



Universidade de Aveiro
2021

**Tiago dos Santos
Abrantes**

**DESENVOLVIMENTO DE CHASSI DE BICICLETA
ELÉTRICA EM MATERIAL NATURAL,
ECOMOBILIDADE**



Universidade de Aveiro
2021

**Tiago dos Santos
Abrantes**

DESENVOLVIMENTO DE CHASSI DE BICICLETA ELÉTRICA EM MATERIAL NATURAL, ECOMOBILIDADE

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos UIDB/00481/2020, UIDP/00481/2020 e POCI-01-0145-FEDER-032486 - Fundação para a Ciência e a Tecnologia; e CENTRO-01-0145 FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

O júri

Presidente

Prof. Doutor Victor Fernando Santos Neto
Professor Auxiliar em Regime Laboral, Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Pedro Miguel Soares Ferreira
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Um agradecimento ao Professor Doutor António Ramos e ao Professor Doutor Carlos Relvas pela disponibilidade prestada no esclarecimento de dúvidas e acima de tudo um agradecimento pela compreensão demonstrada ao longo de todo o processo de realização do trabalho.

Um agradecimento ao Eng^o António Festas, responsável técnico laboratorial do Departamento de Engenharia Mecânica, por todo o apoio prestado no fabrico dos diversos componentes do projeto e pela partilha de conhecimentos relacionados com a área de maquinação por controlo numérico computadorizado.

Um agradecimento, à minha família, o meu muito obrigado por todo o apoio ao longo dos diversos anos, não poderia deixar de referir especialmente os meus pais, pelo sacrifício realizado, pois sem eles, não seria possível atingir este objetivo.

Por fim, o meu agradecimento, a todos os companheiros de estudo, todas as pessoas com quem partilhei momentos e a todos os meus amigos que me acompanham ao longo da vida.

palavras-chave

Mobilidade sustentável, bicicleta elétrica, quadro de bicicleta, materiais naturais, otimização topológica, prototipagem

resumo

Atualmente, os problemas ambientais associados a mobilidade são uma questão que levanta cada vez mais preocupações por parte da sociedade. Desta forma, o aumento da utilização de veículos elétricos de duas rodas em ambiente urbano tem surgido como meio para facilitar o deslocamento nas grandes cidades, em alternativa aos veículos com motor a combustão. Na presente dissertação, foi desenvolvido um quadro de bicicleta com apoio elétrico, com utilização de materiais naturais. Usualmente este componente é maioritariamente concebido em materiais metálicos e compósitos como a fibra de carbono. Apesar das boas propriedades mecânicas, o processo de obtenção destes materiais resulta num elevado impacto ambiental.

Inicialmente no processo de desenvolvimento foram definidos os requisitos, as especificações e as dimensões da estrutura. Em seguida, na fase de desenvolvimento conceptual foi utilizada uma metodologia de otimização topológica para obter um conceito com reduzida massa sem comprometer a rigidez. A geometria obtida foi adaptada de forma a ser compatível com o fabrico subtrativo por maquinaria por controlo numérico computadorizado.

O trabalho culminou com a construção de um protótipo em painéis de fibra de média densidade (MDF), com a junção de componentes metálicos de reforço, para inclusão dos restantes elementos da bicicleta. Do protótipo construído conclui-se que um quadro em MDF apesar de ser sustentável, apresenta uma massa superior em relação a maioria dos quadros do mercado.

keywords

Sustainable mobility, electric bicycle, bicycle frame, natural materials, topology optimization, prototyping

abstract

Nowadays, environmental problems associated with mobility are an issue that raises increasingly more concerns in society. Thus, the increased use of electric wheeled vehicles in an urban environment has emerged as means to facilitate travel in large cities and as an alternative to vehicles with combustion engine.

In this study, an electric bicycle frame was developed, using natural materials. Usually, this component is mainly designed in metallic and composite materials such as carbon fiber. Despite the good mechanical properties, the obtaining procedures of these materials results in a high environmental impact. Initially in the development process, the requirements, the specifications and the dimensions of the structure were defined. Afterwards, in the conceptual development phase a topological optimization methodology was used to obtain a concept with low mass without compromising its stiffness. The geometry obtained was adapted to be compatible with subtractive manufacturing through computer numerical control machining.

The work finished with the construction of a prototype in MDF with the assembly of metallic reinforcement components in order to be able to install the remaining elements of the bicycle. It is concluded that a frame built in MDF, despite being sustainable and innovative, has a higher mass than most frames of the market.

