "Speed" e "Mountain Bike". 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PEQUINI, Suzi; MORAES, Anamaria; PEQUINI, Paolo. Bicicletas para uso personalizado: recomendações antropométricas. *In: 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design*, São Paulo, 2015.

RAMOS, Felipe Mesquita. **Estudo de Caso envolvendo a Ferramenta ECO Design na Metodologia de Seleção de Materiais**. 2015. Projeto (Iniciação Didático-Científica) - CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI, São Bernardo do Campo, 2015.

RONTESCU, C. *et al.* **Choosing the optimum material for making a bicycle frame**. Bucharest: Metalurgija -Sisak then Zagreb, 2015.

SILVEIRA, M. O. D. **Mobilidade sustentável**: a bicicleta como um meio de transporte integrado. 2010. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia de Transportes - COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

TOMAS, Samuel. O guia definitivo sobre como escolher bicicleta! **Dias Bicicleta**, 4 dez. 2020. Disponível em: <https://blog.diasbike.com.br/tipos-bicicleta/guia-definitivo-sobre-como-escolher-bicicleta/>. Acesso em: 23 ago. 2021.