



**NOVA**  
NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE  
MECÂNICA E INDUSTRIAL

AFONSO PAULO FARINHA ALVES  
Licenciado em Engenharia Mecânica

# CONCEÇÃO DE UM QUADRO DE BICICLETA EM MADEIRA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa  
dezembro, 2022





# CONCEÇÃO DE UM QUADRO DE BICICLETA EM MADEIRA

**AFONSO PAULO FARINHA ALVES**

Licenciado em Engenharia Mecânica

Orientador: **Alberto José Antunes Marques Martinho,**  
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:  
Presidente: **João Manuel Vicente Fradinho**  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA  
Arguentes: **Valdemar Rebelo Duarte,**  
Professor Auxiliar Convidado, FCT-NOVA  
Orientador: **Alberto José Antunes Marques Martinho**  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa  
dezembro, 2022



## **Conceção de um quadro de bicicleta em madeira**

Copyright © Afonso Paulo Farinha Alves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comer-

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVAthesis Word [11].



Dedicado aos meus pais.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Alberto José Antunes Marques Martinho, pelo apoio e confiança por ter aceitado este tema de dissertação;

Aos meus pais, pelo apoio na escrita da dissertação e por me terem permitido prosseguir o curso à minha escolha;

Ao Pedro, Eustácio, Paulo e João, pela motivação e apoio;

À Carolina, pelo apoio emocional;



“Escolhe um trabalho de que gostes e não terás que trabalhar nem um dia na tua vida.” (Confúcio).



## RESUMO

Atualmente, o uso da madeira é visto como uma alternativa sustentável a outros materiais, tais como plástico e metal. As estruturas em madeira, quando bem concebidas e fabricadas, conseguem aguentar tremendos esforços. As madeiras duras são perçecionadas como materiais nobres, de alto valor. Logo, juntar o valor intrínseco da madeira dura, do trabalho manual de carpintaria e das bicicletas de alta performance, é possível criar um produto desejável. Este estudo avalia o uso e desempenho estrutural da madeira usado num quadro de bicicleta de estrada. Para tal, será desenvolvida a conceção do quadro, de modo a criar um produto estético, serão realizadas simulações estruturais pelo método de elementos finitos e, por fim, será demonstrada a construção do quadro. Este quadro terá de satisfazer certos requisitos, tais como: o seu peso final terá de ser comparável a um quadro similar de alumínio; deverá suportar um ciclista de 100 kg. Com esta dissertação é possível concluir que o modelo criado consegue suportar os esforços a que estará sujeito, mas tal deve ser confirmado com a construção do mesmo e a aplicação da Norma ISO 4210-2:2015.

**Palavas chave:** bicicleta, madeira, CNC.



## ABSTRACT

Currently, the use of wood is seen as a sustainable alternative to other materials such as plastic and metal. Wooden structures, when well designed and manufactured, can withstand tremendous efforts. Hardwoods are perceived as noble, high-value materials. Therefore, combining the intrinsic value of hard wood, manual carpentry work and high-performance bicycles, it is possible to create a desirable product. This study evaluates the use and structural performance of wood used in a road bike frame. For this, the design of the frame will be developed, (to create an aesthetic product) the forces will be simulated using a structural simulation by the finite elements method and, finally, the construction of the frame will be demonstrated. This frame must satisfy certain requirements, such as: its final weight must be comparable to a similar aluminium frame; must support a 100 kg rider. With this dissertation it is possible to conclude that the created model can withstand the efforts to which it will be subjected, but this must be confirmed with its construction and the application of the ISO 4210-2:2015 Standard.

**Keywords:** Bicycle, wood, CNC.



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Objetivos e Motivação.....	1
1.1.1	Crescimento do uso da bicicleta .....	1
1.1.2	Crescimento da compra de produtos com origens renováveis.....	2
1.2	Estrutura da Dissertação .....	3
1.3	Metodologia.....	4
<b>2</b>	<b>ENQUADRAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
2.1	História da Bicicleta .....	5
2.1.1	Importância do quadro da bicicleta.....	7
2.2	Materiais usados na construção do quadro.....	7
2.2.1	Aço.....	8
2.2.2	Alumínio.....	8
2.2.3	Titânio .....	9
2.2.4	Fibra de Carbono.....	9
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>11</b>
3.1	Escolha da madeira para construção do quadro.....	11
3.2	Quadros em madeira .....	14
3.3	Tipos de madeira.....	15
<b>4</b>	<b>GEOMETRIA DO QUADRO</b> .....	<b>17</b>
4.1	Diferentes formatos do quadro .....	17

4.1.1	Bicicleta de montanha .....	18
4.1.2	Bicicleta de carga.....	18
4.1.3	Bicicleta dobrável .....	19
4.1.4	Formato diamante.....	20
<b>5</b>	<b>CONCEÇÃO DO QUADRO .....</b>	<b>21</b>
5.1	Considerações iniciais.....	21
5.2	Dimensões e ângulos.....	21
5.3	Primeiro esboço .....	25
5.3.1	Direção das fibras da madeira.....	26
5.4	Modelo 3d do quadro .....	26
5.4.1	Dimensões parametrizadas .....	27
5.4.2	Dimensões do quadro .....	29
5.4.3	Suporte do eixo traseiro .....	33
5.4.4	Tipo de resina usada .....	34
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÕES DO QUADRO .....</b>	<b>35</b>
6.1	Norma ISO 4210-2:2015.....	35
6.2	Simplificações .....	35
6.2.1	Garfo.....	35
6.2.2	Guiador.....	36
6.2.3	Pedaleira .....	37
6.2.4	Selim.....	37
6.3	Modelo 3D para simulação.....	38
6.3.1	Condições de fronteira.....	39
6.4	Testes a serem realizados.....	40
6.4.1	Pedalar casualmente .....	40
6.4.2	Pedalar sem estar apoiado no guiador .....	43
6.4.3	Pedalar em <i>Sprint</i> .....	45

<b>7</b>	<b>CONSTRUÇÃO DO QUADRO .....</b>	<b>49</b>
7.1	Construção do triângulo principal .....	50
7.2	Construção do apoio do selim e do apoio da corrente.....	54
7.3	Construção do suporte do eixo traseiro.....	57
7.4	União do triângulo principal aos apoios do selim e da corrente.....	58
7.5	União do suporte do eixo traseiro.....	59
7.6	Bicicleta na forma final.....	60
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>61</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>62</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - 1ª bicicleta, construída em 1817.....	5
Figura 2.2 - 1ª bicicleta com corrente e pedais.....	6
Figura 2.3 - Diversos tipos de bicicletas .....	6
Figura 2.4 - Componentes de uma bicicleta .....	7
Figura 2.5 - Maurice Garin em 1903.....	8
Figura 2.6 - Quadro da Carbon Team.....	9
Figura 3.1 - Orientação da fibra da madeira .....	11
Figura 3.2 - Quadro da Renovo e bicicleta da twmpa cycles.....	14
Figura 3.3 - Quadro da Renovo ainda por colar.....	15
Figura 3.4 - Tipos de madeira .....	16
Figura 4.1 - Diferentes formatos de quadros de bicicleta .....	17
Figura 4.2 - Bicicleta de montanha com dupla suspensão .....	18
Figura 4.3 - Modelo Long John.....	19
Figura 4.4 - Bicicleta dobrável modelo Raleigh Flex na posição aberta e dobrada .....	19
Figura 4.5 - Quadro em formato de diamante.....	20
Figura 5.1 - Dimensões do quadro .....	21
Figura 5.2 - Entrepernas.....	22
Figura 5.3 - Cálculo da inclinação do tubo do selim.....	24
Figura 5.4 - Inclinação do tubo do selim.....	24
Figura 5.5 - Primeiro esboço do quadro.....	25
Figura 5.6 - Direção das fibras da madeira representada por setas .....	26
Figura 5.7 - Modelo 3D do quadro (diferentes vistas) .....	27
Figura 5.8 - Tubo de direção.....	28
Figura 5.9 - Zona onde o tubo da direção será inserido (a vermelho) .....	28

Figura 5.10 - Zona onde será inserida a manga de alumínio (a vermelho).....	28
Figura 5.11 - Manga de alumínio .....	28
Figura 5.12 - Peça roscada .....	29
Figura 5.13 - Zona onde será inserida a peça roscada (a vermelho) .....	29
Figura 5.14 - Dimensões na zona do tubo de direção .....	30
Figura 5.15 - Vista em corte do tubo do selim.....	31
Figura 5.16 - Perfil do tubo do selim .....	32
Figura 5.17 - Perfil do tubo superior.....	32
Figura 5.18 - Perfil do tubo inferior .....	32
Figura 5.19 - Suporte do eixo traseiro.....	33
Figura 5.20 - Posição de trabalho do suporte do eixo traseiro .....	33
Figura 6.1 - Alterações do modelo 3D do garfo.....	36
Figura 6.3 - Simplificação do modelo 3D do guiador .....	36
Figura 6.4 - Simplificação do modelo 3D da pedaleira.....	37
Figura 6.5 - Simplificação do modelo 3D do selim.....	37
Figura 6.6 - Modelo a ser simulado.....	38
Figura 6.7 - Malha do modelo 3D .....	38
Figura 6.8 - Apoio móvel que simula a roda da frente .....	39
Figura 6.9 - Apoio fixo que simula a roda de trás.....	39
Figura 6.11 - Ciclista a pedalar casualmente.....	40
Figura 6.12 - Distribuição das forças no selim, pedais e guiador .....	41
Figura 6.13 - Zonas do quadro mais solicitadas.....	41
Figura 6.14 - Deslocamento do quadro em uso casual .....	42
Figura 6.15 - Pedalar sem estar apoiado no guiador .....	43
Figura 6.16 - Distribuição das forças no selim e nos pedais.....	43
Figura 6.17 - Deslocamentos do quadro quando o ciclista não se encontra apoiado no guiador .....	44
Figura 6.18 - Pedalar em <i>sprint</i> .....	45
Figura 6.19 - Distribuição das forças no pedal e no guiador.....	46
Figura 6.20 - Zona crítica do quadro quando sujeito a torção .....	46
Figura 6.21 - Deslocamentos do quadro quando o ciclista se encontra em <i>sprint</i> .....	47
Figura 7.1 - Vista explodida do quadro .....	49
Figura 7.2 - Triângulo principal .....	50

Figura 7.3 - Direção dos veios da madeira e sobreposição das uniões das lâminas de madeira.....	51
Figura 7.4 - Perfil do triângulo principal.....	51
Figura 7.5 - Exterior e interior de uma metade do triângulo.....	52
Figura 7.6 - Encaixe macho fêmea .....	52
Figura 7.7 - Vista em corta da união entre as duas metades .....	53
Figura 7.8 - Triângulo principal completo.....	53
Figura 7.9 - Apoio do selim e apoio da corrente salientados .....	54
Figura 7.10 - Prensa usada para curvar as lâminas de madeira.....	55
Figura 7.11 - Lâminas de madeira.....	55
Figura 7.12 - Lâminas encurvadas na prensa.....	56
Figura 7.13 - Transformação da peça prensada para o apoio da corrente.....	56
Figura 7.14 - Transformação da peça prensada para o apoio do selim .....	57
Figura 7.15 - Suporte do eixo traseiro.....	57
Figura 7.16 - Superfícies de contacto (a vermelho) entre o triângulo principal e o apoio da corrente.....	58
Figura 7.17 - Superfícies de contacto (a vermelho) entre o triângulo principal e o apoio do selim.....	58
Figura 7.18 - Superfícies de contacto entre o suporte do eixo traseiro, os apoios e as cavilhas .....	59
Figura 7.19 - Bicicleta no estado final.....	60



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens do uso do aço em quadros de bicicleta.....	8
Tabela 3 - Propriedades mecânicas dos materiais.....	12
Tabela 4 - Comprimento do quadro [18].....	23
Tabela 5 - Comprimento da pedaleira [18].....	25
Tabela 6 - Tensões nas Zonas 1, 2 e 3.....	42
Tabela 7 - Tensões no quadro quando o ciclista não está apoiado no guidador.....	44



## GLOSSÁRIO

- Gabarito** Ferramenta de carpintaria que permite unir duas peças de madeira.
- Tupia** Ferramenta de carpintaria que permite remover madeira de forma consistente.
- Plaina** Ferramenta de carpintaria que permite remover finas camadas de madeira, planificando as superfícies.
- Módulo de Young** Propriedade mecânica que mede a rigidez de um material sólido.







## SÍMBOLOS

$r$	O raio de um círculo.
$\rho$	Densidade
$E$	Módulo de Young
$\sigma_y$	Tensão de cedência
$A$	Área
$I$	Momento de inércia



# INTRODUÇÃO

## 1.1 Objetivos e Motivação

A realização desta dissertação surge no âmbito do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

A escolha deste tema de dissertação resulta do gosto pessoal do autor por carpintaria, bicicletas e o interesse em conjugar os conhecimentos de Engenharia Mecânica com desafios reais.

### 1.1.1 Crescimento do uso da bicicleta

A utilização da bicicleta como forma de transporte em Portugal ainda é bastante reduzida quando comparada com outros países europeus. Algumas razões para tal ocorrência são as seguintes: falta de infraestrutura, mentalidade muito apegada ao veículo motorizado, clima bastante quente no verão, deslocações de elevada distância.

O uso da bicicleta tem visto um grande aumento ao longo dos anos quer seja através de atividades de lazer ou através de mobilidade quotidiana. Segundo o estudo do IST para EMEL de 2018, 29% das viagens do serviço de bicicletas partilhadas GIRA em Lisboa substituíram o automóvel, o que equivale a uma poupança de 100 toneladas de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. De 2019 para 2020 existiu um crescimento de 25% da utilização da bicicleta na cidade [1].

## 1.1.2 Crescimento da compra de produtos com origens renováveis

Cada vez mais o consumidor ganha consciência da origem dos produtos que compra. O crescimento da preocupação com a saúde, bem-estar e sustentabilidade, permitiu florescer um novo modelo de consumo em redor de produtos orgânicos, naturais e de origens renováveis.

Existe atualmente um consenso sobre a necessidade de evolução do paradigma do estilo de vida para um paradigma que incorpore comportamentos sustentáveis, caracterizados por um menor consumo de recursos e que tenham um impacto ambiental, económico e social com vista a um desenvolvimento sustentável[2].

A criação de um quadro de bicicleta em madeira permite responder a estas duas questões crescentes da sociedade portuguesa e europeia, criando um produto de origens renováveis e que promova o desporto ao ar livre.

Existem alguns parâmetros que precisam de ser cumpridos de forma a criar um produto desejável:

- O peso da bicicleta não deve ser excessivo;
- O uso de produtos de origem renovável deve ser predominante;
- O conforto da bicicleta deve ser superior ao das bicicletas de alumínio;
- A exclusividade e personalização devem ser questões decisivas.

Assim, esta dissertação apresenta como temas principais:

- Comparar os diferentes materiais usados em quadros de bicicleta;
- Criar um modelo que suporte os esforços a que estará submetido e que permita simular o comportamento do quadro da bicicleta;
- Comparar e escolher os diferentes tipos de madeira e cola mais adequados ao quadro;
- Finalmente, demonstrar a construção do quadro da bicicleta em questão.

Este último ponto está dependente do valor dos orçamentos dados pelas empresas, crucial à maquinação CNC do quadro.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

De seguida é apresentada a estrutura da dissertação, que poderá sofrer alterações. A dissertação estará dividida em 7 capítulos:

1. **Introdução:** Neste capítulo serão abordados os objetivos e a motivação desta dissertação.
2. **A bicicleta:** Neste capítulo será feito um enquadramento teórico, expondo um pouco da origem da bicicleta, explicando a importância do quadro na bicicleta e comparando os diferentes tipos de materiais usados na construção de quadros de bicicleta.
3. **Revisão bibliográfica:** Aqui será demonstrada a inspiração para o tema da tese, dando exemplos de empresas que comercializam bicicletas com quadros de madeira. Também serão expostos estudos relativos ao tema.
4. **Esboço do quadro:** Neste capítulo serão apresentados diversos esboços que permitam chegar a um produto final.
5. **Criação do modelo 3D:** Neste capítulo será criado o modelo numérico do quadro da bicicleta.
6. **Simulações teóricas:** Neste capítulo serão feitas diversas iterações do modelo de forma que os esforços admitidos sejam suportados. Terão de ser descobertas as deformações e tensões máximas na geometria do quadro.
7. **Construção do quadro:** Neste capítulo será resumida a construção do quadro e a montagem da bicicleta final.

## 1.3 Metodologia

De forma que o modelo numérico final gere resultados próximos os reais, é necessário garantir que tanto a geometria utilizada como as condições de fronteira coincidam com a realidade do uso da bicicleta.

O quadro será criado usando o software 3D SolidWorks, que permite definir materiais, condições de fronteira e executar diversas simulações.

De modo a construir o quadro da bicicleta, existem 3 hipóteses a considerar:

- Uso exclusivo de ferramentas CNC. Esta hipótese é a que geraria um produto com tolerâncias mais apertadas e o mais automatizado.
- Combinação de ferramentas CNC com ferramentas manuais: Nesta hipótese serão criados moldes e gabaritos com as ferramentas CNC que auxiliarão na construção manual do quadro. A precisão da construção seria suficiente.
- Uso exclusivo de ferramentas manuais: Serão usadas diversas ferramentas de madeira, tais como tupia, serra circular, lixas, modelos e plainas. A precisão e a repetibilidade seria menor. O trabalho manual é um fator que influencia as compras do consumidor portanto, criar um quadro usando técnicas manuais cria um produto mais exclusivo.

Tendo em conta estas hipóteses, a segunda é a que parece mais indicada ao projeto.

## ENQUADRAMENTO TEÓRICO

### 2.1 História da Bicicleta

O primeiro meio de transporte que mais se assemelha a uma bicicleta surgiu em 1817 pelas mãos do Barão alemão Karl von Drais, pelo nome de celerífero, como se pode observar na Figura 2.1.



Figura 2.1 - 1ª bicicleta, construída em 1817 [3]

A sua estrutura era feita de madeira com duas rodas interligadas por uma viga e um suporte para as mãos que permitia curvar. O seu modo de propulsão eram os pés do condutor que impulsionavam a bicicleta para a frente.

A primeira bicicleta com um sistema de corrente e pedais surgiu em 1884 denominada a "safety bicycle" (bicicleta segura). Sendo patenteada por J. McCammon no Reino Unido, apresentava uma roda maior na traseira do que na dianteira, como se pode ver na Figura 2.2.