Conteúdo

1. Introdução.....	1
1.1 Contextualização da temática e motivação.....	1
1.2 Objetivos e Metodologias	2
1.3 Organização da dissertação.....	2
2. Revisão do Estado da Arte.....	3
2.1 Mobilidade Sustentável.....	3
2.2 Soluções de mobilidade elétrica de duas rodas	3
2.2.1 <i>Segway</i>	4
2.2.2 <i>Hoverboard</i>	5
2.2.3 Trotinete elétrica.....	6
2.2.4 Lopfit.....	6
2.2.5 Bicicleta elétrica (BE).....	7
2.2.6 Scooter elétrica e Motocicleta elétrica	8
2.3 Mercado de veículos elétricos de duas rodas	9
2.4 Quadro de velocípede e a sua geometria	10
2.5 Materiais e processos de fabrico do quadro de bicicleta	12
2.5.1 Ligas de alumínio.....	13
2.5.2 Outras ligas metálicas	13
2.5.3 Compósitos de fibra de Carbono	14
2.6 Materiais naturais com possível aplicação	15
2.6.1 Bambu.....	15
2.6.2 Madeira e derivados	16
3. Estudo do Ciclo de Vida do Quadro.....	19
3.1 Metodologia ACV	19
3.2 Estudos de ACV de quadros presentes na literatura	19
3.3 Fontes de impacto ambiental do quadro.....	20
3.3.1 Fase de obtenção da matéria-prima e produção.....	20
3.3.2 Gestão do resíduo final	21
4. Normas e Regulamentos do Quadro	23
5. Desenvolvimento Conceptual.....	25

5.1 Quality Function Deployment (QFD).....	25
5.1.1 Considerações iniciais de desenvolvimento	25
5.1.2 Identificação do público-alvo.....	26
5.1.3 Identificação das necessidades do consumidor	26
5.1.4 Modelo Kano	29
5.1.5 Especificações do quadro	29
5.1.6 Matriz da qualidade.....	30
5.2 Otimização topológica no processo de geração conceptual.....	32
5.2.1 Dimensionamento da geometria inicial	34
5.2.2 Situações de carga consideradas.....	37
5.2.3 Definição das condições de simulação.....	39
5.2.4 Discussão dos resultados obtidos.....	40
5.2.5 Pós-processamento e conceito gerado.....	43
6. Análise do Quadro Proposto.....	45
6.1 Integração dos restantes componentes da BE.....	45
6.2 Análise estrutural.....	46
6.2.1 Discussão dos resultados para as diferentes situações de carga.....	47
6.3 Análise da Rigidez	52
6.4 Análise modal.....	54
7. Construção do Protótipo Físico	55
7.1 Definição do material do protótipo	55
7.2 Processo de prototipagem	56
7.2.1 Fabrico dos componentes metálicos.....	57
7.2.2 Maquinagem dos componentes em MDF.....	58
7.3 Montagem do protótipo.....	60
7.4 Discussão dos Resultados	63
7.4.1 Massa do quadro.....	63
7.4.2 Processo de prototipagem	63
7.4.3 Geometria obtida.....	64
7.4.4 Sustentabilidade	64
8. Conclusões e Trabalhos Futuros	65
8.1 Considerações finais.....	65
8.2 Trabalhos futuros	65

Bibliografia.....	67
Anexos.....	71
Anexo A - Ferramentas usadas no desenvolvimento conceptual.....	71
A.1 - Classificação dos requisitos da metodologia Kano [47].....	71
A.2 - Diagrama de Mudge	71
A.3 - Matriz da Qualidade	72
Anexo B - Especificações de componentes de bicicletas.....	73
B.1 - Especificações de tamanhos de rodas ISO 5775 (adaptado de [32]).....	73
B.2 - Especificações consultadas relativas a caixa de direção (adaptado de [53]).....	74
B.3 - Especificações consultadas das dimensões do <i>botton byracket</i> (adaptado de [53])....	74
Anexo C – Análise estrutural do quadro convencional em alumínio 6061-T6.....	75
C.1 - Configuração do caso de impacto vertical no software <i>ANSYS R21</i>	75
C.2 - Resultados obtidos da tensão <i>Von Mises</i> no caso de impacto vertical.....	75
C.3 - Configuração do caso de início de pedalada no software <i>ANSYS R21</i>	76
C.4 - Resultados obtidos da tensão <i>Von Mises</i> no caso de início de pedalada	76
C.5 - Configuração do caso de pedalada em pé no software <i>ANSYS R21</i>	77
C.6 - Resultados obtidos da tensão <i>Von Mises</i> no caso de pedalada em pé.....	77
C.7 - Configuração do caso de travagem dianteira no software <i>ANSYS R21</i>	78
C.8 - Resultados obtidos da tensão <i>Von Mises</i> no caso de travagem dianteira	78
Anexo D - Deformações obtidas dos testes de rigidez realizados.....	79
D.1 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em alumínio 6061-T6.....	79
D.2 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em alumínio 6061-T6.....	79
D.3 - Resultado do ensaio de rigidez lateral para o quadro em alumínio 6061-T6.....	79
D.4 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em aço AISI 4130.....	80
D.5 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em aço AISI 4130.....	80
D.6 - Resultado do ensaio de rigidez lateral para o quadro em aço AISI 4130	80
D.7 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em titânio-6Al-4V.....	81
D.8 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em titânio-6Al-4V.....	81
D.9 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em titânio-6Al-4V.....	81
D.10 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em contraplacado	82
D.11 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em contraplacado	82
D.12 - Resultado do ensaio de rigidez lateral para o quadro em contraplacado.....	82