Figura 2.2 - 1ª bicicleta com corrente e pedais [4]

Atualmente existem diversos tipos de bicicletas, para todos os géneros de finalidades: lazer, desporto de alta performance, transporte de mercadorias, deslocações. Na Figura 2.3 são apresentados alguns tipos de bicicletas que existem.



Figura 2.3 - Diversos tipos de bicicletas (A - de estrada; B - de montanha; C - de ciclismo; D - de passeio; E - dobrável; F - fatbike; G - de senhora; H - de criança; I - de carga)

### 2.1.1 Importância do quadro da bicicleta

Uma bicicleta é constituída por diversos componentes, sendo o quadro um dos mais importantes. Este é o centro da bicicleta onde todos os componentes são montados e que fornece rigidez à estrutura. Na Figura 2.4 é possível observar os diversos componentes de uma bicicleta.



Figura 2.4 - Componentes de uma bicicleta [5]

De forma a produzir uma viagem confortável e não desgastante, existem variados critérios que o quadro deve cumprir:

- Deve ser capaz de absorver certas vibrações e irregularidades da estrada de forma que estes não sejam transmitidos ao ciclista;
- Não deve ser demasiado flexível de modo a não absorver a força das pedaladas do ciclista;
- Deve ser leve, capaz de suportar os esforços, resistente à corrosão e apresentar as dimensões próprias para cada ciclista.

## 2.2 Materiais usados na construção do quadro

Dentro do ramo das bicicletas, o quadro é o componente que mais inovação tem sofrido. Desde o material à geometria, todos os aspetos do quadro têm sido aperfeiçoados de forma a criar a bicicleta mais adequada para cada modalidade.

Os materiais mais usados na construção dos quadros da bicicleta são aço, alumínio, titânio, fibra de carbono, magnésio, polímeros e até madeira ou bambu. Destes, o mais usado são os 4 primeiros.

## 2.2.1 Aço

O aço, nomeadamente o aço carbono de baixa liga, é dos materiais mais comuns e antigos na construção de quadros de bicicletas. As primeiras competições profissionais de ciclismo integravam bicicletas construídas em aço, como é o caso do primeiro "Tour de France" (volta a França) em 1903, ganha pelo Maurice Garin (figura abaixo). [6]

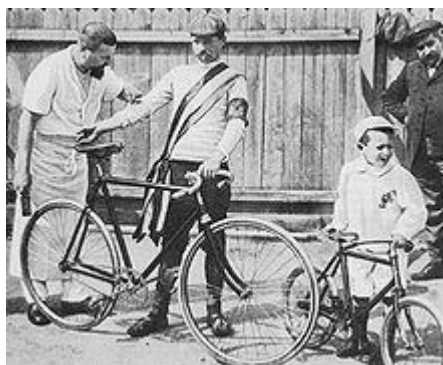


Figura 2.5 - Maurice Garin em 1903 [7]

Este material apresenta diversas vantagens e desvantagens, enumeradas na Tabela 1

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens do uso do aço em quadros de bicicleta

<b>Vantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Material relativamente barato que permite criar bicicletas de linha baixa;</li><li>• Bastante resistente e durável;</li><li>• Relativa flexibilidade que se traduz numa viagem mais confortável;</li><li>• Fácil construção e reparação;</li></ul>
<b>Desvantagens</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Facilidade de oxidação e corrosão, se não for inoxidável;</li><li>• Densidade superior ao dos outros matérias, donde originam bicicletas pesadas;</li></ul>

## 2.2.2 Alumínio

É, atualmente, o material mais comum na construção de quadros de bicicleta. As ligas de alumínio mais usadas para a construção de bicicletas são a 6061 e a 7005. É bastante mais

leve que o aço, apresentando uma relação peso-resistência muito superior. O fato de ser menos rígido origina uma viagem mais desconfortável que o aço, mas a força do ciclista é melhor transmitida às rodas. É resistente à corrosão, ao contrário do aço, mas é mais suscetível a falhas por fadiga.

### 2.2.3 Titânio

Este é um dos materiais mais cobiçados para a construção de quadros de bicicleta, tanto pela sua raridade e preço. Mais especificamente, a liga mais usada é a 3AL2.5V. Apresenta uma maior densidade que o alumínio, mas tem uma altíssima resistência mecânica (módulo de Young a rondar os 485MPa), o que permite criar quadros de tubos muito finos. É imune à corrosão, mais flexível que o alumínio o que se traduz numa viagem mais confortável.

### 2.2.4 Fibra de Carbono

O fabrico de quadros de bicicleta em fibra de carbono utiliza essencialmente dois materiais: malha de carbono e matriz de resina epoxídica. Dependendo da orientação da malha de carbono, é possível criar um material isotrópico. Deste modo, os quadros de fibra de carbono apresentam elevada resistência mecânica, baixo peso e elevada rigidez.

Em Vouzela, Viseu, a Carbon Team criou um dos quadros mais leves do mundo (Figura 2.6), pesando apenas 770 gramas invés das tradicionais 1100 gramas.



Figura 2.6 - Quadro da Carbon Team [8]



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Escolha da madeira para construção do quadro

A madeira é um material anisotrópico, isto é, é mais resistente ao longo das fibras do que através destas. É uma estrutura complexa, constituída essencialmente por fibras de celulose ligadas entre si por lenhina. As fibras de madeira são tubos longos e ocos. Os fatores diferenciadores entre diferentes tipos de madeira são:

- A idade da árvore donde a madeira é proveniente. Geralmente, quanto mais antiga é a árvore mais resistente será a madeira;
- O arranjo e tamanho das fibras da madeira. Quanto maior for a densidade da madeira mais rija será a madeira proveniente [9].

Tendo em conta as propriedades dos materiais usuais para a construção de quadros e da madeira, é possível criar a Tabela 2. Na Figura 3.1 é possível observar que as fibras da madeira são paralelas ao eixo longitudinal.

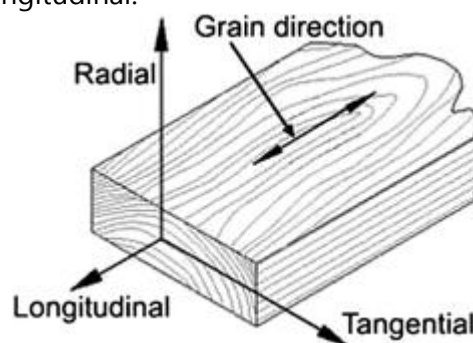


Figura 3.1 - Orientação da fibra da madeira [10]

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais

	Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) $\rho$	Módulo de Young (Gpa) $E$	Tensão de cedência (MPa) $\sigma_y$
Alumínio 6061	2700	70	300
Aço Carbono baixa liga	7850	205	800
Fibra de car- bono	1600	80	600
Carvalho	740	13.3	105

Deste modo, como a densidade da madeira é bastante inferior ao do alumínio, se for criado um quadro com o dobro ou triplo da espessura de um quadro de alumínio, a rigidez será bastante superior.

Para os cálculos seguintes irão ser usados os valores da tabela do carvalho, que são os seguintes:

$$\rho = 740 \text{ kg/m} \quad (1)$$

$$E = 13.3 \text{ GPa} \quad (2)$$

$$\sigma_y = 105 \text{ MPa} \quad (3)$$

É possível justificar o uso da madeira como material de construção de um quadro de bicicleta operando algumas fórmulas de mecânica.

Tendo em conta os tubos de um quadro de alumínio com 45 mm de diâmetro e com a espessura de 1.5 mm, é possível determinar a sua área e momento de inércia.  $r_0$  é o raio interior do tubo e  $r_1$  é o raio exterior do tubo.

$$A = \pi * (r_0^2 - r_1^2) = \pi * (22.5^2 - 21^2) = 205 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

$$I = \frac{1}{4} * \pi * (r_0^4 - r_1^4) = \frac{1}{4} * \pi * (22.5^4 - 21^4) = 48544 \text{ mm}^4 \quad (5)$$

Usando o módulo de Young e a densidade da Tabela 2, é possível retirar do livro *Mecânica dos Materiais* de *Carlos Branco* as seguintes fórmulas e calcular a rigidez axial  $k$ , a rigidez à flexão  $M$ , a força de cedência  $F_y$  e a massa por metro.

$$k = E * A = 70 * 205 = 14350 \text{ N} \quad (6)$$

$$M = E * I = 70 * 48544 = 3398 \text{ kN} * \text{mm}^2 \quad (7)$$

$$F_y = A * \sigma_y = 205 * 300 = 61500 \text{ N} \quad (8)$$

$$m = A * \rho = 205 * 10^{-6} * 2700 = 0.5535 \text{ kg/m} \quad (8)$$

Se fosse construído um quadro em madeira com as mesmas dimensões que um quadro de alumínio, este seria muito mais fraco devido ao menor módulo de Young. Para compensar tal fragilidade, são construídos tubos de maior diâmetro e espessura. Com isto em mente, são usados tubos de madeira de 65 mm de diâmetro e 4 mm de espessura. Obtendo a seguinte área e momento de inércia.

$$A = \pi * (r_0^2 - r_1^2) = \pi * (32.5^2 - 28.5^2) = 767 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{4} * \pi * (r_0^4 - r_1^4) = \frac{1}{4} * \pi * (32.5^4 - 28.5^4) = 358074 \text{ mm}^4 \quad (10)$$

Usando o módulo de Young de  $13.3 \text{ N/mm}^2$ , é possível calcular a rigidez axial  $k$ , a rigidez à flexão  $M$  e a força de cedência  $F_y$ .

$$k = E * A = 13.3 * 767 = 10201 \text{ N} \quad (11)$$

$$M = E * I = 13.3 * 358074 = 4762 \text{ kN} * \text{mm}^2 \quad (12)$$

$$F_y = A * \sigma_y = 767 * 105 = 80535 \text{ N} \quad (13)$$

$$m = A * \rho = 767 * 10^{-6} * 740 = 0.5676 \text{ kg/m} \quad (14)$$

Como é possível observar pelos cálculos, a rigidez axial do quadro de madeira é 29% inferior ao do quadro de alumínio. O que se traduz num quadro mais flexível. Este resultado não é preocupante pois esta flexibilidade apenas se traduz no movimento lateral da pedaleira quando se pedala com bastante força.

Também é possível observar que a rigidez à flexão é 40% maior e que a força de cedência é 31% superior no quadro de madeira. E o peso do quadro de madeira será apenas 2% superior ao do quadro de alumínio.

## 3.2 Quadros em madeira

A inspiração para este tema de dissertação provém de empresas que já fabricaram bicicletas de madeira, tais como Renovo e twmpa cycles. Na Figura 3.2 é possível observar modelos fabricados por estas empresas.

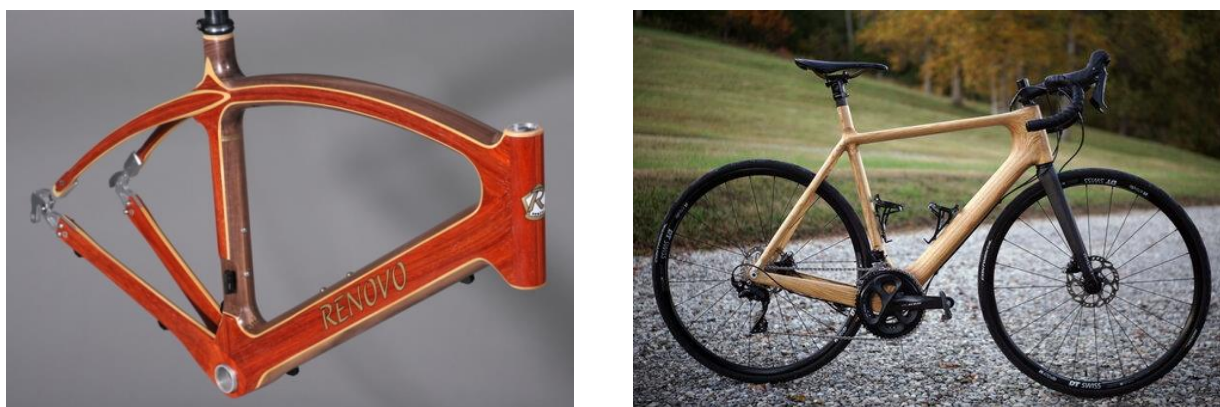


Figura 3.2 - Quadro da Renovo e bicicleta da twmpa cycles

Este tipo de quadros enquadra-se num mercado de luxo, onde o cliente procura uma bicicleta à sua medida e que evoque uma sensação de primazia. Certas pessoas consideram que a madeira é um material mais nobre que o alumínio, e que requer maior perícia no seu manuseamento. Consequentemente, os objetos construídos com madeira dura dispõem de valor intrínseco. Na área das bicicletas de madeira é possível destacar a Renovo pela sua nova técnica de construção de quadros. Criada em 2007, esta empresa constituída por designers e engenheiros mecânicos desenvolve quadros de bicicleta de alto desempenho, tendo a aerodinâmica e o peso em consideração. Optaram pela construção em madeira pelas propriedades mecânicas intrínsecas do material e não por serem aficionados pela madeira. Os quadros eram construídos pela colagem de lâminas de madeira, alternando a direção das fibras de acordo com a direção dos esforços. Isto confere ao quadro uma grande resistência mecânica em

diversas direções, pois a madeira é apenas apresenta alta resistência mecânica ao longo das fibras. O fundador da empresa, Kenneth Wheeler, orgulhava-se de que um quadro podia ser maquinado em CNC em apenas 5 minutos [10]. Na Figura 3.3 é possível observar as duas metades do triângulo principal antes de serem unidas. De destacar o trabalho preciso de remoção de madeira do interior do quadro por parte da máquina CNC.



Figura 3.3 - Quadro da Renovo ainda por colar [21]

### 3.3 Tipos de madeira

Tendo em conta a aplicação, é necessário usar madeiras duras tais como freixo, carvalho, mogno, cerejeira ou madeiras exóticas tais como bubinga ou padauk.

A classificação das madeiras como *dura* ou *macia* provêm da árvore que lhe deu origem. A madeira de origem de árvores coníferas é designada de macia. A madeira de origem de árvores de folha caduca é designada de dura. Esta madeira acaba por ser mais rija pois, como a árvore perde as folhas nas estações mais frias demora mais tempo a crescer, e a madeira torna-se mais densa. As madeiras duras tendem a ser mais escuras que as macias. Nas figuras abaixo é possível ver os diferentes tipos de madeira.



A - Carvalho



B - Mogno



C - Freixo



D - Cerejeira



E - Bubinga



F - Padauk

Figura 3.4 - Tipos de madeira

## GEOMETRIA DO QUADRO

### 4.1 Diferentes formatos do quadro

O quadro da bicicleta é um objeto que toma diversas formas, sendo estas determinadas pelo seu desempenho ou estética. Dependendo da modalidade a que a bicicleta vai estar sujeita, o formato do quadro é otimizado de forma a responder melhor aos esforços a que vai estar sujeito [11]. Na Figura 4.1 é possível observar diferentes tipos de bicicletas com o quadro mais adequado para a modalidade.



Figura 4.1 - Diferentes formatos de quadros de bicicleta

### 4.1.1 Bicicleta de montanha

O conceito de bicicleta de montanha surgiu na década de 70, sendo que a primeira produzida em massa foi a Stuntjumper do fabricante Specialized em 1981. Estas bicicletas assemelhavam-se às bicicletas normais de estrada, diferenciando apenas nos quadros e garfos mais largos de modo a acomodar pneus mais largos [12]. Atualmente praticamente todas as bicicletas de montanha apresentam um ou dois amortecimentos. O modelo da Figura 4.2 contém suspensão na roda traseira e dianteira, permitindo que ambas se movimentem independente do quadro. Tal disposição permite ao ciclista uma viagem mais suave e agradável, absorvendo todas as irregularidades do terreno.



Figura 4.2 - Bicicleta de montanha com dupla suspensão [22]

### 4.1.2 Bicicleta de carga

A bicicleta de carga não é um fenômeno novo, ganhando grande relevância na década de 30 com o aumento de transporte de bens [13]. Na década de 60, o uso da bicicleta de carga sofreu um grande declínio com a apresentação da carrinha de caixa aberta. Atualmente, o uso desta bicicleta encontra-se em crescimento, com a possibilidade de transportar crianças e grandes quantidades de carga, alguns modelos auxiliados por motores elétricos [14]. Na Figura 4.3 é possível observar uma bicicleta de carga do tipo *Long John*.



Figura 4.3 - Modelo Long John [23]

### 4.1.3 Bicicleta dobrável

A bicicleta dobrável foi desenhada de modo a ficar compacta quando dobrada, facilitando o transporte e o arrumo. Esta possui um mecanismo de dobragem de fácil e rápido manuseamento, que permite o transporte para dentro de edifícios e transportes públicos. Este tipo de bicicletas apresenta maior complexidade pelo número mais elevado de peças, o que infere num custo relativo maior [15]. Na Figura 4.4 é possível observar a dobragem de uma bicicleta.



Figura 4.4 - Bicicleta dobrável modelo Raleigh Flex na posição aberta e dobrada [24]

#### 4.1.4 Formato diamante

O formato de quadro mais usual nas bicicletas é o chamado diamante. Este é composto por dois triângulos interligados que fornecem estrutura e rigidez à bicicleta. Na Figura 4.5 é possível observar as diferenças entre um quadro de aço de 1900 e um de carbono de 2015.

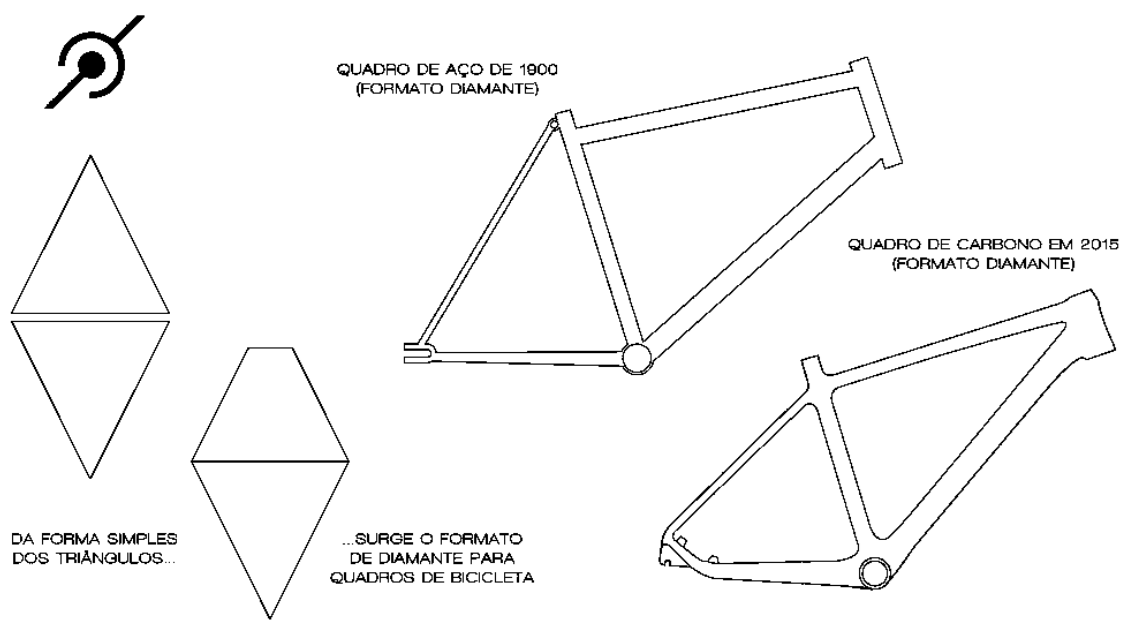


Foto: Pedalaria

Figura 4.5 - Quadro em formato de diamante [16]

Este formato de quadro continua a ser o mais popular pela facilidade de fabrico, resistência mecânica e fiabilidade, pois a forma triangular é o único polígono que mantém a sua forma sob pressão [17]. Este formato será o usado na conceção deste quadro de bicicleta pois é o mais usual numa bicicleta de estrada.

## CONCEÇÃO DO QUADRO

### 5.1 Considerações iniciais

As dimensões do quadro vão ser adequadas para o autor desta dissertação, que mede 170 cm. De forma a criar o quadro mais ergonómico possível vai ser tido em conta os resultados do estudo *Ergonomia Aplicada ao Design de Produto: Um estudo de caso sobre o design de bicicletas* de Suzi Mariño Pequini. [18]

### 5.2 Dimensões e ângulos

O quadro da bicicleta é constituído pelas dimensões da Figura 5.1.

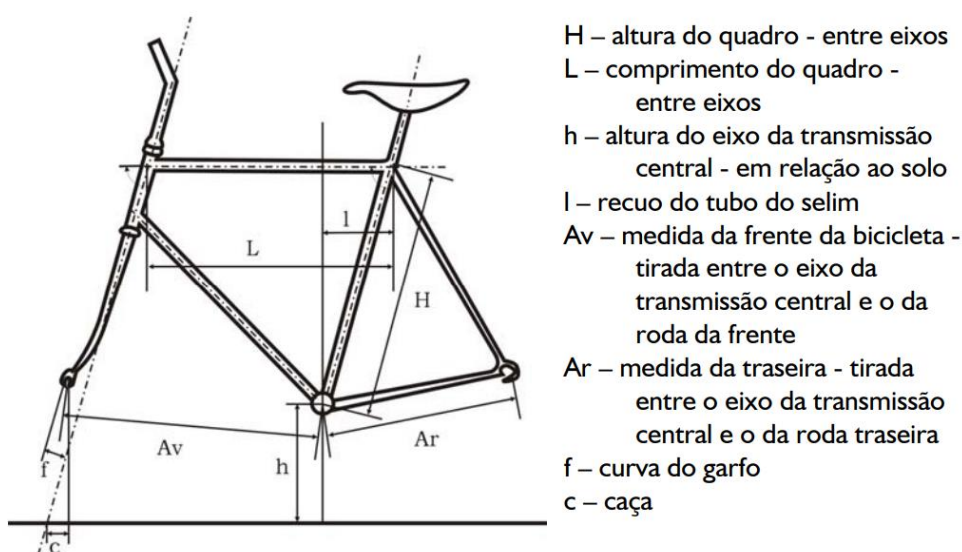


Figura 5.1 - Dimensões do quadro [16]

- **Altura do quadro:** distância entre o eixo pedaleiro e o topo do quadro;
- **Comprimento do quadro:** comprimento do tudo superior do quadro;
- **Altura do eixo da transmissão central:** distância entre o solo e o eixo pedaleiro;
- **Recuo do tudo do selim:** distância horizontal entre o eixo pedaleiro e o tudo do selim;
- **Medida da frente da bicicleta:** distância entre o eixo pedaleiro e o eixo do garfo;
- **Medida da traseira:** distância entre o eixo pedaleiro e o eixo da roda traseira;

De forma a obter a altura do quadro, é necessário determinar a altura do entrepernas, exemplificado na Figura 5.2. Usando uma fita métrica é possível obter uma altura entrepernas de 86 cm. Multiplicando essa medida pelo fator de 0.65, a altura do quadro é 55,9 cm. [18]

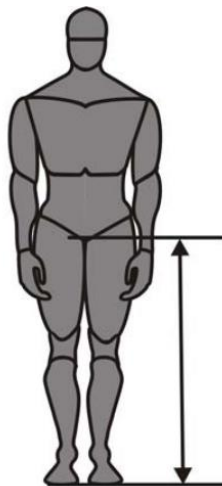


Figura 5.2 - Entrepernas

O comprimento do quadro obtêm-se somando os comprimentos do braço e tronco. Na Tabela 3 é possível determinar a relação entre a soma do comprimento do tronco com o braço e o comprimento do quadro.

Tabela 3 - Comprimento do quadro [18]

Soma do comprimento do tronco com o braço.	Comprimento do tubo horizontal de acordo com o resultado da soma dos comprimentos do tronco com o braço
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

Tendo em consideração que a soma do comprimento do braço com o tronco é 106 cm, é possível determinar um comprimento do quadro de 55 cm.

A altura do eixo da transmissão central é calculado tendo em conta que será usado um pedaleiro com 17 cm de comprimento, a altura do eixo do pedaleiro ao solo deve ser igual a 26,5cm.

A altura do selim deve ser calculada multiplicando a altura entrepernas por 0,885. Obtendo desta forma uma altura de selim de 76,1 cm.

De modo a calcular a a inclinação do tubo do selim é necessário ter em conta o seguinte: *"Pode obter a inclinação do tudo do selim "l", medida que é fundamental na geometria do quadro, a partir do centro da transmissão central. Traçam-se dois círculos, um de raio H, altura do quadro, o outro de raio Hs, altura do selim; traça-se a vertical da transmissão central. traçar uma reta paralela a esta vertical, à distância do recuo do selim mais meio comprimento do selim "rs"; determinar o ponto de encontro desta reta com o grande círculo (rsl) e unir este ponto ao centro da transmissão central; a reta que une o centro da transmissão central ao ponto médio do selim, corta o pequeno círculo no ponto de encontro dos eixos do tubo do selim e do tubo horizontal (pa). Basta, então, medir selim l."*

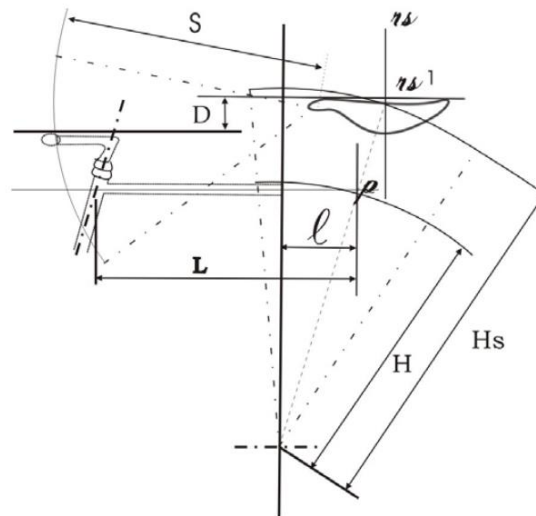


Figura 5.3 - Cálculo da inclinação do tubo do selim [18]

Tendo em conta que  $H = 55,9$  cm e que  $H_s = 76,1$  cm, é possível desenhar em SolidWorks e determinar que a inclinação do tubo de selim corresponde a  $73^\circ$ . Este desenho está representado na Figura 5.4.

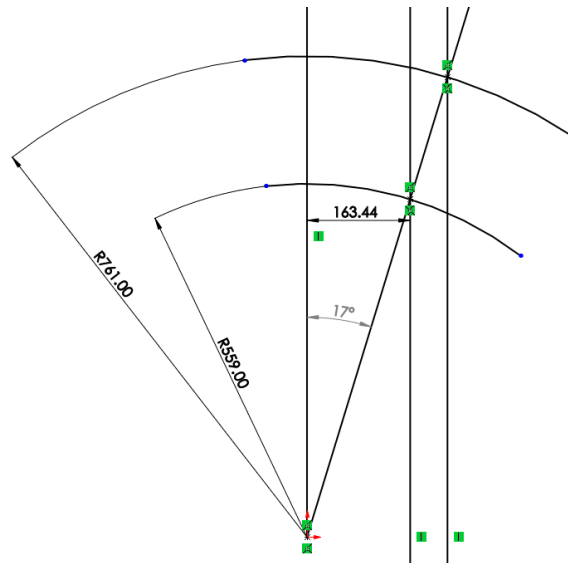


Figura 5.4 - Inclinação do tubo do selim [18]

Por norma, a inclinação do tubo da direção é a mesma que a do tubo do selim. Tendo em conta a Tabela 4, é possível definir um comprimento de pedaleira de 17cm.

Tabela 4 - Comprimento da pedaleira [18]

Entrepernas (cm)	Pedivelas (cm)
Até 83	16,5
Até 84	16,6
Até 85	16,7
Até 86	16,8
Até 87	16,9
De 88 a 93	17
Até 94	17,1
Até 95	17,2
Até 96	17,3
Até 97	17,4
De 98 em diante	17,5

Segundo o estudo de Suzi Mariño Pequini, so ser considerado uma pedaleira de 17cm, a altura ao solo do eixo da transmissão central deve ser igual a 26,5cm [18].

### 5.3 Primeiro esboço

Tendo em conta as dimensões acima determinadas, é possível desenhar o primeiro esboço do quadro da bicicleta, na Figura 5.5.

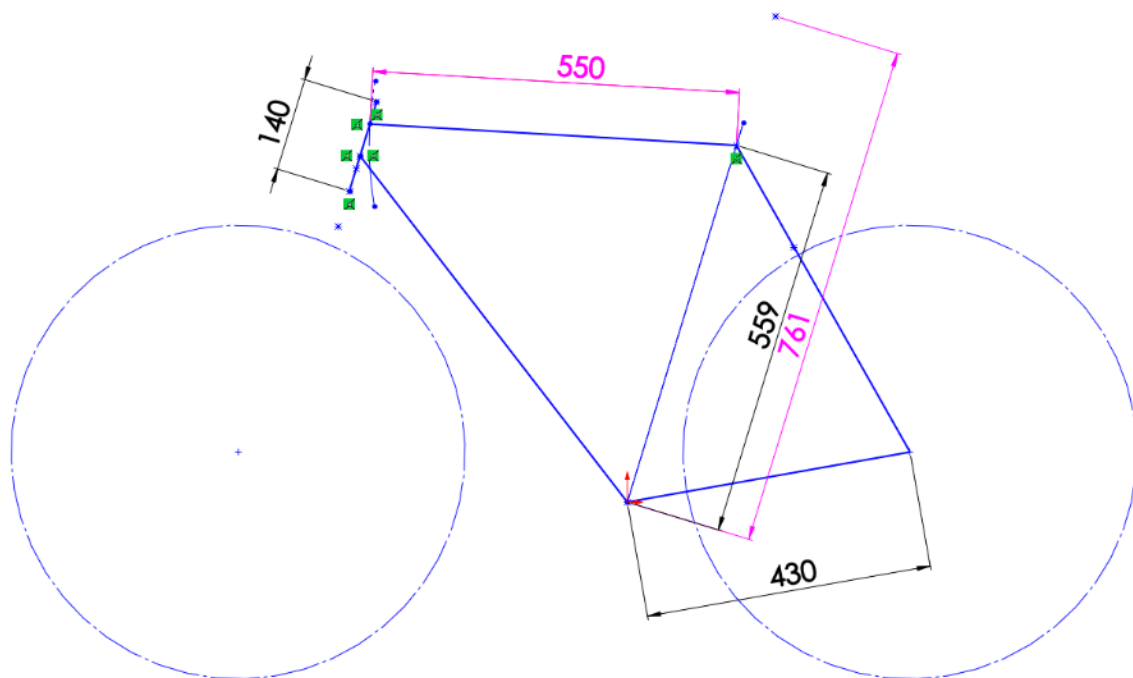


Figura 5.5 - Primeiro esboço do quadro

### 5.3.1 Direção das fibras da madeira

Quando na fase de projeto do quadro da bicicleta, foi tido em consideração que a madeira é um material anisotrópico que apresenta melhores propriedades mecânicas ao longo das fibras. Logo, a madeira a usar deve estar disposta de forma que a direção das fibras desta seja paralela aos tubos do quadro, como apresentado na Figura 5.6.

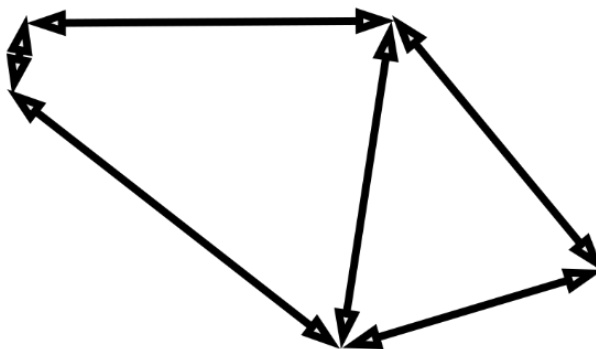


Figura 5.6 - Direção das fibras da madeira representada por setas

## 5.4 Modelo 3d do quadro

Foi criado um modelo em SolidWorks que permite visualizar e simular o quadro antes de ser construído. A geometria deste obedece ao esboço inicial e reflete a estética que o autor pretende como produto final. O modelo encontra-se visível na Figura 5.7 em diferentes vistas. Também nesta imagem é possível observar quatro vistas em corte do quadro, que permite ter uma ideia do perfil.

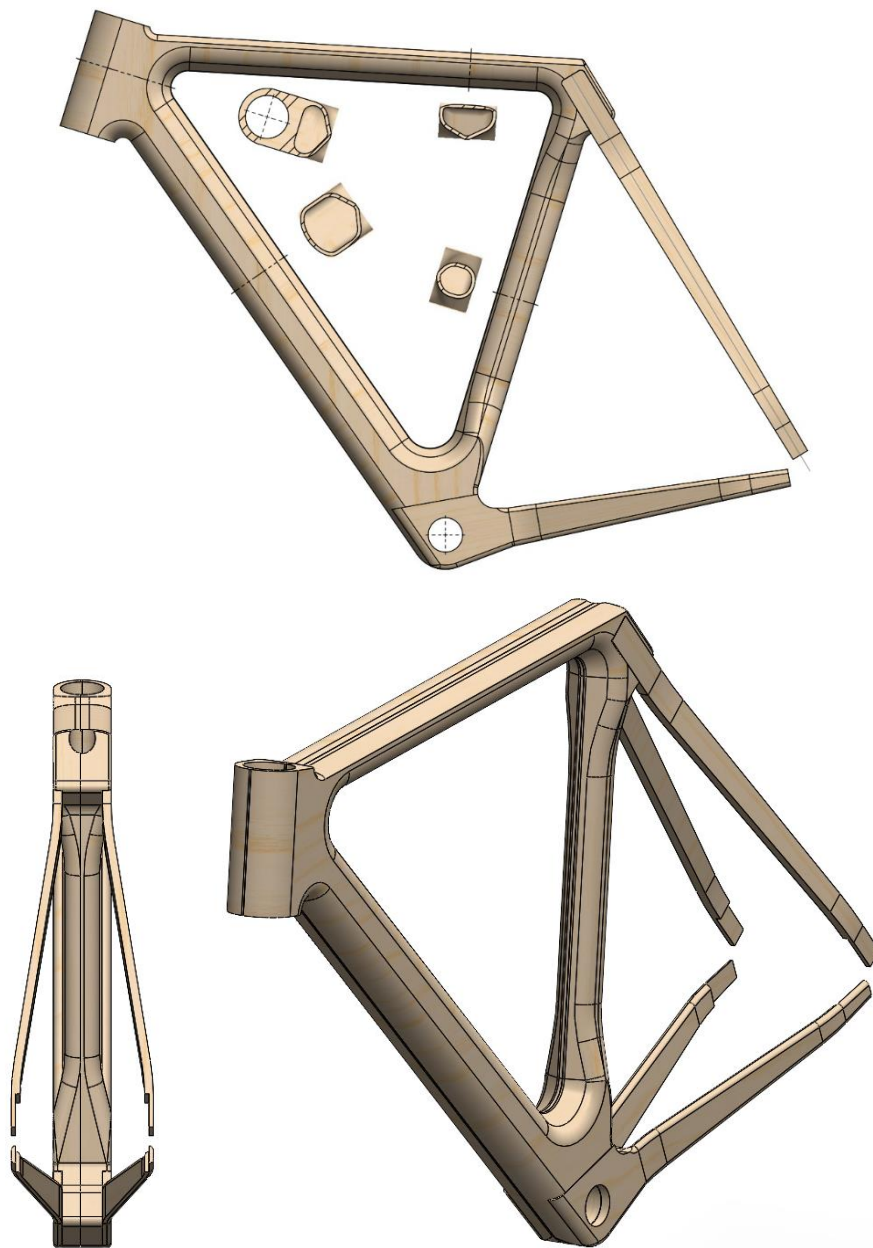


Figura 5.7 - Modelo 3D do quadro (diferentes vistas)

#### 5.4.1 Dimensões parametrizadas

Existem três zonas onde vão ser inseridas peças metálicas que permitem a fixação de ferragens. Estas peças de alumínio caracterizam-se por apresentar um acabamento superficial exterior irregular, o que melhora a união da resina.

Na coluna de direção será inserido um tubo de direção de alumínio com 50 mm de diâmetro exterior. Esta peça permite a fixação dos rolamentos de direção por ajuste incerto. Na Figura 5.9 é possível observar o tubo de direção e na Figura 5.8 a zona onde será inserido.