D.13 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em MDF	83
D.14 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em MDF	83
D.15 - Resultado do ensaio de rigidez lateral para o quadro em MDF.....	83
Anexo E – Protótipo com integração dos restantes componentes da bicicleta	84

Índice de Figuras

Figura 2.1 - <i>Segway</i> em movimento (adaptado de [9]).....	5
Figura 2.2 - <i>Hoverboard</i>	5
Figura 2.3 - Trotinete elétrica XIAOMI m365 (adaptado de [12]).....	6
Figura 2.4 - <i>Lopfit</i> (adaptado de [14]).....	6
Figura 2.5 - Yamaha PA26-A Bicicleta com pedalada assistida (PAS) (adaptado de [16])	7
Figura 2.6 - a) Scooter elétrica GOVECS FLEX [25], b) Motocicleta elétrica Brammo Enertia Plus (adaptado de [25]).....	9
Figura 2.7 - Evolução do número de vendas de BE (2006-2016) (adaptado de [26])	9
Figura 2.8 - Unidades produzidas de BE por cada país da UE (adaptado de [26]).....	10
Figura 2.9 - Terminologias de quadro da bicicleta convencional (adaptado de [30])	10
Figura 2.10 - Motor elétrico instalado em conjunto com o eixo da pedaleira (adaptado de [31])	11
Figura 2.11 - Mapa de seleção de materiais, resistência do material (σ_f) em função da densidade do material (ρ) (adaptado de [33])	12
Figura 2.12 - Processo de moldação do quadro monocoque (adaptado de [36])	14
Figura 2.13 - Quadro em bambu desenvolvido pela empresa My Boo (adaptado de [41])	16
Figura 2.14 - Quadro em madeira, modelo GR 1.0 [42].....	16
Figura 2.15 - Classificação de tipos de compósitos de madeira por tamanho de partículas, densidade e processo (adaptado de [43])	17
Figura 2.16 - Protótipo de quadro em contraplacado designado por Xylon (adaptado de [32])	17
Figura 3.1 - Comparação do impacto ambiental com quadros de bambu, alumínio e aço perante dez categorias. O resultado do quadro com superior impacto na categoria é fixado a 100% (adaptado de [40])	20
Figura 3.2 - Energia incorporada de diferentes materiais de construção (adaptado de [45] [35])	21
Figura 5.1 - Vantagens e Desvantagens da aplicação do motor elétrico na roda traseira.....	25
Figura 5.2 - Respostas obtidas acerca do preço disposto a pagar por uma nova BE (adaptado de [49])	27
Figura 5.3 - Diagrama de Kano e classificação dos requisitos do quadro	29
Figura 5.4 - Esquema da matriz da qualidade (adaptado de [50])	30
Figura 5.5 - Priorização revista da procura da qualidade.....	31
Figura 5.6 - Priorização das especificações do quadro	32
Figura 5.7 - Exemplo ilustrativo de otimização topológica adaptado de [51].....	32
Figura 5.8 - Processo utilizado de otimização topológica.....	34
Figura 5.9 - Esboço da geometria inicial do quadro	35
Figura 5.10 - Componentes selecionados a integrar no quadro a) Caixa de direção do tipo convencional (externa), b) <i>Bottom Bracket</i> tipologia <i>BSA/English</i> , (adaptado de [31]).....	36
Figura 5.11 - CAD referente a geometria base obtida.....	37
Figura 5.12 - Representação da força [N] aplicada no caso de impacto vertical (adaptado de [54])	37
Figura 5.13 - Representação das forças [N] aplicadas no caso de início de pedalada (adaptado de [55])	38
Figura 5.14 - Representação das forças [N] aplicadas no caso de pedalada em pé (adaptado de [55])	38
Figura 5.15 - Representação das forças [N] aplicadas no caso de travagem da roda dianteira, (adaptado de [54]).....	39
Figura 5.16 - Representação das forças aplicadas nos diferentes casos.....	40
Figura 5.17 - Especificação das zonas a preservar.....	40
Figura 5.18 - Resultados obtidos referentes a influência do tamanho dos elementos da malha, resultado A- malha inicial com 92653 elementos, resultado B-malha inicial com 419049 elementos	41
Figura 5.19 - Resultados com diferentes percentagens de massa inicial	41
Figura 5.20 - Avaliação da folga existente para instalação do sistema de transmissão	42
Figura 5.21 - Resultado obtido para a situação de forças combinadas.....	43

Figura 5.22 - Método de pós-processamento utilizado e conceito gerado: a) Sobreposição da malha na geometria inicial; b) Conceito modelado; c) Conceito otimizado com a inclusão de cavidades na ramificação frontal do quadro (vista de corte);.....	43
Figura 6.1 - Quadro proposto com integrado na bicicleta eléctrica.....	45
Figura 6.2 - Sistema de transmissão de uma mudança.....	45
Figura 6.3 - Modelo, composto pelo quadro com a adição de reforços metálicos, considerado para a análise estrutural estática	47
Figura 6.4 - Resultado da tensão de <i>Von Mises</i> para o caso de impacto vertical: a) Quadro (escala reduzida), b) Apoios do eixo traseiro, c) Reforço do espigão do selim;.....	49
Figura 6.5 - Resultado da tensão de <i>Von Mises</i> para o caso de início de pedalada: a) Quadro (escala alterada); b) Apoios do eixo traseiro; c) Reforço da caixa de direção;.....	50
Figura 6.6 - Resultado da tensão de <i>Von Mises</i> para o caso de pedalada em pé: a) Quadro (escala alterada), b) Apoios do eixo traseiro, c) Reforço da caixa de direção;.....	51
Figura 6.7 - Resultados da tensão de <i>Von Mises</i> para o caso de travagem dianteira: a) Quadro (escala reduzida), b) Reforço caixa de direção	52
Figura 7.1 - Representação da separação dos membros do quadro em MDF com o posicionamento dos componentes em alumínio.....	57
Figura 7.2 - Partes metálicas fabricadas em alumínio 6061-T6	57
Figura 7.3 - Etapas de preparação dos blocos de MDF: a) processo de corte da placa de MDF; b) aplicação de adesivo; c) sobreposição das placas e prensagem com recurso a grampos	58
Figura 7.4 - Fabrico dos componentes em MDF: a) Maquinação CNC do bloco da secção intermédia; b) Maquinação da secção do tubo do selim no torno paralelo	60
Figura 7.5 - Membros do quadro obtidos por maquinação CNC	60
Figura 7.6 - Montagem do protótipo: a) Montagem do triangulo traseiro; b) Inserção de cavilhas de madeira nas juntas do quadro; c) Fixação dos apoios metálicos ao quadro;.....	61
Figura 7.7 - Protótipo de quadro de velocípede montado	61
Figura 7.8 - Medição da massa do protótipo.....	62
Figura 7.9 -Valores de massa para diferentes quadro com a utilização de materiais naturais: a) quadro de bambu [41]; b) quadro de madeira; c) protótipo em MDF.....	63
Figura 7.10 - Destaque da volumetria da secção frontal do quadro	64

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Benefícios e limitações da utilização de veículos elétricos de duas rodas	4
Tabela 2.2 - Tipos de BE.....	8
Tabela 2.3 - Diferentes geometrias de quadro de velocípede.....	11
Tabela 2.4 - Propriedades de alguns materiais de quadros de bicicleta.....	13
Tabela 2.5 - Algumas propriedades mecânicas de materiais naturais, dependentes da orientação.....	15
Tabela 4.1 - Ensaio experimentais para validação do quadro ISO 4210-6 (adaptado de [46])	24
Tabela 5.1 - Especificações do quadro e respetiva unidade	30
Tabela 5.2 - Tamanho do quadro em função da altura do utilizador (adaptado de [52])	35
Tabela 5.3 - Valores adotados para o dimensionamento da geometria inicial (adaptado de [35]).....	36
Tabela 5.4 - Resultados obtidos das diversas situações de carga considerados	42
Tabela 6.1 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizadas na análise estrutural	47
Tabela 6.2 - Valores das tensões máximas obtidos para o caso de impacto vertical	48
Tabela 6.3 - Valores das tensões máximas obtidos para o caso de início de pedalada.....	49
Tabela 6.4 - Valores das tensões máximas obtidos para o caso de pedalada em pé	50
Tabela 6.5 - Valores das tensões máximas obtidos para o caso de travagem da roda dianteira	51
Tabela 6.6 - Valores de rigidez obtidos para os 3 ensaios considerados; a) materiais, quadro proposto, b) materiais, quadro convencional	53
Tabela 6.7 - Frequências naturais obtidas dos respetivos modos de vibração.....	54
Tabela 7.1 - Matriz de decisão utilizada na seleção do material do protótipo.....	55
Tabela 7.2 - Dimensões dos blocos de MDF para maquinação dos diversos elementos	59
Tabela 7.3 - Tempos de maquinação dos diversos componentes do conjunto.....	62

Lista de Acrónimos e Abreviaturas

ACEM *European Association of Motorcycle Manufacturers*

ACV *Análise do Ciclo de Vida*

BE *Bicicleta Elétrica*

CAD *Computer Aided Design*

CAE *Computer Aided Engineering*

CAM *Computer Aided Manufacturing*

CEN *Comité Europeu de Normalização*

CNC *Controlo Numérico Computorizado*

CO₂ *Dióxido de Carbono*

CONEBI *Confederation of the European Bicycle Industry*

DEM *Departamento de Engenharia Mecânica*

DIN *German Institute for Standardization*

EN *European Norm*

ISO *International Organization for Standardization*

MDF *Medium Density Fibreboard*

MEF *Método dos Elementos Finitos*

OSB *Oriented Strand Board*

OT *Otimização Topológica*

QFD *Quality Function Deployment*

SHIS *Standardized Headset Identification System*

SIMP *Solid Isotropic Material with Penalization*

TIG *Tungsten Inert Gas*

UE *União Europeia*

VE *Veículo Elétrico*

VOC *Voice of Customer*

WPC *Wood plastic composite*

1. Introdução

1.1 Contextualização da temática e motivação

Na União Europeia (UE), o setor dos transportes é o setor responsável pelo maior consumo de energia final, sendo que em 2017 a percentagem referente a este setor foi de 30,8% da energia total consumida na UE [1]. No ano de 2017, este setor foi igualmente responsável por 21,4 %, das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) na UE, sendo este o único setor que regista um aumento (22,7%) em relação ao valor das emissões estimado em 1990 [2]. Analisando estes dados e tendo em consideração a influência das emissões de CO₂ nas alterações climáticas denota-se que existe um longo caminho a percorrer de modo a atingir a meta delineada pela UE de reduzir em 60% o valor das emissões de CO₂ até 2050 relativamente ao valor das emissões estimadas em 1990 [3].