Figura 5.8 - Tubo de direção

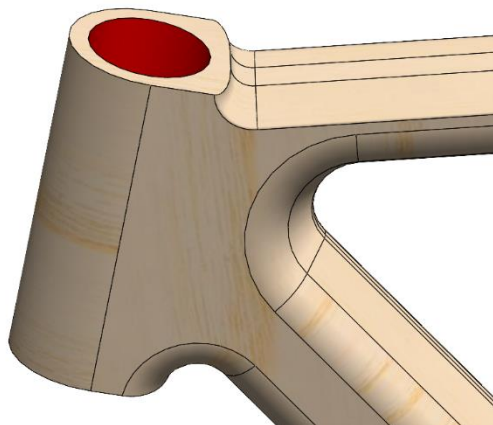


Figura 5.9 - Zona onde o tubo da direção será inserido (a vermelho)

Nesta zona do quadro, serão colocados rolamentos de direção, e se apenas fossem prensados na madeira, a área de contacto entre estes seria bastante baixo. De modo a aumentar a distribuição das forças nesta zona será necessário colocar este tubo de direção.

De modo a apertar o espigão de selim à bicicleta será inserido uma manga em alumínio com 30 mm de diâmetro exterior. Na Figura 5.11 é possível observar essa manga de alumínio e na Figura 5.10 a zona onde será inserido.



Figura 5.11 - Manga de alumínio

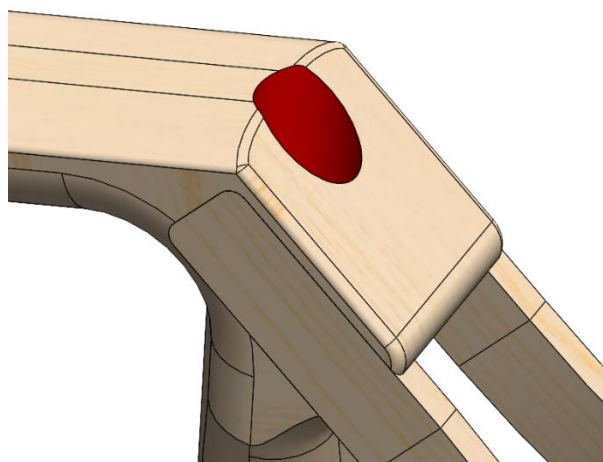


Figura 5.10 - Zona onde será inserida a manga de alumínio (a vermelho)

De modo a enroscar o movimento central ao quadro é necessário fixar uma peça metálica. Essa peça apresenta 40 mm de diâmetro exterior e é roscado interiormente nas duas pontas. Na Figura 5.12 é possível observar essa peça metálica e na Figura 5.13 a zona onde será inserida.



Figura 5.12 - Peça roscada

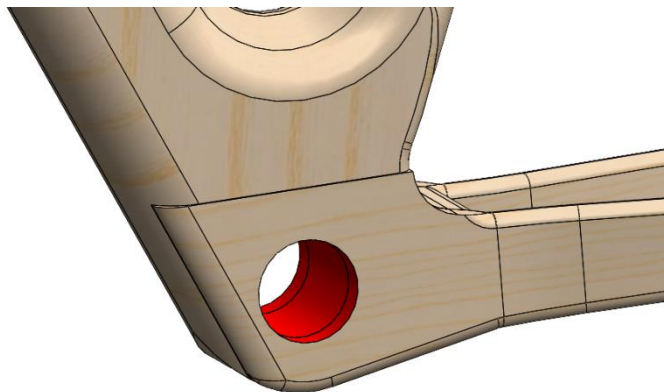


Figura 5.13 - Zona onde será inserida a peça

## 5.4.2 Dimensões do quadro

### 5.4.2.1 Largura do quadro

A largura do quadro é condicionada por dois componentes:

- A peça roscada do movimento central;
- O tubo de direção.

A peça roscada do movimento central apresenta uma largura de 68 mm, logo o quadro nessa zona não pode ser inferior nem superior a essa dimensão.

O tubo de direção apresenta um diâmetro exterior de 50 mm. Logo, de forma a criar uma estrutura que aguarde os esforços solicitados, foi admitida uma espessura do quadro nessa zona de 8 mm. Na Figura 5.14 é possível verificar as dimensões pertinentes.

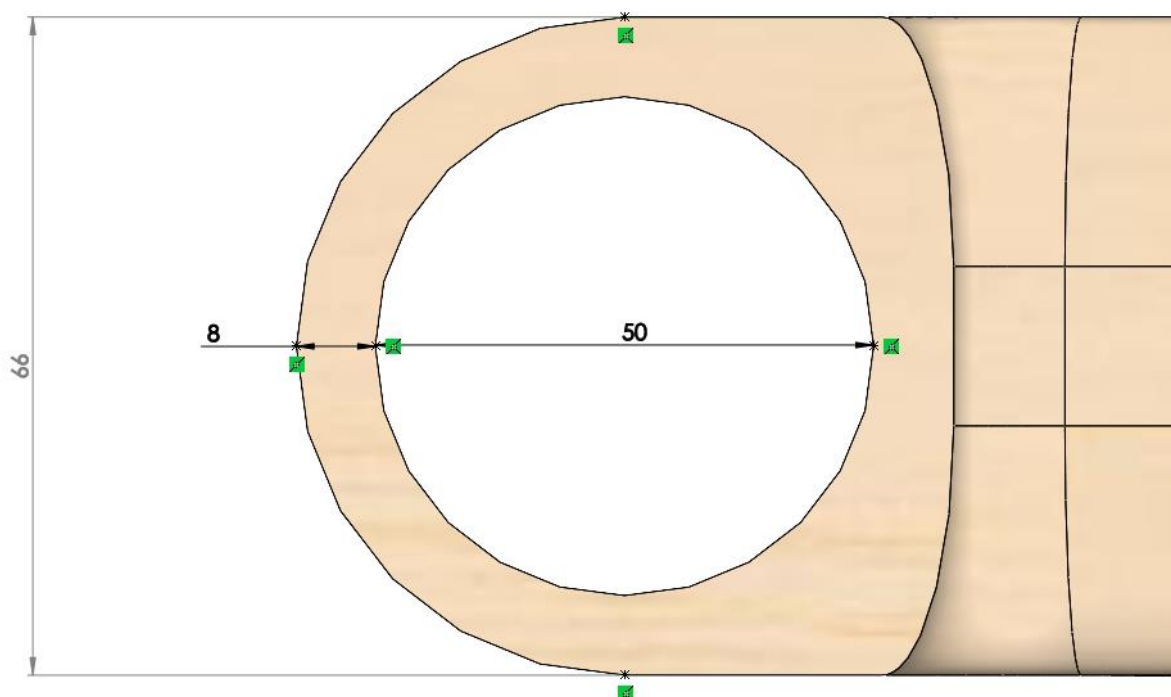


Figura 5.14 - Dimensões na zona do tubo de direção

Deste modo, a largura máxima do quadro é de 68 mm na zona da pedaleira e de 66 mm no resto do quadro, à exceção do tubo do selim. Na Figura 5.15 é possível verificar que o diâmetro exterior do tubo do selim não é uniforme, sendo que no centro mede 40 mm de largura e expande nas extremidades. Na Figura 5.15 é possível observar o interior do tubo do selim.

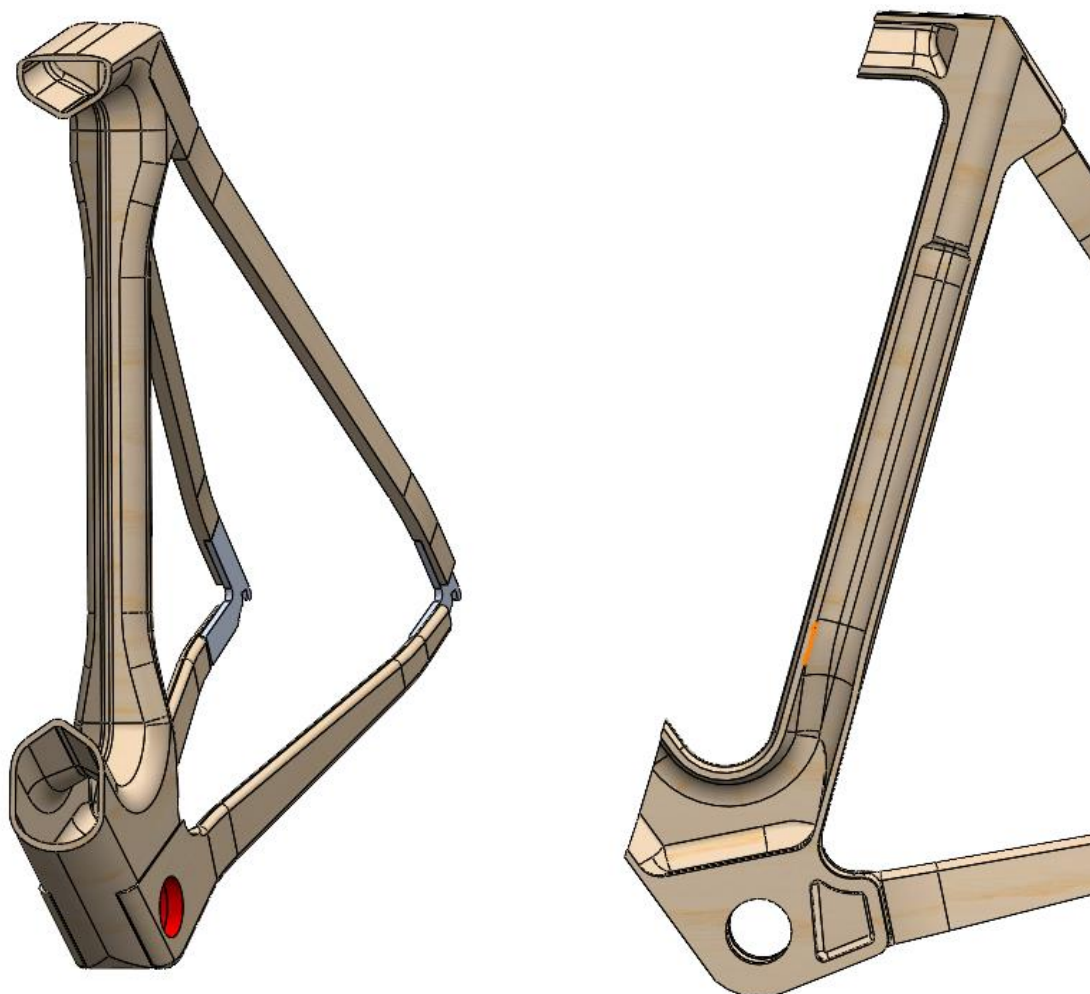


Figura 5.15 - Vista em corte do tubo do selim

#### 5.4.2.2 Perfis dos tubos do quadro

Os perfis dos tubos do quadro foram criados a pensar na aerodinâmica. Nas figuras da página seguinte é possível observar os diferentes perfis dos tubos do quadro, tal como algumas das suas dimensões.

A espessura do quadro foi escolhida de forma arbitrária. Tendo em consideração que um quadro de alumínio apresenta uma espessura que de 0.8 mm e que o módulo de Young é de 70 GPa, foi escolhida uma espessura de 4 mm para o quadro de madeira pois o seu módulo de Young é aproximadamente 5 vezes menor.

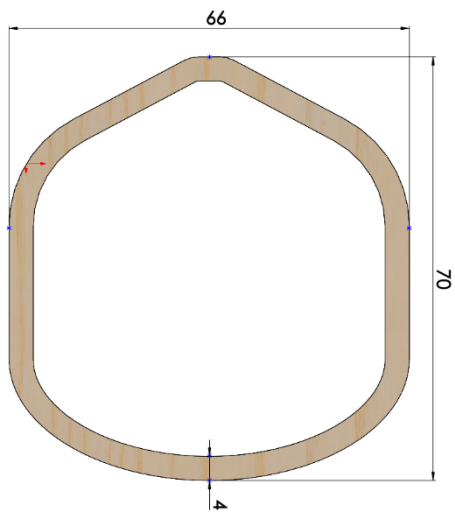


Figura 5.16 - Perfil do tubo inferior

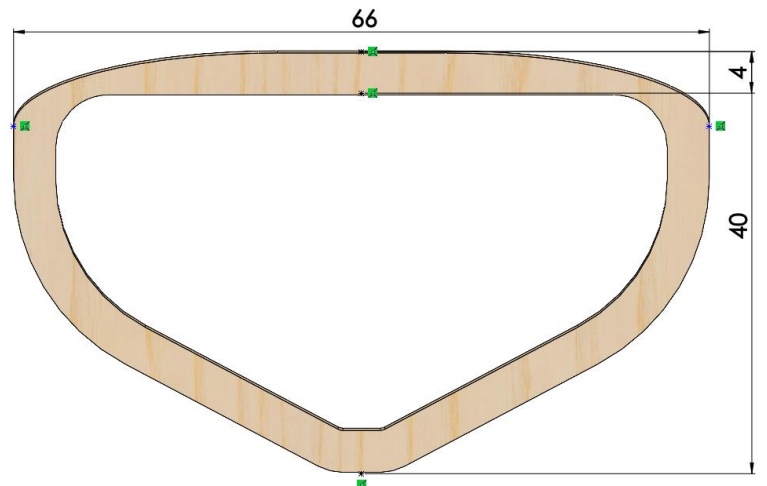


Figura 5.18 - Perfil do tubo superior

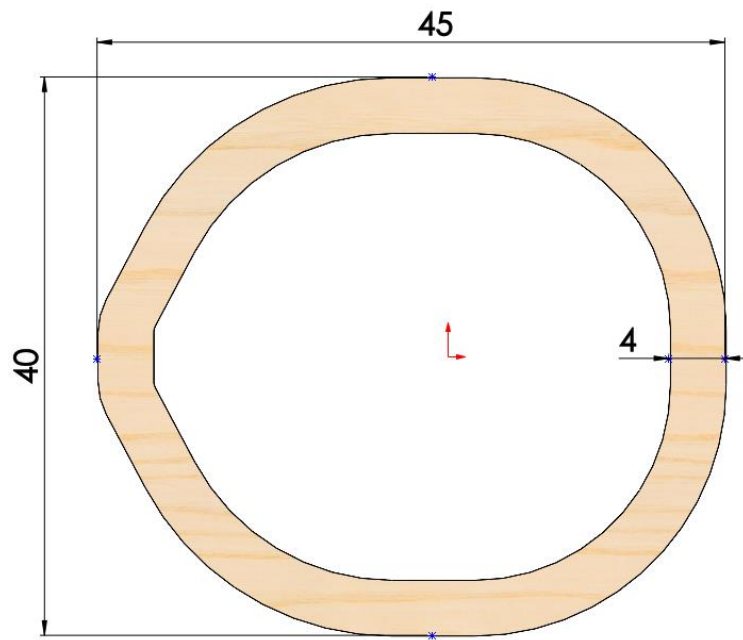


Figura 5.17 - Perfil do tubo do selim

### 5.4.3 Suporte do eixo traseiro

Sendo este um ponto de interface entre o quadro e o eixo da roda, é necessário criar uma peça que consiga suportar os esforços exercidos. É importante que o raio do gancho seja de 5 mm pois essa é a medida do raio do cubo da roda. Para tal, a peça é obtida fresagem CNC. Na Figura 5.19 é possível observar o suporte do eixo traseiro e algumas das suas dimensões.

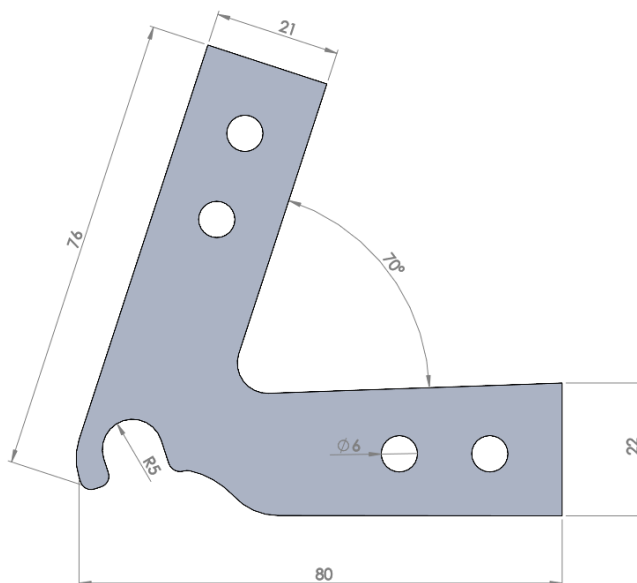


Figura 5.19 - Suporte do eixo traseiro

Esta peça será colada e presa por cavilhas metálicas ao quadro de madeira na posição ilustrada na Figura 5.20.

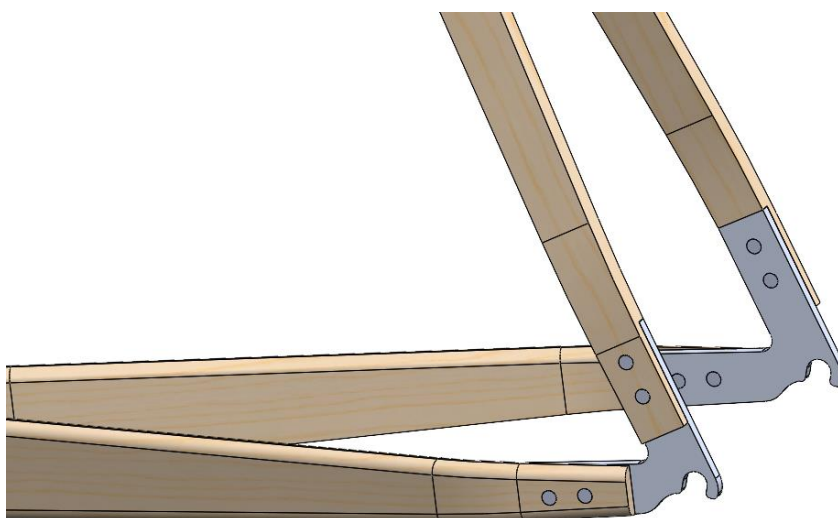


Figura 5.20 - Posição de trabalho do suporte do eixo traseiro

#### 5.4.4 Tipo de resina usada

De madeira a unir as diferentes camadas de madeira, é necessário usar uma resina. Seria possível utilizar cola de madeira, mas não será usado por dois motivos:

- Será necessário unir peças de madeira com peças de alumínio;
- A cola de madeira é desenvolvida para objetos estáticos, tais como móveis e decoração.