O meio de transporte mais utilizado continua a ser o automóvel. Em Portugal 88,4% das deslocações terrestres são efetuadas com recurso a um automóvel. No entanto, de modo a contrariar esta crescente tendência, têm surgido diversos estudos no âmbito da mobilidade individual sustentável, não só com o objetivo de diminuir os problemas ambientais e energéticos, mas também dar resposta a alguns problemas societários associados a mobilidade urbana, problemas estes como: o congestionamento do tráfego, os problemas de estacionamento e a poluição sonora. Neste contexto surgem soluções como a aposta na ecomobilidade com o objetivo de promover a eficiência energética e a diminuição do impacto ambiental. Posto isto nos últimos 20 anos observa-se uma aposta na eletrificação de veículos de duas rodas como a bicicleta, a scooter, a trotinete e até a motocicleta. No caso das bicicletas elétricas (BE) é perceptível o potencial deste mercado uma vez que em 2019 foram vendidas 3 milhões de BE na UE [4]. O uso deste veículo mantém as principais vantagens associadas a utilização da bicicleta convencional e em comparação permite percorrer distâncias superiores com reduzido esforço físico. A BE surge como uma solução sustentável, saudável e viável para as deslocações do dia a dia ou para lazer, isto tendo em consideração que a distância média por cada viagem efetuada na UE encontra-se num intervalo entre (9 -22) km [5].

As áreas da Engenharia e de Design conciliadas desempenham um papel fundamental na procura de novas soluções de mobilidade individual cidadina, nomeadamente, com o desenvolvimento de novos veículos elétricos que satisfaçam as necessidades das populações. Porém, estes novos veículos apresentam uma elevada dependência da utilização de materiais metálicos e compósitos, que por sua vez estão associados a um elevado consumo energético devido ao processo produtivo e a obtenção da matéria-prima.

Desta forma, deve ser considerado a aplicação de técnicas de eco design. Sendo que este conceito propõe algumas estratégias aplicadas a metodologia tradicional de desenvolvimento de produto. Essas estratégias passam por [1]:

- Procurar materiais alternativos durante a fase de seleção de materiais;
- Aplicar métodos de otimização para reduzir a quantidade e o desperdício de material;
- Promover a eficiência energética na fase de definição do processo de fabrico.

Com aplicação de ferramentas de eco design é possível desenvolver produtos com reduzida pegada ecológica designados por *ecofriendly products*.

1.2 Objetivos e Metodologias

O principal objetivo deste estudo, relaciona-se com a mobilidade individual cidadina, nomeadamente, com o desenvolvimento de um quadro em material natural destinado a uma bicicleta elétrica urbana. Desta forma, pretende-se encontrar uma alternativa sustentável em relação à utilização predominante de materiais metálicos e compósitos no fabrico de quadros de velocípedes. O desenvolvimento de um quadro de uma bicicleta elétrica com reduzida pegada ecológica e simultaneamente a obtenção de um quadro com uma reduzida massa, que será o resultado da utilização de materiais naturais. Todavia este deve cumprir os requisitos funcionais, relacionados com a resistência e a segurança.

A fim de atingir o objetivo global foram delineadas as seguintes etapas:

- Efetuar um levantamento acerca das soluções existentes de mobilidade elétrica de duas rodas, entendendo a sua relevância em contexto urbano. Destacando a BE neste contexto;
- Breve análise do ciclo de vida de um quadro de bicicleta, considerando diferentes materiais;
- Levantamento das normas e regulamentos aplicados na UE que estabelecem os requisitos e especificações de segurança do quadro;
- Observação das diferentes geometrias de quadros de bicicletas e estudo dos materiais e métodos utilizados no processo de fabrico;
- Definição dos requisitos e especificações do quadro a desenvolver;
- Desenvolvimento do conceito do quadro em material natural utilizando métodos de otimização estrutural;
- Construção de um protótipo de um quadro de BE, para posterior comparação com outros estudos presentes na bibliografia.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos e respetivos subcapítulos.

No 1.º capítulo, será apresentada uma introdução, na qual são referidos os objetivos, após o enquadramento da temática e a descrição da motivação para a elaboração do estudo.

No 2.º capítulo, será dado o destaque ao estado da arte, onde essencialmente foi abordada a temática da mobilidade sustentável incluindo uma apresentação acerca dos principais veículos elétricos de duas rodas, destacando a BE, tal como é feita uma análise ao mercado de vendas deste veículo. Ainda neste capítulo é feito um estudo acerca do quadro de um velocípede, incidindo principalmente na sua geometria, materiais, processos de fabrico e possíveis materiais naturais aplicados na produção.

No 3.º capítulo será abordada uma breve análise do ciclo de vida do quadro, com base na observação da bibliografia referente à temática.

No capítulo 4.º capítulo serão expostas as normas aplicadas na UE, que definem os métodos de testagem e validação mecânica de quadros de bicicleta.

Ao longo do 5.º capítulo, surgirá o desenvolvimento conceptual, nomeadamente, a descrição da metodologia utilizada até à obtenção de um conceito, isto conciliado com a aplicação de métodos de otimização estrutural.

No 6.º capítulo será apresentada uma proposta de quadro com integração dos restantes componentes que compõem a BE. Ainda neste capítulo também é realizado um conjunto de simulações com recurso ao método dos elementos finitos (MEF), com intuito de avaliar o comportamento estrutural.

No 7.º capítulo estará referido o processo de prototipagem com descrição das técnicas de maquinagem usadas, tal como o processo de montagem do protótipo, bem como, a discussão do protótipo construído.

Por fim no 8.º capítulo serão apresentadas algumas conclusões gerais, tal como serão sugeridas algumas propostas de trabalhos futuros.

2. Revisão do Estado da Arte

2.1 Mobilidade Sustentável

Conceitos como a ecomobilidade ou a mobilidade sustentável, foram abordados pela primeira vez no Livro Verde [2], em 1992 pela Comissão das Comunidades Europeias. Neste documento é reconhecido o papel fundamental que o setor dos transportes representa no desenvolvimento económico, contudo, também é referido o enorme impacto ambiental causado por este setor. A elevada quantidade de emissões de poluentes libertados pelos motores de combustão interna para a atmosfera, provenientes da utilização de combustíveis fósseis é identificada como a principal causa. Desta forma, no Livro Verde são delineadas estratégias no âmbito do desenvolvimento sustentável, como: o investimento na ciência e nas novas tecnologias, o aumento da utilização de energias renováveis e a criação de novas infraestruturas urbanas, de forma a reduzir o congestionamento do tráfego rodoviário.

Desde a publicação do Livro Verde já passaram quase três décadas, porém, o problema do setor dos transportes permanece, uma vez que entre 1990 e 2017 ocorreu um aumento superior a 20% em relação ao valor de emissões de CO₂, considerando que este valor é um dos principais indicadores de análise de impacto ambiental. Este aumento é justificado com base na crescente utilização do automóvel nas deslocações do dia a dia e a crescente concentração populacional nas áreas urbanas [3]. Por outro lado, algumas estratégias no âmbito da promoção da mobilidade sustentável surtiram efeito, considerando o aumento da utilização das energias renováveis e o desenvolvimento de novos veículos amigos do ambiente.

Enquadrada na promoção da sustentabilidade, na área dos transportes, surge a mobilidade elétrica, que consiste na substituição de veículos a combustão por veículos elétricos [4]. Ao contrário dos veículos a combustão, os veículos elétricos possuem uma bateria e motor elétrico. A bateria permite armazenar energia, possibilitando uma determinada autonomia de deslocação e o motor elétrico surge com intuito de transformar a energia elétrica em força motriz. A principal vantagem da utilização de um VE, reside no facto de este não emitir poluentes durante a fase de uso, contudo, a produção de baterias implica o uso de metais classificados como raros, em particular o lítio e o cobalto [4]. Outra limitação associada ao VE relaciona-se com a predominante utilização de combustíveis fósseis como o petróleo, o gás natural e o carvão na produção de eletricidade.

O aumento da utilização de energias renováveis influencia consideravelmente a promoção da mobilidade elétrica, uma vez que aumenta a sua atratividade de um ponto de vista sustentável. No caso de Portugal, a utilização de energias renováveis encontra-se acima da média da União Europeia, pois em 2018 as energias renováveis foram responsáveis por 51,4% da eletricidade produzida no país [5], o que é um bom indicador para alcançar o objetivo de redução das emissões de poluentes através da crescente utilização de soluções de mobilidade elétrica.

2.2 Soluções de mobilidade elétrica de duas rodas

São diversos os veículos elétricos existentes, no entanto, esta dissertação apenas aborda os veículos elétricos de duas rodas, principalmente a BE, contudo, são mencionados outros veículos com menor relevância de mercado. Não é nenhuma novidade, o tema dos veículos elétricos de duas rodas, uma vez que a primeira patente conhecida acerca de uma BE foi registada em 1895, pelo inventor americano *Ogden Bolton Jr*, porém, apenas nas duas últimas décadas, estes veículos começaram a ser comercializados em grande escala. O crescimento foi principalmente propulsado, devido ao aumento do preço dos combustíveis fósseis e aos avanços tecnológicos na produção de baterias, pois a tendência é produzir baterias leves com maior capacidade de armazenamento com reduzido custo económico [6].