Para tal, foi escolhida a resina epóxi da Hexion, modelo Cascophen RS-216-M. Esta resina sintética caracteriza-se por ser resistente à água e calor, recomendada para ambientes exteriores. A resina é usada com o endurecedor FM-60-M, com proporção de 100 partes da resina para 20 do endurecedor. Quando misturados, a resina preparada apresenta uma vida útil de duas horas a 20°C até enrijecer. Deste modo, o carpinteiro dispõe de bastante tempo para alinhar as diferentes camadas de madeira. O tempo mínimo de prensagem é de 10 horas a 20°C [19].

## SIMULAÇÕES DO QUADRO

De forma a determinar se o modelo 3D é viável, é necessário proceder a simulações teóricas que comprovem a rigidez e estabilidade do quadro quando em uso.

### 6.1 Norma ISO 4210-2:2015

Esta norma, publicada em 2015, especifica os requerimentos de segurança e desempenho para o desenho, montagem e testagem de bicicletas para adultos. Aplica-se a bicicletas com a altura de assento compreendida entre 635 mm e 750 mm e que a prática desportiva seja estrada, montanha e de corrida. Esta norma não se aplica a bicicletas de entregas, BMX e a bicicletas reclinadas.

Esta é uma norma europeia que simula o impacto e fadiga da bicicleta durante, aproximadamente, 10 anos de uso[20].

### 6.2 Simplificações

De modo a conseguir aplicar os apoios e as forças no modelo do SolidWorks, foram criadas peças simplificadas. Estas apresentam planos normalizados que permitem recriar as condições de uso da bicicleta.

#### 6.2.1 Garfo

O modelo do garfo foi simplificado de forma a ser possível aplicar os apoios que simulam o solo e a unir o garfo ao quadro. Estas simplificações são visíveis na Figura 6.1.

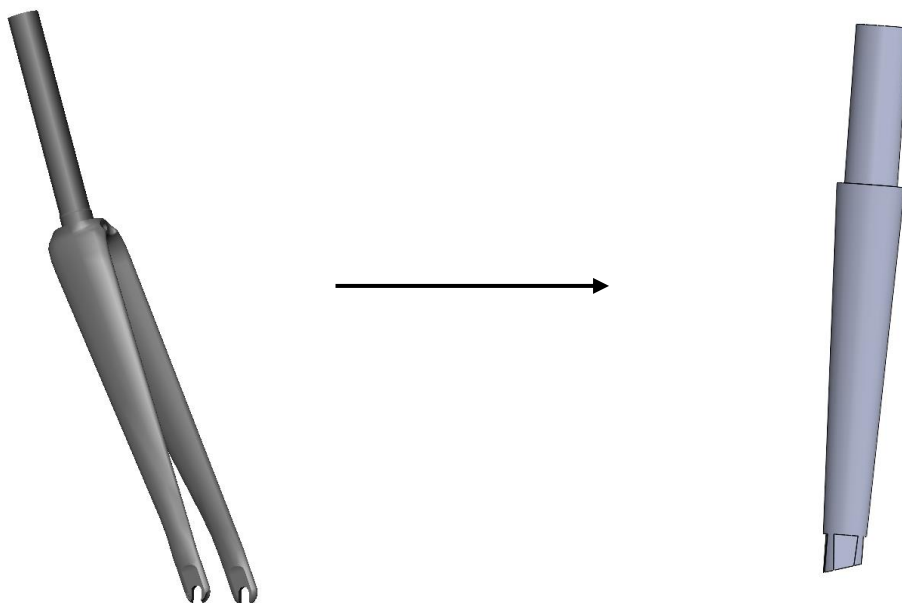


Figura 6.1 - Alterações do modelo 3D do garfo

### 6.2.2 Guiador

De modo a aplicar os esforços necessários no guiador, este foi substituído por uma força e momento (se existir). O momento provém do momento em que o ciclista se encontra em *sprint* e o seu peso deslocado para um dos lados. Deste modo, o guiador foi simplificado a um paralelepípedo onde as forças pudessem ser aplicadas. Esta simplificação pode ser observada na Figura 6.2.

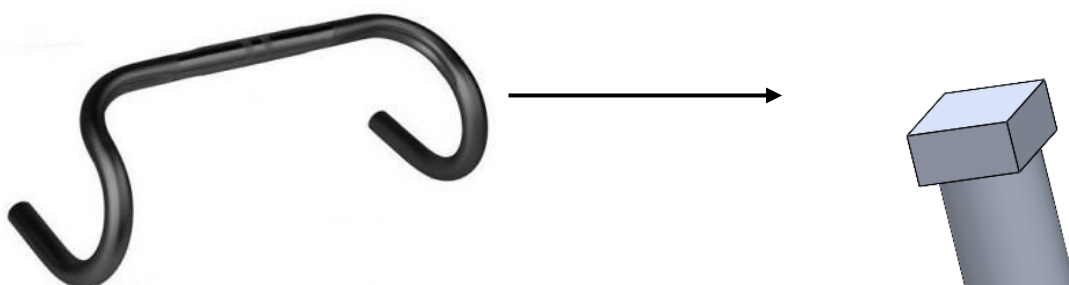


Figura 6.2 - Simplificação do modelo 3D do guiador

### 6.2.3 Pedaleira

De modo a aplicar os esforços necessários na pedaleira, este foi simplificado de modo a ter o plano horizontal paralelo ao solo. Esta simplificação pode ser observada na Figura 6.3.

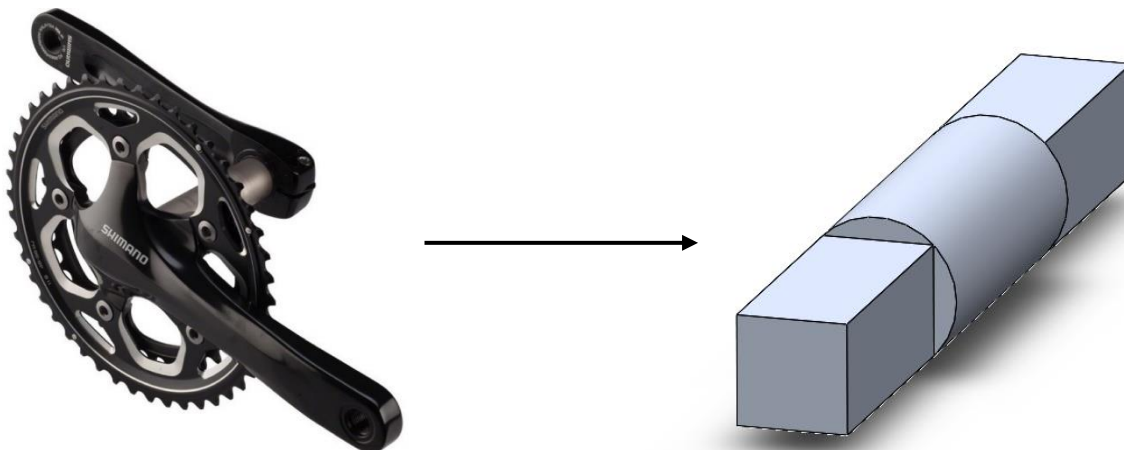
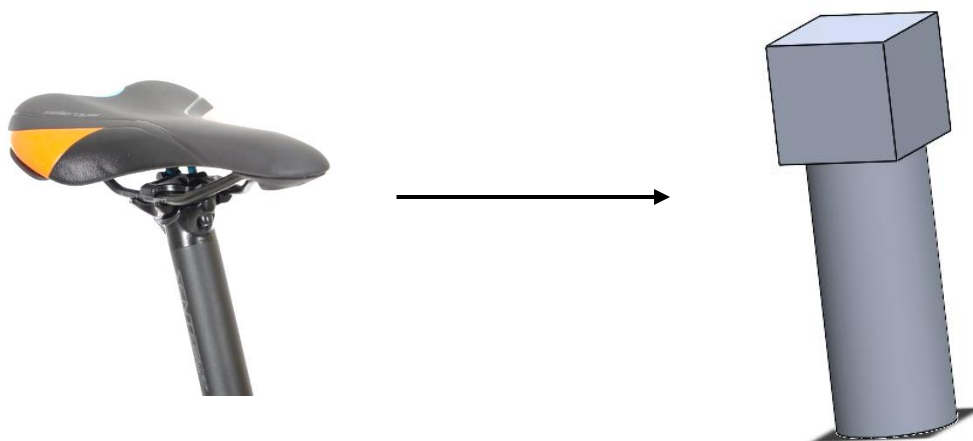


Figura 6.4 - Simplificação do modelo 3D do selim

### 6.2.4 Selim

O selim foi simplificado de modo a ser possível aplicar os esforços necessários. Essa simplificação está visível na Figura 6.4.



### 6.3 Modelo 3D para simulação

Com as simplificações acima referidas, o modelo 3D fica pronto a ser simulado. Este modelo é visível na Figura 6.5.

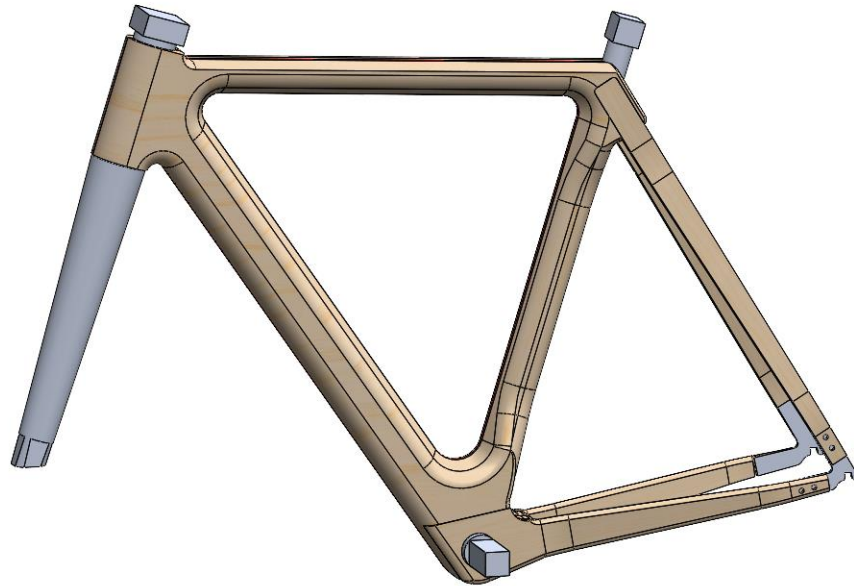


Figura 6.5 - Modelo a ser simulado

Com o modelo concluído, é possível criar a malha deste que se encontra ilustrada na Figura 6.7. Cada elemento triangular da malha tem a dimensão de 8 mm.



Figura 6.7 - Malha do modelo 3D

### 6.3.1 Condições de fronteira

De modo a ser possível simular o contacto entre as rodas e o solo, serão usados três tipos de apoios: apoio móvel, apoio fixo e encastramento.

Para simular a roda da frente será usado um apoio móvel que apenas permite o movimento no eixo Ox, como é possível observar na Figura 6.6.

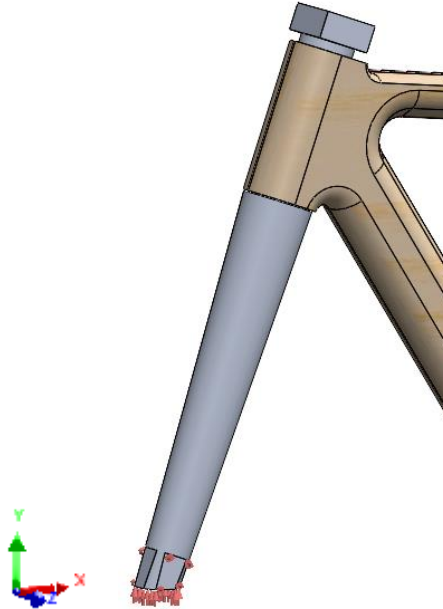


Figura 6.6 - Apoio móvel que simula a roda da frente

Para simular a roda de trás será usado um apoio do tipo dobradiça, que permite a rotação do quadro.

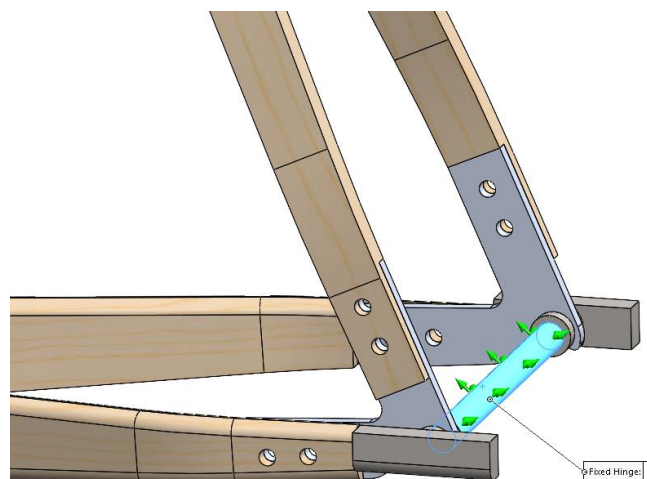


Figura 6.7 - Apoio fixo que simula a roda de trás.

## 6.4 Testes a serem realizados

Durante o ato de pedalar, o corpo humano movimenta-se em diferentes direções, aplicando o seu peso em diversos componentes da bicicleta. Por exemplo, quando o ciclista quer pedalar o mais rápido possível, este levanta-se do selim, alternando a distribuição do seu peso entre o lado direito do guidador e o pedal esquerdo, e o lado esquerdo do guidador e o pedal direito.

Deste modo, é necessário simular diversas aplicações de forças que representam os diferentes estados de ciclismo, sendo estes:

- Pedalar casualmente;
- Pedalar sem estar apoiado no guidador;
- Pedalar em *sprint*;

Para todos os testes, o quadro será submetido aos esforços de um indivíduo de 100 kg tendo em consideração um fator de segurança de 1,5. Para todos os cálculos o valor da gravidade é  $9,81 \text{ m/s}^2$ . A distribuição das forças entre os diferentes componentes da bicicleta provêm da experiência do autor em ciclismo. Nas simulações, o critério usado será o de Von Mises

### 6.4.1 Pedalar casualmente

Quando se pedala sem grande esforço, o peso do ciclista encontra-se distribuído entre o guidador, o selim e os pedais, como se verifica na Figura 6.8.



Figura 6.8 - Ciclista a pedalar casualmente

Para a tal, divisão do peso do ciclista será de 50% no selim, 25% nos pedais e 25% no guidador. Concretamente, traduz-se em 735,75 N exercidos no selim, 183,9375 N exercidos em

cada lado do guidador e 183,9375 N exercidos em cada pedal. Neste caso, como a força no guidador é uniforme nas duas extremidades não existe momento aplicado. Na Figura 6.9 é possível observar a distribuição de forças e apoios na bicicleta.

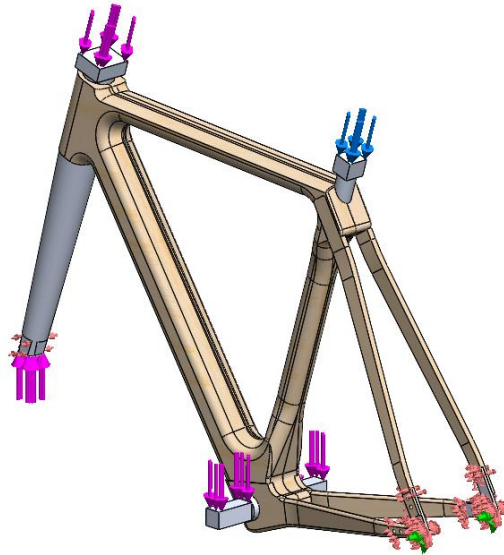


Figura 6.9 - Distribuição das forças no selim, pedais e guidador

Da simulação que o SolidWorks calcula, é possível observar que as zonas do quadro mais solicitadas se encontram circundadas a vermelho na Figura 6.10. Este resultado corresponde ao esperado.

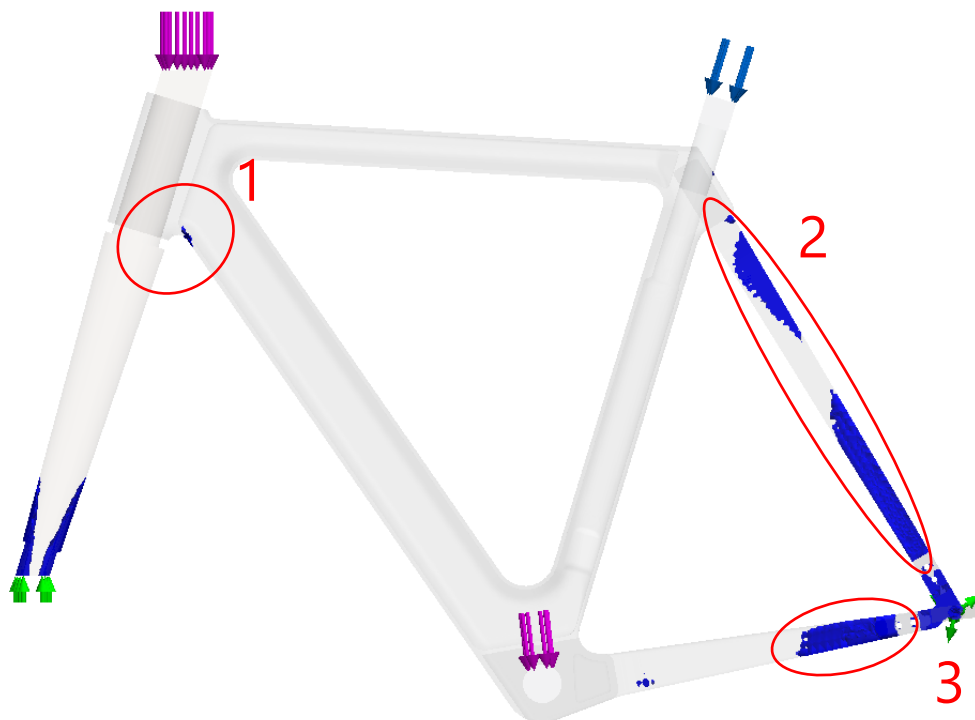


Figura 6.10 - Zonas do quadro mais solicitadas

As tensões nestas zonas foram retiradas do SolidWorks e encontram-se na Tabela 5. Comparando com o valor da tensão de cedência do carvalho (105 MPa), é possível verificar que os esforços são suportados pelo quadro da bicicleta.