Em comparação aos automóveis convencionais, estas soluções de mobilidade elétrica, apresentam outros benefícios para além das vantagens relacionadas com a saúde e para com o ambiente.

Na Tabela 2.1, foram descritos alguns desses benefícios, assim como algumas limitações que estes veículos apresentam.

Tabela 2.1 - Benefícios e limitações da utilização de veículos elétricos de duas rodas

Benefícios	Limitações
A diminuição do consumo de energia, devido à utilização de motores elétricos com eficiência próxima de 90%, promovendo a eficiência energética, ao contrário de um automóvel em que uma grande porção de energia é desperdiçada sob a forma de energia térmica;	Limitações ao nível das características técnicas do veículo, nomeadamente a autonomia da bateria, o tempo de carregamento e a disponibilidade de postos de carregamento;
A reduzida massa que estes veículos apresentam, (no caso BE a massa média é de 22,5 kg, enquanto um automóvel pesa em média 1300 kg). Desta forma evidencia-se que a quantidade de energia necessária para deslocar uma BE é bastante inferior à de um automóvel;	A impossibilidade de utilização de alguns destes veículos em dias com condições meteorológicas adversas. Apesar de existirem coberturas parciais que impedem a entrada da chuva, mas, por outro lado, prejudicam a estabilidade do veículo perante a ação do vento;
A diminuição da área ocupada pelo estacionamento e conseqüente diminuição do congestionamento do tráfego, isto considerando o exemplo que um automóvel ocupa uma área de 12 m ² e neste mesmo espaço é possível no mínimo o estacionamento de seis bicicletas;	O aumento da gravidade das lesões em caso de acidente, justificado pela velocidade, como é o caso da trotinete elétrica que permite velocidades superiores em relação ao veículo convencional [7]. Como consequência foi fixada uma velocidade limite, considerando as dimensões do veículo;
A reduzida manutenção em relação aos automóveis e aos veículos de duas rodas com motor de combustão interna;	O número de ocupantes do veículo, uma vez que a grande maioria destes veículos estão limitados a um, embora alguns estejam autorizados a transportar dois ocupantes;
Alguns destes veículos podem ser dobráveis o que permite serem facilmente transportados e armazenados no interior de edifícios;	A reduzida capacidade de transporte de bens como compras, embora possam ser adaptados sistemas de porta bagageira ou até mesmo a adaptação de atrelados;
Existem incentivos por parte do governo português, no âmbito da compra de um veículo elétrico de duas rodas. Toda a informação acerca destes apoios está presente no despacho n.º 2210/2019 [8] ;	Apresentarem um preço de venda superior, comparado com as soluções não eletrificadas, pois trata-se de mercados emergentes com elevado nível tecnológico;

De seguida são discutidas algumas opções de mobilidade elétrica de duas rodas para uso cidadão e individual.

2.2.1 Segway

A *Segway Personal Transporter*, (Figura 2.1) é um veículo elétrico desenvolvido pelo engenheiro americano *Dean Kamen*, baseada na tecnologia do pêndulo invertido [3]. Este veículo foi considerado uma grande inovação na época, uma vez que, quando foi lançado em 2001, permitia atingir uma velocidade máxima de 20 km/h e uma autonomia de 38 km.



Figura 2.1 - *Segway* em movimento (adaptado de [9])

O quadro deste veículo é uma plataforma com 20 cm de altura em relação ao chão, que aloja dois motores elétricos os quais fornecem potência às duas rodas presentes em ambas as extremidades da plataforma. Na parte central do veículo surge uma coluna com um guiador no topo. A posição do utilizador no veículo é efetuada de pé sendo que o veículo apenas se move na condição de o utilizador se inclinar na direção que pretende prosseguir. Devido à presença de diversos sensores, como o giroscópio, é possível detetar a inclinação do utilizador e localizar o centro de massa com o objetivo de adequar a resposta dos motores para obter a direção pretendida e evitar a queda do utilizador [10].

A *Segway* surge como um veículo versátil, uma vez que devido ao seu reduzido tamanho, este pode ser usado em espaços interiores como armazéns e centros comerciais. Embora este veículo, tenha surgido como uma solução de mobilidade bastante promissora, foram apenas vendidas 140 000 unidades e sua produção terminou em 2020, isto devido ao elevado preço de venda ao público rondar os 5000 \$ na altura de lançamento.

2.2.2 *Hoverboard*

Baseado na mesma tecnologia da *Segway*, porém, sem a presença de uma coluna com guiador, surge em 2013, por *Shane Chen*, o *Hoverboard* (Figura 2.2). Este veículo de reduzido tamanho apenas contém uma plataforma sobre duas rodas com um tamanho inferior a *Segway*. O *hoverboard* permite atingir velocidades próximas de 15 km/h e possui uma autonomia superior a 20 km, dependendo dos modelos.

Apesar do elevado número de vendas, a utilização deste veículo levanta algumas questões relacionadas com a segurança. Facto comprovado pelo elevado número de ocorrências hospitalares devido a quedas [11]. Outra falha de segurança está relacionada com a auto inflamação das baterias em caso de colisão do veículo.