Tabela 5 - Tensões nas Zonas 1, 2 e 3

	Tensão (Mpa)
1	2,58
2	4,16
3	6,96

Em relação aos deslocamentos, na Figura 6.11 é possível observar que o maior deslocamento é localizado no apoio do selim. Neste local o deslocamento varia entre 0,13 mm e 0,32 mm. Estes valores são muito reduzidos, o que, usando a bicicleta casualmente, confirma a viabilidade de construção deste quadro de bicicleta em madeira.

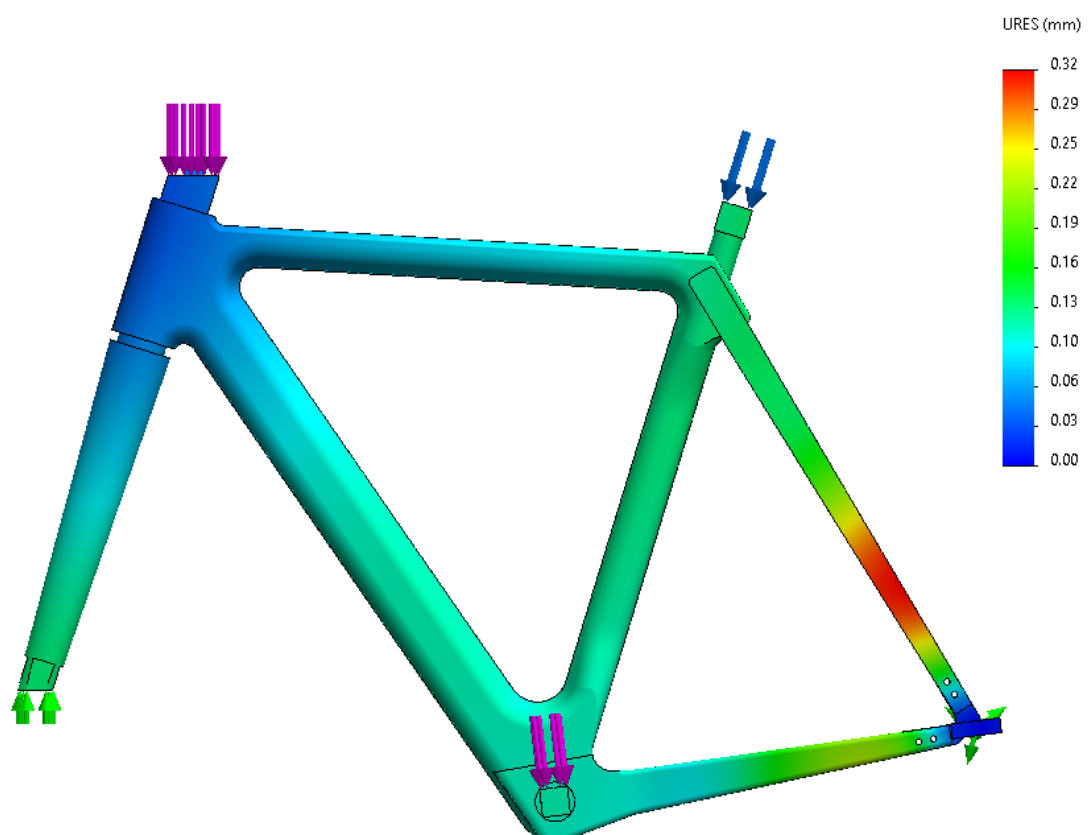


Figura 6.11 - Deslocamento do quadro em uso casual

## 6.4.2 Pedalar sem estar apoiado no guidador

É algo comum pedalar a bicicleta sem estar apoiado no guidador, mantendo o equilíbrio. Essa posição está ilustrada na Figura 6.12.



Figura 6.12 - Pedalar sem estar apoiado no guidador

Nesta posição, a divisão do peso do ciclista será de 75% no selim e 25% nos pedais, o que equivale a 1,103.625 N aplicados no selim e 183.9375 N aplicados em cada pedal. Na Figura 6.13 é possível observar a distribuição de forças e apoios na bicicleta.

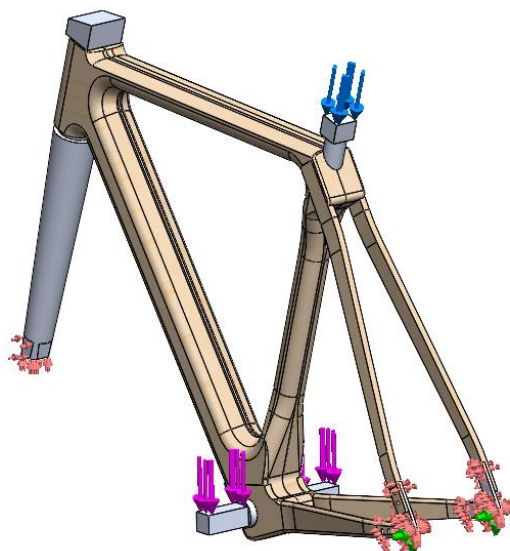


Figura 6.13 - Distribuição das forças no selim e nos pedais

No caso de pedalar sem estar apoiado no guiador, as zonas do quadro mais críticas são as mesmas que pedalando casualmente. As tensões variam pouco relativamente ao estudo anterior. De notar que, como o peso se encontra deslocado para a retaguarda da bicicleta, o apoio do selim apresenta uma tensão mais elevada, como é visível na Tabela 6.

Tabela 6 - Tensões no quadro quando o ciclista não está apoiado no guiador

	Tensão (Mpa)
1	2,31
2	4,92
3	9,81

Comparando com o estudo anterior é possível observar que o deslocamento é bastante similar à simulação anterior, mas deslocada para a traseira da bicicleta, o que é expectável devido à diferente distribuição das forças. O valor dos deslocamentos não varia muito relativamente ao estudo anterior, sendo que são bastante reduzidos, como é perceptível na Figura 6.14.

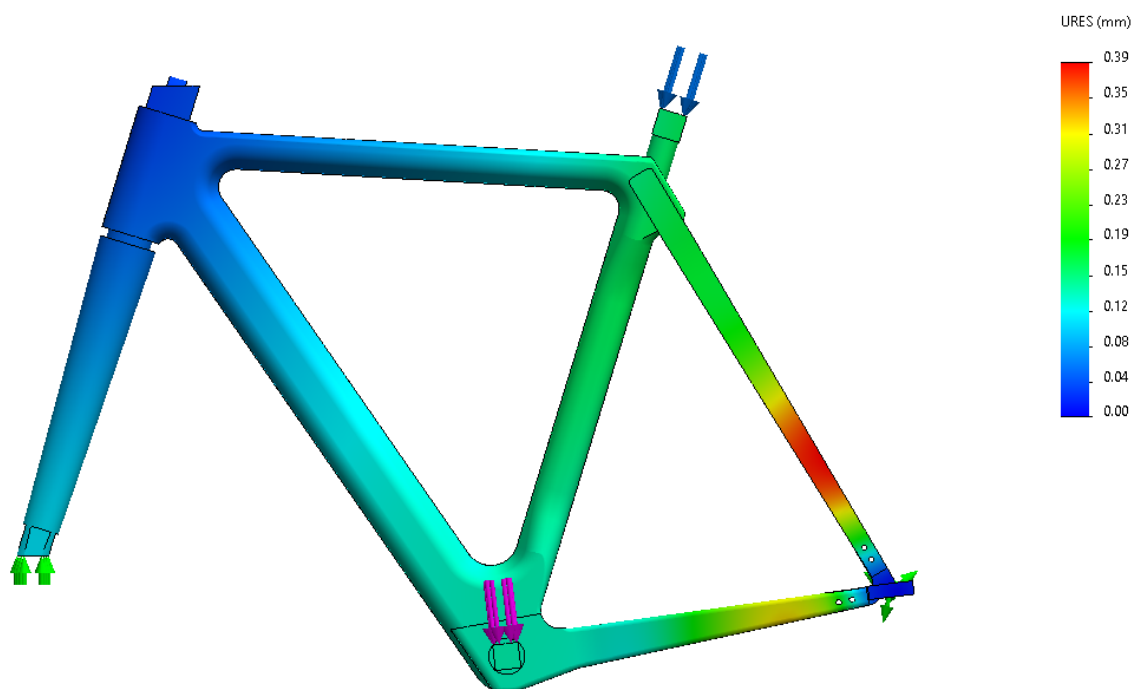


Figura 6.14 - Deslocamentos do quadro quando o ciclista não se encontra apoiado no guiador

### 6.4.3 Pedalar em *Sprint*

Quando o ciclista pretende acelerar da forma mais rápida possível, este levanta-se do selim e inclina o seu corpo para a frente. Esta posição encontra-se ilustrada na Figura 6.15. Numa situação de *sprint*, o corpo do ciclista balança de um lado da bicicleta para o outro, alternando a distribuição do peso.



Figura 6.15 - Pedalar em *sprint*

Nesta posição, a divisão do peso do ciclista será de 50% no pedal e 50% no guiador, o que equivale a 735,75 N aplicados no pedal e 735,75 N aplicados num lado do guiador. Como a força do guiador não é uniforme nas duas extremidades, é aplicado um momento em que a distância ao centro é de metade da largura do guiador. Sabendo que o guiador tem a largura de  $r = 40 \text{ cm}$ , é possível calcular o momento aplicado:

$$M = F * r = 735,75 * \frac{0,4}{2} = 147.15 \text{ N.m}$$

Na Figura 6.16 é possível observar a distribuição de forças e apoios na bicicleta. De modo a ser possível aplicar o momento, foi adicionada uma superfície cilíndrica no guidador.

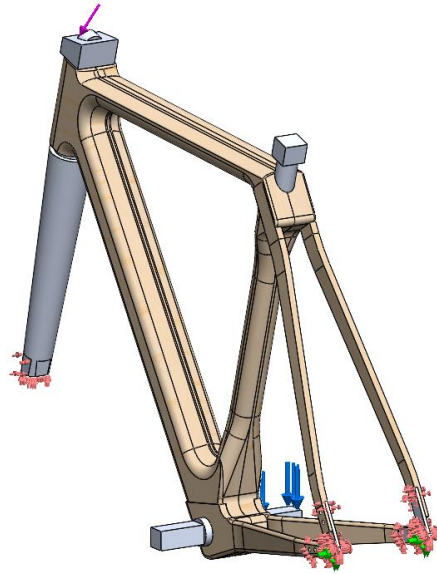


Figura 6.16 - Distribuição das forças no pedal e no guidador

Na situação de pedalar em sprint, as forças aplicadas não são simétricas logo, o quadro estará sujeito a maior esforço de torção. Devido a este fenómeno, a zona crítica do quadro é a circundada a vermelho na Figura 6.17.

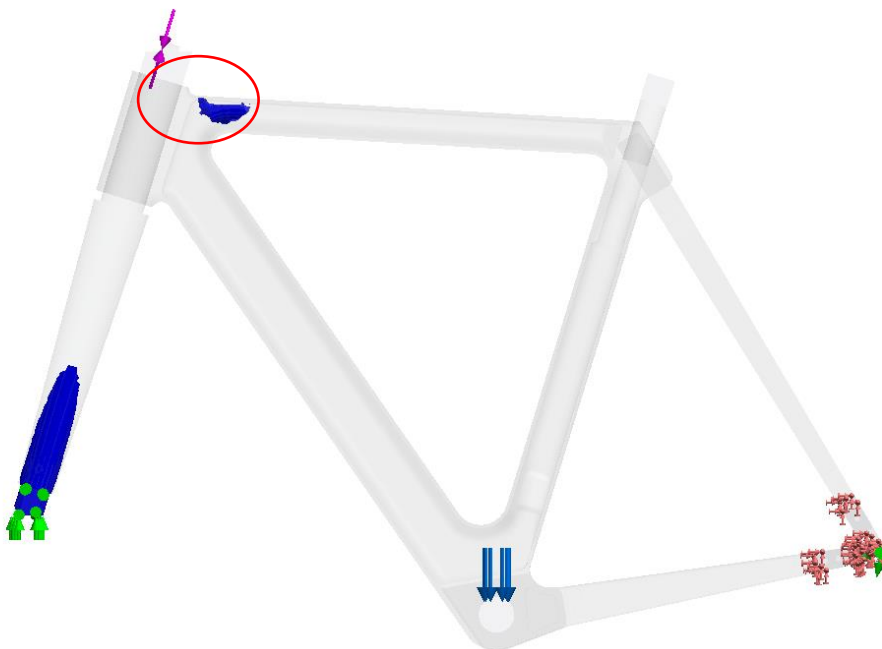


Figura 6.17 - Zona crítica do quadro quando sujeito a torção

Nesta zona, o valor mais elevado de tensão é igual a 86,25 MPa, inferior aos 105 MPa de tensão de cedência do carvalho. Em relação ao deslocamento, é expectável que este seja superior ao dos estudos anteriores. Na Figura 6.18 é possível observar que o deslocamento máximo do quadro é de 16,92 mm. Este valor é bastante mais elevado que os deslocamentos determinados anteriormente, mas, tendo em consideração que a madeira é um material flexível, este deslocamento não se apresenta como um problema para o bom funcionamento do quadro.

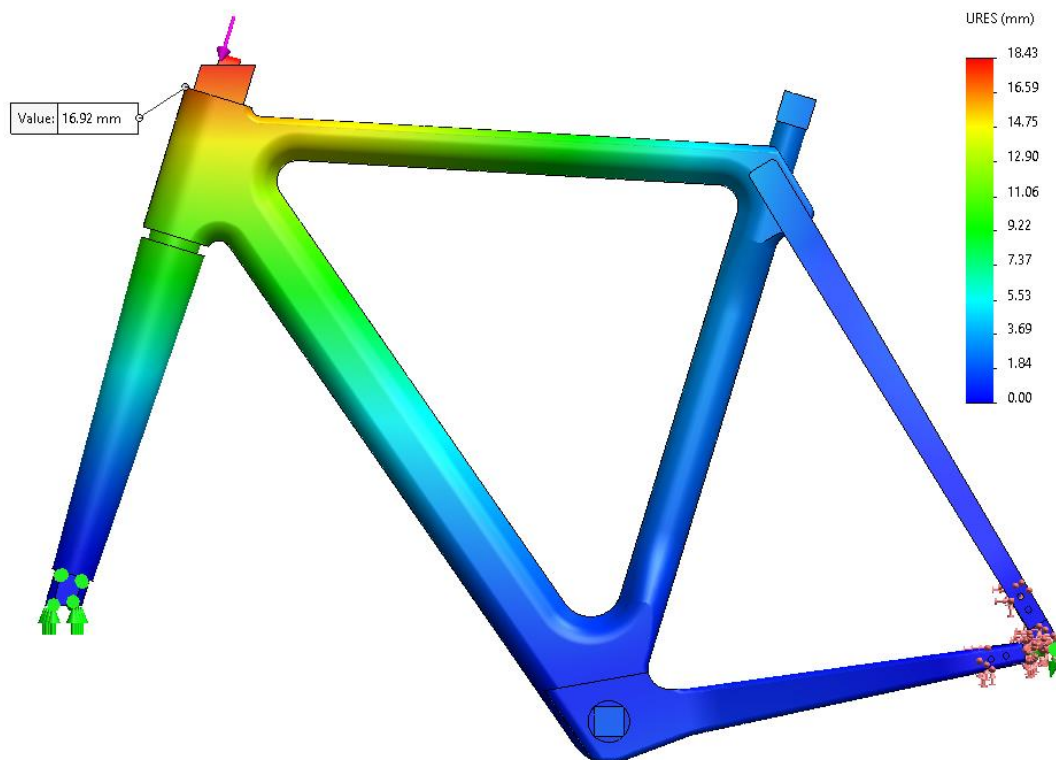


Figura 6.18 - Deslocamentos do quadro quando o ciclista se encontra em sprint



## CONSTRUÇÃO DO QUADRO

O quadro da bicicleta é construído usando madeira de carvalho, 5 peças de alumínio e resina epóxi. Na Figura 7.1 é possível observar uma vista explodida de todos os componentes do quadro da bicicleta. Um dos objetivos iniciais da dissertação seria a construção, como referido no capítulo da estrutura da dissertação. Mas o valor do orçamento para a maquinação CNC foi inesperado e demasiado elevado, o que não permitiu a sua construção. Deste modo, este capítulo é abordado de forma a explicar os passos a seguir para a construção desta bicicleta.

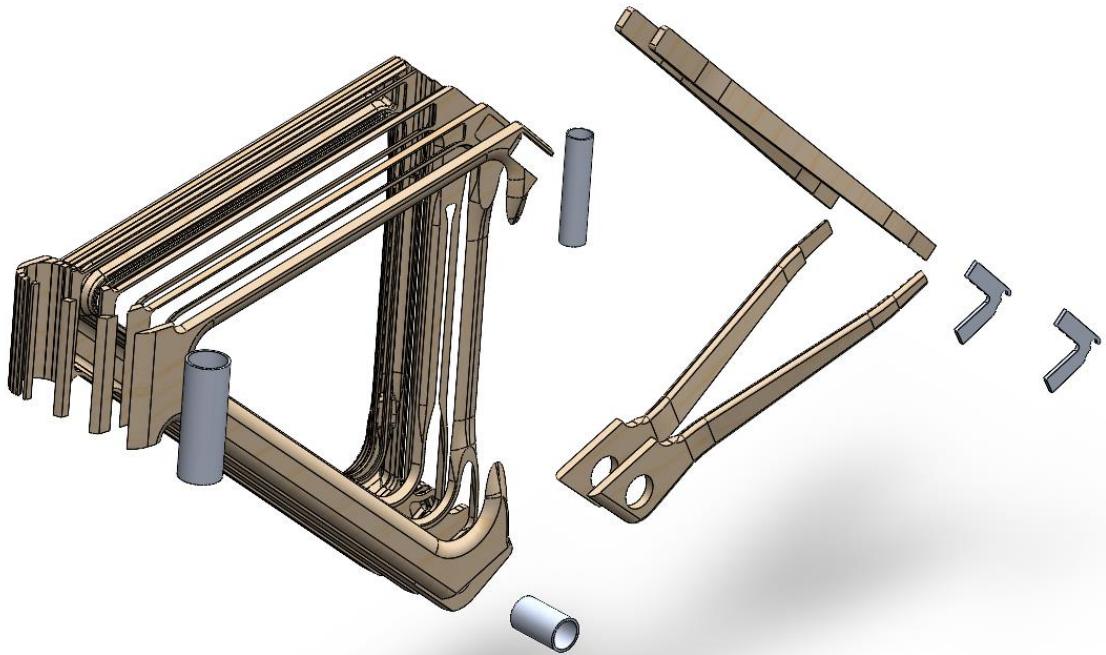


Figura 7.1 - Vista explodida do quadro

## 7.1 Construção do triângulo principal

A construção do quadro da bicicleta começa com a fabricação do triângulo principal. Neste componente serão coladas 3 peças metálicas, sendo elas o tubo da direção, o tubo do selim e o tubo do movimento central. Estas peças são essenciais ao funcionamento da bicicleta, pois, sem elas, a madeira estaria exposta a grande desgaste. Na Figura 7.2 é possível observar a forma final do triângulo principal.

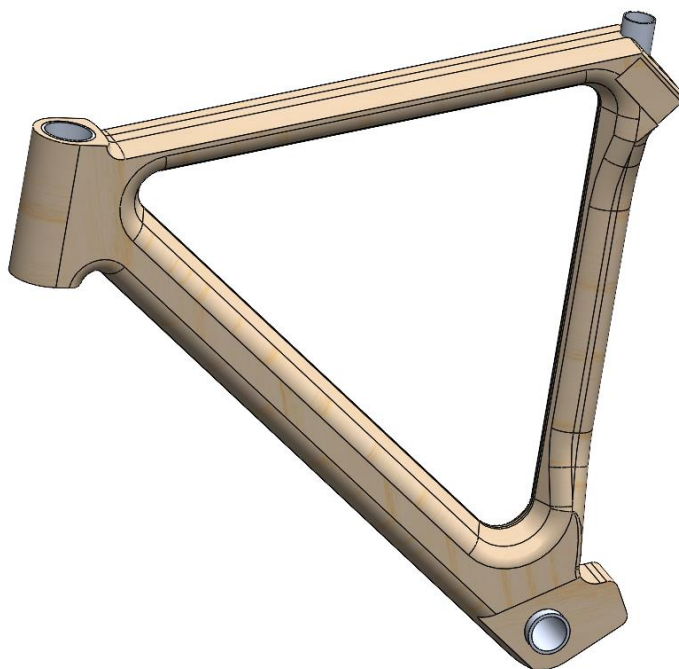


Figura 7.2 - Triângulo principal

Este componente é feito a partir da colagem de lâminas de madeira com uma certa variação na direção, que permita suportar os esforços de diferentes direções. As lâminas em questão terão 9 mm de espessura e uma largura que varia entre 120 mm e 170 mm. A disposição das lâminas de madeira é tal que as uniões destas estejam sobrepostas, como a Figura 7.3 indica.

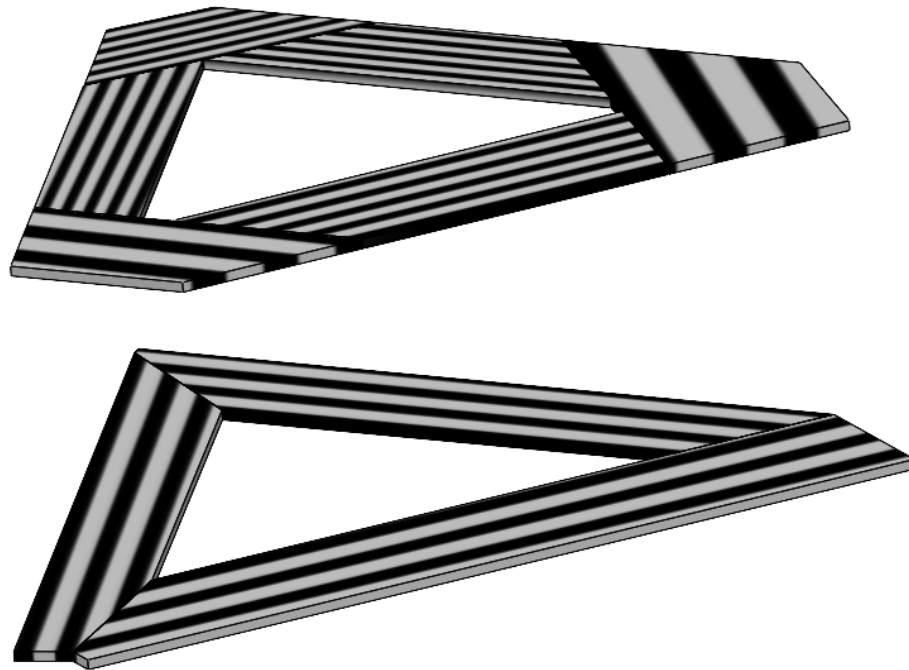


Figura 7.3 - Direção dos veios da madeira e sobreposição das uniões das lâminas de madeira

Cada metade do triângulo é composta por dois destes conjuntos colados, perfazendo uma espessura de 46 mm. De seguida, cada metade será maquinada em CNC, o que vai permitir obter o formato final do triângulo principal.

O primeiro passo na máquina CNC é o corte do perfil do triângulo, tal como ilustrado na Figura 7.4. Como a fabricação de bicicletas será de baixa série, a maquinação CNC é a mais adequada.



Figura 7.4 - Perfil do triângulo principal

De seguida o interior das metades é maquinado seguido pelo exterior, sendo que o resultado desta operação é visível na Figura 7.5.

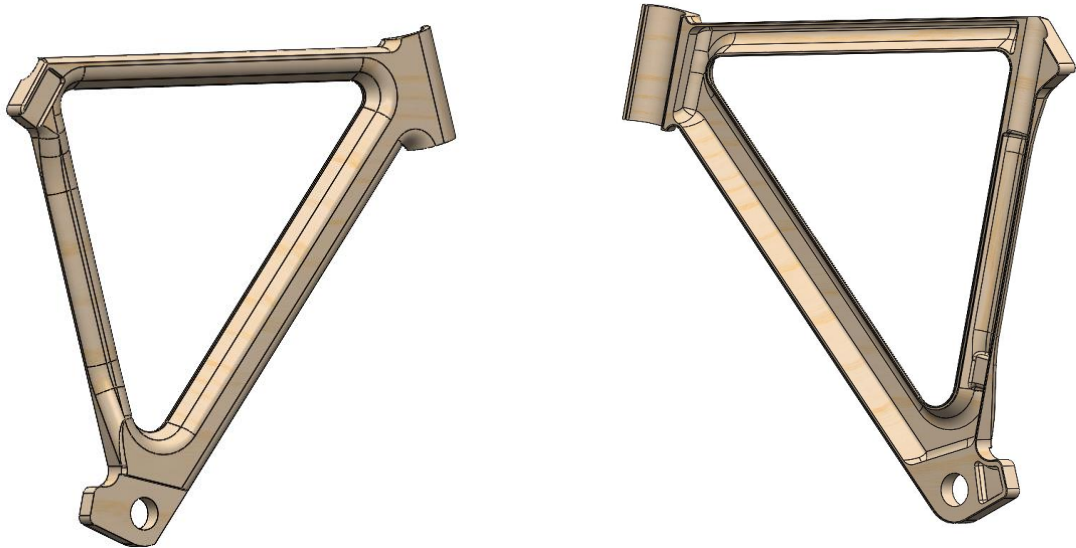


Figura 7.5 - Exterior e interior de uma metade do triângulo

De maneira que a união das duas metades do triângulo seja mais forte e que o alinhamento destas seja mais preciso, foi incorporada um encaixe do tipo macho-fêmea. Este detalhe encontra-se visível na Figura 7.6 e na Figura 7.7 é possível observar o modo de encaixe das duas metades.

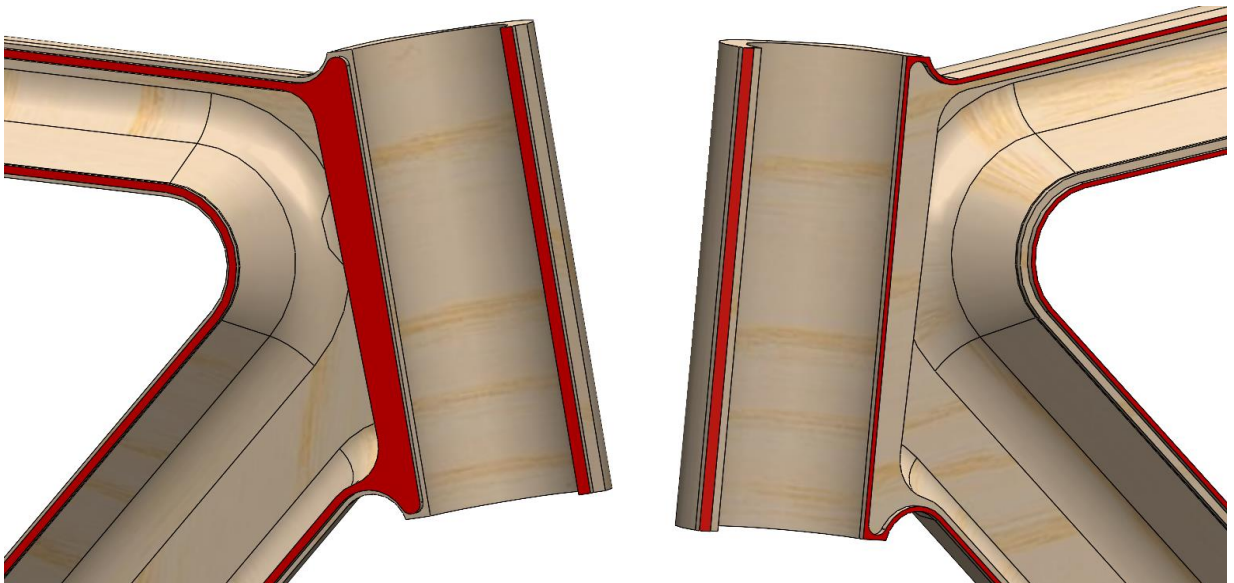


Figura 7.6 - Encaixe macho fêmea

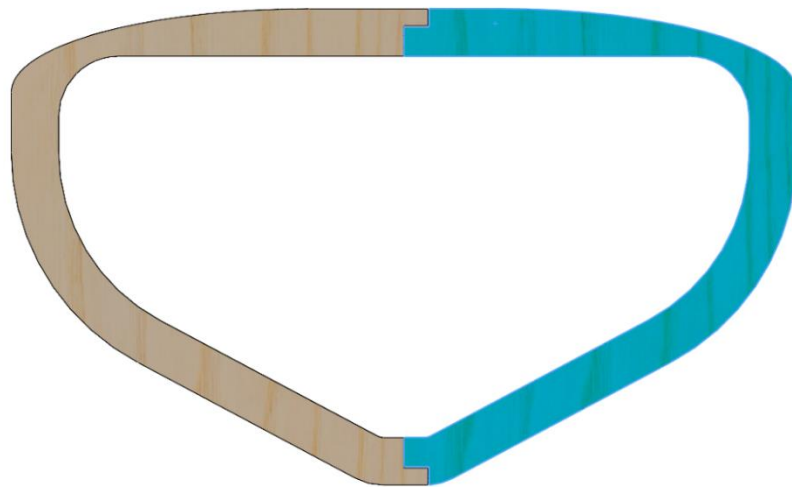


Figura 7.7 - Vista em corte da união entre as duas metades

Usando este tipo de união, a superfície de contacto entre as duas metades aumenta em 50%. Deste modo, a quantidade de resina epóxi usada também aumenta, elevando a rigidez da união entre as duas metades do triângulo principal.

De seguida, as duas metades são coladas com resina epóxi. Ao mesmo tempo também são coladas as peças metálicas: o tubo de direção, manga de alumínio e movimento central. Estas peças são coladas ao mesmo tempo que as metades de madeira pois certificam o alinhamento das duas metades e não existirá tanto excesso de resina. O conjunto final encontra-se visível na Figura 7.8. Quando estiver seco, a junção entre as duas metades deve ser lixada de modo a remover o excesso de resina epóxi e a alisar a união.

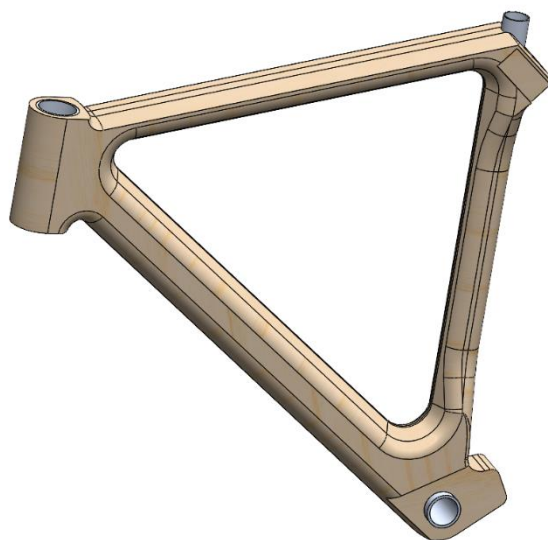


Figura 7.8 - Triângulo principal completo

## 7.2 Construção do apoio do selim e do apoio da corrente

Estas peças do quadro unem o triângulo principal à roda traseira e devem apresentar uma geometria peculiar que não colida com a roda. Estas peças encontram-se salientadas a vermelho na Figura 7.9.

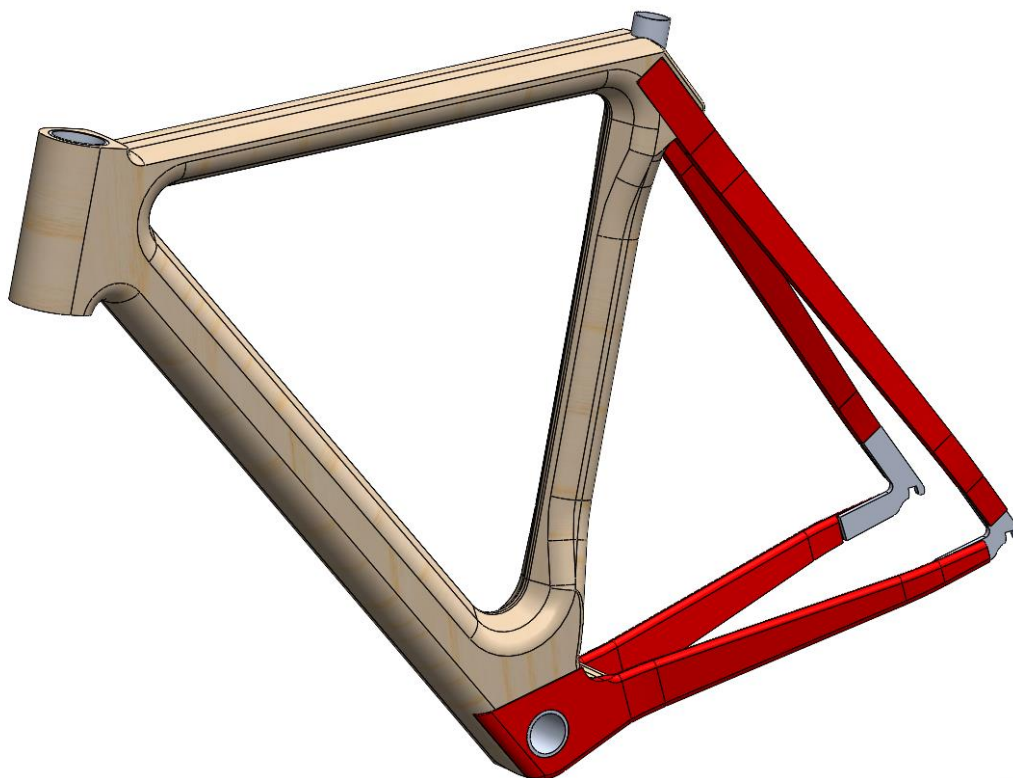


Figura 7.9 - Apoio do selim e apoio da corrente salientados

Estas peças são obtidas pela colagem de lâminas finas de madeira numa prensa que lhes confira a curvatura desejada. A direção dos veios da madeira é paralela em todas as lâminas, pois os esforços a que estas peças estão sujeitas são tração, compressão e flexão ao longo dos veios. Neste caso, cada lâmina terá uma espessura compreendida entre 1 e 2 mm. Para concretizar a curvatura das peças é necessário criar uma prensa como a da Figura 7.10.

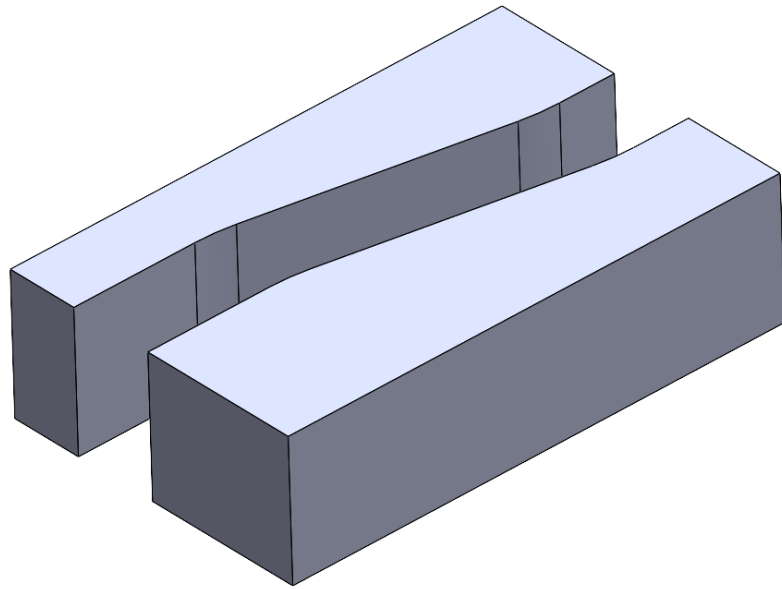


Figura 7.10 - Prensa usada para curvar as lâminas de madeira

As lâminas de madeira apresentam 440 mm de comprimento e 90 mm de largura, ilustradas na Figura 7.11.



Figura 7.11 - Lâminas de madeira

Serão usadas entre 5 e 10 lâminas de madeira, dependendo da espessura, de modo a perfazer 10 mm de espessura. As lâminas são colocadas e coladas na prensa de modo a encruvar. Serão aplicados grampos em cada lado da prensa de modo a juntar as lâminas e a minimizar as cavidades entre estas. O resultado da prensa é visível na Figura 7.13.

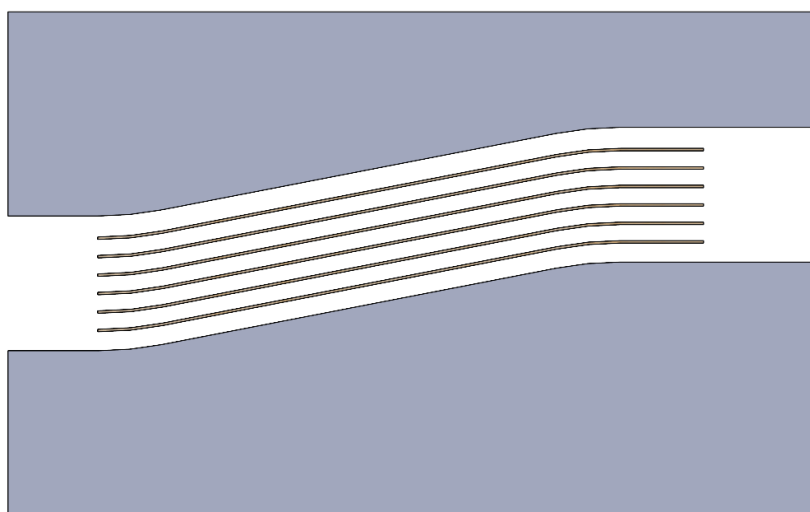


Figura 7.12 - Lâminas encurvadas na prensa

De seguida, a peça sofre diferentes processos de carpintaria até atingir o formato final, visível na Figura 7.13. Os furos onde serão colocadas as cavilhas serão feitos posteriormente ao fabrico do suporte do eixo traseiro, de modo a garantir a concentricidade de ambos.

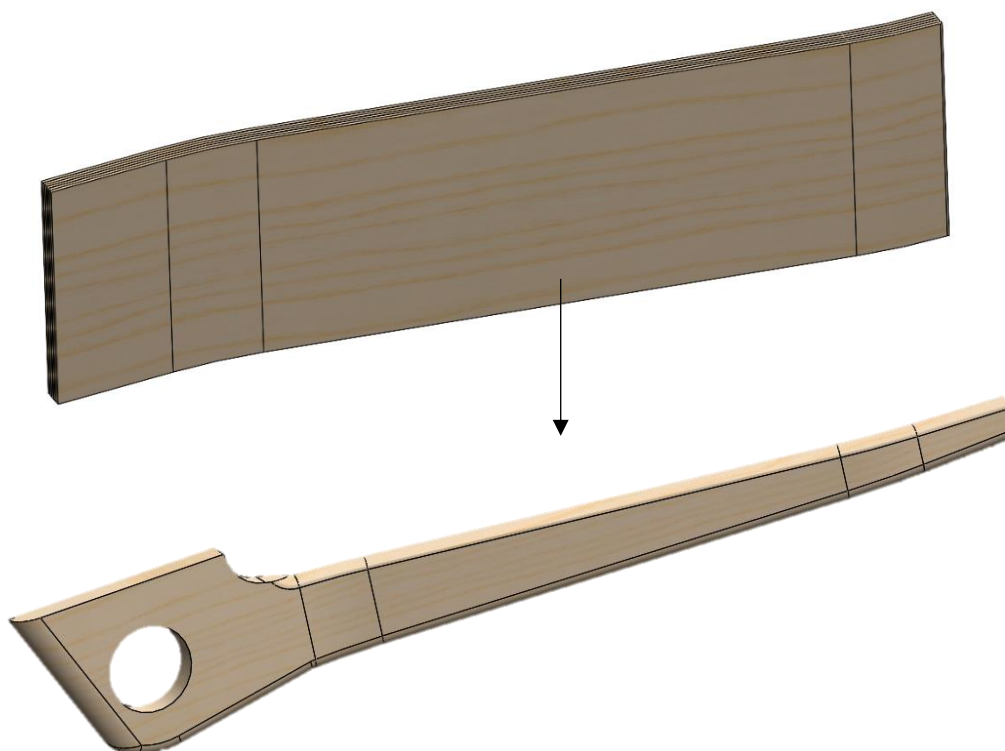


Figura 7.13 - Transformação da peça prensada para o apoio da corrente

O apoio do selim é construído similarmente ao apoio da corrente, usando uma prensa diferente. As lâminas terão uma largura de 40 mm e comprimento de 460 mm. Na parte superior da Figura 7.14 é possível observar o apoio do selim após a saída da prensa, e na parte inferior

encontra-se representada o apoio do selim com as retificações feitas. Similarmente ao apoio da corrente, os furos onde serão colocadas as cavilhas serão feitos posteriormente ao fabrico do suporte do eixo traseiro, de modo a garantir a excentricidade de ambos.

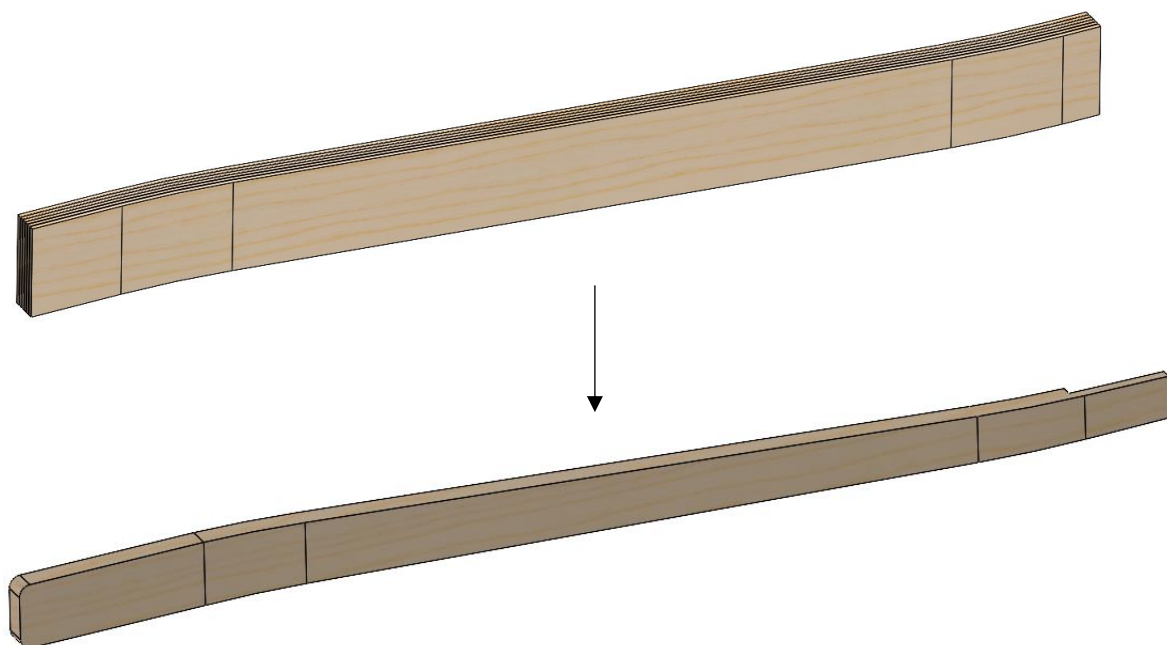


Figura 7.14 - Transformação da peça prensada para o apoio do selim

### 7.3 Construção do suporte do eixo traseiro

Os suportes dos eixos traseiros são construídos a partir de uma barra de 5 mm de espessura de alumínio da liga 6061-T6 pois é uma liga bastante usada na construção de quadros de bicicletas [21]. O processo usado para a obtenção dos suportes do eixo traseiro é maquinação CNC. A peça final é visível na Figura 7.15.

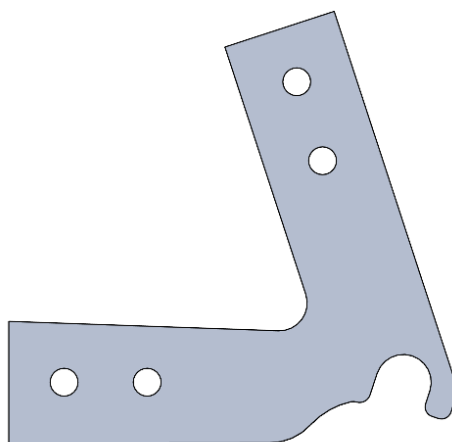


Figura 7.15 - Suporte do eixo traseiro

## 7.4 União do triângulo principal aos apoios do selim e da corrente

A união entre o triângulo principal e os apoios do selim e da corrente é realizada por resina epóxi. Na Figura 7.16 é possível observar as superfícies de contacto que vão permitir a colagem entre o triângulo principal e os apoios da corrente.

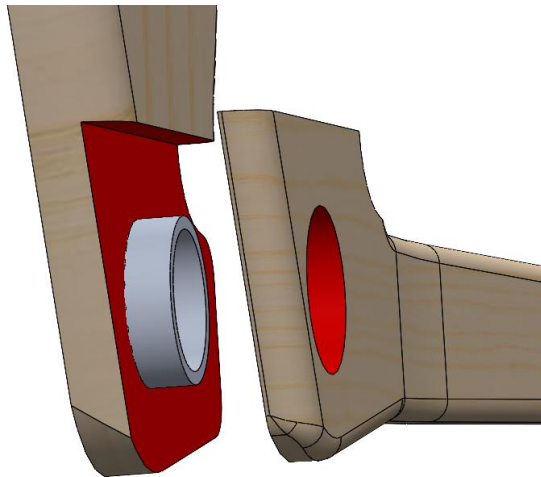


Figura 7.16 - Superfícies de contacto (a vermelho) entre o triângulo principal e o apoio da corrente

Do mesmo modo, o triângulo principal e os apoios do selim apresentam as superfícies de contacto da Figura 7.17.

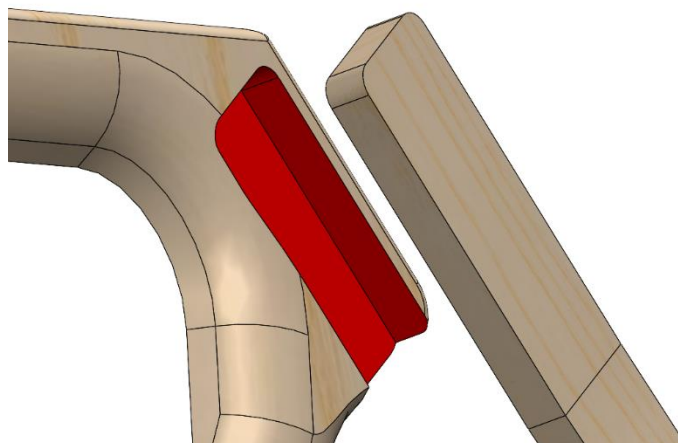


Figura 7.17 - Superfícies de contacto (a vermelho) entre o triângulo principal e o apoio do selim

## 7.5 União do suporte do eixo traseiro

A união entre o suporte do eixo traseiro e aos apoios é feito por resina epóxi e por cavilhas metálicas, como referido anteriormente. As cavilhas usadas são de alumínio e provêm da FMS [22]. Na Figura 7.18 é possível observar as superfícies de contacto entre o suporte do eixo traseiro, o apoio do selim, o apoio da corrente e as cavilhas. Estas superfícies serão unidas por resina epóxi.

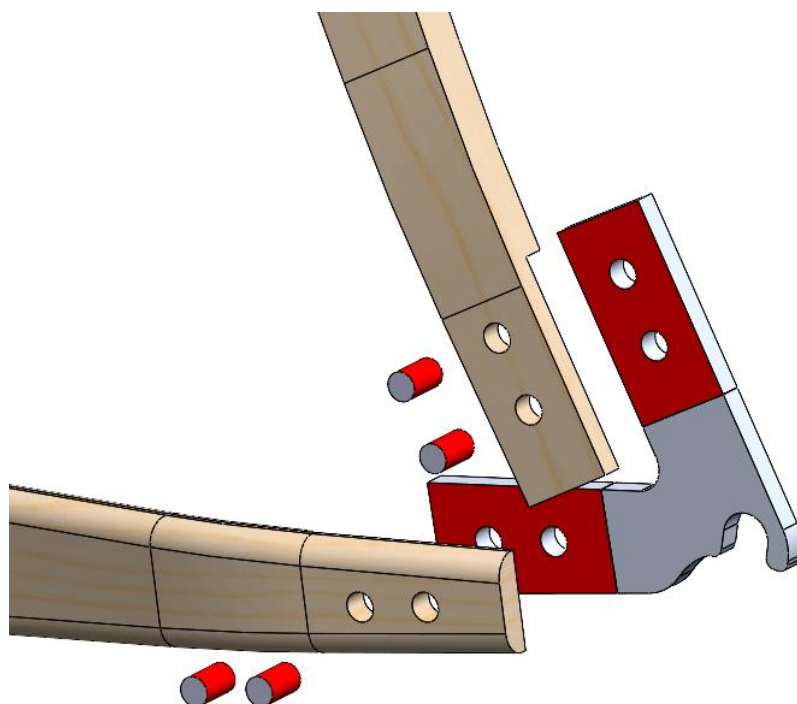


Figura 7.18 - Superfícies de contacto entre o suporte do eixo traseiro, os apoios e as cavilhas

## 7.6 Bicicleta na forma final

Estando o quadro da bicicleta retificado, são aplicadas diversas camadas de verniz resistente a ambientes extremos de modo a selar a madeira e a ficar protegida do ambiente e de possíveis mossas. De seguida os componentes são montados no quadro, de modo a obter uma bicicleta completa, pronta a rolar. Na Figura 7.19 é possível observar a bicicleta no estado final.



Figura 7.19 - Bicicleta no estado final

## CONCLUSÕES

Atualmente a madeira está a ser empregue na construção de quadros de bicicleta de alta performance, acrescentando valor estético e monetário. Este material é caracterizado pela sua elevada resistência à fadiga e por apresentar uma tensão de cedência suficiente para aguentar os esforços a que vai estar sujeito.

De modo a ser possível criar vários quadros ao ano, foi proposta a construção auxiliada por CNC. Deste modo, é facilitado o fabrico do quadro e apresenta melhor precisão. Este sistema construtivo pode ser supervisionado por alguém que não é experiente em carpintaria.

De modo a ser possível aplicar rolamentos ao quadro, é necessário acrescentar tubos de alumínio com as dimensões próprias para tal.

As simulações desenvolvidas possibilitam prever que o quadro desenvolvido sustenta os esforços a que estará sujeito. De modo a confirmar os resultados teóricos, seria necessário construir o quadro e sujeitar este aos testes da Norma ISO 4210-2:2015.

As tensões observadas no quadro, inferiores a 6 Mpa, são muito inferiores à tensão de cedência do carvalho. A tensão mais elevada, de 86,25 Mpa, foi observada perto do tubo de direção.





# BIBLIOGRAFIA

- [1] Câmara Municipal de Lisboa, "Como Pedala Lisboa," [https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade\\_temas/mobilidade/documentos/Como\\_Pedala\\_Lisboa.pdf](https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade_temas/mobilidade/documentos/Como_Pedala_Lisboa.pdf), Jun. 2021.
- [2] R. Delgado Oliveira Nunes Cravo and D. José Ângelo Guerreiro da Silva, "A Evolução do Desenvolvimento Sustentável em Portugal nos últimos 30 anos," 2018.
- [3] "1ª bicicleta, construída por Karl von Drais," <https://reginajeffers.blog/2017/07/05/the-running-horse-a-precursor-for-the-modern-day-bicycle/>.
- [4] ObjectWiki, "McCammon Safety Bicycle," [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_the\\_bicycle](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_bicycle).
- [5] "Principais componentes da bicicleta," <https://www.pedalibre.es/tag/bicicletas/page/306>.
- [6] P. Manuel and T. Ribeiro, "Análise dinâmica de um quadro de bicicleta Dissertação do MIEM," Porto, 2013.
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/1903\\_Tour\\_de\\_France](https://en.wikipedia.org/wiki/1903_Tour_de_France), "Vencedor do primeiro Tour de France."
- [8] Carlos Pinto, "Carbon Team, em Vouzela, aposta na fibra de carbono," [https://www.mountainbikes.pt/noticias/carbon-team-em-vouzela-aposta-na-fibra-de-carbono\\_231328\\_102.html](https://www.mountainbikes.pt/noticias/carbon-team-em-vouzela-aposta-na-fibra-de-carbono_231328_102.html), 2021.
- [9] Forest Products Laboratory, United States. Army-Navy-Civil Committee on Aircraft Design Criteria, and United States. Aeronautical Board, *Design of wood aircraft structures*. 1944.
- [10] Jonathan Maus, "Out of cash and employees, Renovo calls it quits," <https://bikeportland.org/2018/10/04/out-of-cash-and-employees-renovo-calls-it-quits-290561>, 2018.
- [11] Japanese Industrial Standards Committee, Standards Board, and Technical Committee on Consumer Life Products, "JIS D 9401: Frame -- Assembly for bicycles," Japan, 2010.
- [12] I. Iturrioz, "Simulation of Mountain Bike Dynamics," Final Year Project Thesis, University of Glasgow, 2008.
- [13] W. R. Boterman, "Social & Cultural Geography Carrying class and gender: Cargo bikes as symbolic markers of egalitarian gender roles of urban middle classes in Dutch inner cities," 2018, doi: 10.1080/14649365.2018.1489975.

- [14] Mechanic Cycling, "A Visual History of Cargo Bikes," <https://mechaniccycling.com/blogs/blog/a-visual-history-of-the-cargo-bike>, 2019.
- [15] et all N. K. Mandavgade, "Concept of User Friendly Modified Folding Bicycle," Nagpur, 2014.
- [16] Edu Capivara, "Quadros de bicicleta e seus formatos," <https://pedaleria.com/quadros-de-bicicleta-formatos/>, 2015.
- [17] R. Catherine, *Shapes in Math Science and Nature: Squares Triangles and Circles*. 2014.
- [18] S. Pequini, "Ergonomia aplicada ao design de produtos: um estudo de caso sobre o design de bicicletas," USP, São paulo, 2005.
- [19] J. Motta, J. Oliveira, and J. Paes, "Avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com madeira de teca (*Tectona grandis*)," 2014.
- [20] "BS EN ISO 4210-2:2015 - Cycles-Safety requirements for bicycles— Part 2: Requirements for city and trekking, young adult, mountain and racing bicycles," 2015
- [21] A. Manes, L. Peroni, M. Scapin, and M. Giglio, "Analysis of strain rate behavior of an Al 6061 T6 alloy," *Procedia Eng*, vol. 10, pp. 3477–3482, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.PRO-ENG.2011.04.573.
- [22] F. Marques da Silva SA, "CAVILHA REDONDA DE ALUMÍNIO," [https://www.fms.pt/pt/aluminio/cavilhas/cavilha\\_redonda\\_de\\_alumino.html](https://www.fms.pt/pt/aluminio/cavilhas/cavilha_redonda_de_alumino.html), 2022.