Figura 2.2 - *Hoverboard*

2.2.3 Trotinete elétrica

A trotinete elétrica (Figura 2.3) é outra solução de mobilidade citadina destinada a efetuar distâncias de aproximadamente 20 km com uma velocidade máxima limitada à 25 km/h. Este veículo é composto principalmente, por uma plataforma, um motor elétrico, uma bateria, duas rodas de pequenas dimensões e um guiador. O utilizador é suportado sob a plataforma que é o quadro do veículo, o controlo do movimento é efetuado pelo acelerador disponível no guiador posicionado a uma determinada altura do solo. O motor elétrico, limitado a 250 W encontra-se no cubo da roda traseira e propulsiona o veículo.



Figura 2.3 - Trotinete elétrica XIAOMI m365 (adaptado de [12])

A trotinete elétrica é um veículo versátil, uma vez que pode ser dobrável permitindo que a coluna do guiador se retraia de modo a ficar paralela a plataforma, isto com intuito de facilitar o transporte e o armazenamento da trotinete.

Uma tendência crescente é a prestação de serviços de aluguer de trotinetes elétricas em diversas cidades. Promovendo assim, uma solução de mobilidade partilhada. Um exemplo destas empresas é a *Bolt*, que atua em várias cidades europeias e aluga trotinetes elétricas nas principais cidades portuguesas [13].

2.2.4 Lopfit

A *Lopfit* surgiu em 2013, e é baseado numa bicicleta com a inclusão de uma passadeira, conforme ilustrado na Figura 2.4. O veículo surge de forma a permitir que o utilizador efetue uma caminhada sobre a plataforma deslizante, enquanto este se move a uma velocidade superior com o auxílio de um motor elétrico. No âmbito do desenvolvimento deste produto, pretende-se aumentar a motivação para a prática de exercício físico.



Figura 2.4 - *Lopfit* (adaptado de [14])

2.2.5 Bicicleta elétrica (BE)

A BE caracteriza-se pela introdução de um motor elétrico de corrente contínua no velocípede. Este é alimentado por uma bateria integrada no interior do quadro ou apenas fixa superficialmente ao quadro [15]. Atualmente na Europa as BE são equipadas maioritariamente com baterias de íões de lítio, apesar do seu elevado custo, são baterias com reduzida massa e elevada capacidade de armazenamento, contudo, surgem algumas complicações em situações de sobreaquecimento que resultam na diminuição da vida útil deste componente [15].

Ao longo do século 20 foram diversas as patentes registadas acerca da utilização de um motor elétrico com o objetivo de propulsionar uma bicicleta convencional, porém, apenas em 1993, o fabricante *Yamaha*, produziu em grande escala a sua BE (Figura 2.5). Este modelo tinha um peso de 31kg, uma autonomia de 20 km e um preço de venda superior a 1000 € [16]. Um elevado preço para um modelo com reduzida autonomia considerando o preço da bicicleta convencional na altura e tendo em consideração a reduzida autonomia do modelo.



Figura 2.5 - Yamaha PA26-A Bicicleta com pedalada assistida (PAS) (adaptado de [16])

Segundo a diretiva 2002/24/EC da UE [17], o motor elétrico não deve ter uma potência superior a 250 W e o seu funcionamento deve ser suspenso ao ultrapassar a velocidade de 25 Km/h.





Com base no modo de propulsão é estabelecida uma classificação para bicicletas com apoio elétrico [18]:

- Velocípedes com sistema de pedalada assistida *Pedal Assist System* (PAS) são designados por *pedelecs*. O motor elétrico apenas é acionado quando o utilizador pedala [15].
- Velocípedes com apoio elétrico, controlado com um acelerador de manípulo são designados por e-bike, sistema de propulsão independente da pedalada e equivalente a scooters elétricas.

A utilização de uma BE permite manter os benefícios do uso de uma bicicleta convencional e ainda percorrer pavimentos com declive acentuado em que a utilização da bicicleta convencional era limitada devido ao elevado esforço físico que o terreno exigia. O surgimento das BE permite efetuar deslocamentos superiores com uma redução de cerca de 25% do esforço físico em comparação às bicicletas tradicionais [19].

Nos dias de hoje, são diversos os fabricantes de bicicletas que apresentam uma gama diversificada, no entanto, existem principalmente três tipos: a bicicleta elétrica citadina [20], a bicicleta elétrica de estrada [21] e a bicicleta elétrica de montanha [22]. Recentemente têm surgido algumas soluções de BE dobráveis que possuem rodas com diâmetro reduzido e um quadro articulado que permite compactar e diminuir o comprimento do veículo, isto com o intuito de facilitar o seu transporte e armazenamento em locais fechados. De forma geral e observando a Tabela 2.2, estes tipos divergem conforme o tipo de utilização do velocípede, posição de condução, a geometria do quadro, o tamanho das rodas e a largura dos pneus.

Tabela 2.2 - Tipos de BE

Tipos de BE	Ilustração	Material da estrutura	Peso [kg]	Preço de venda [€]
Citadina	 Modelo ELOPS 120 E [20]	Aço	25,9	799
Estrada	 Modelo: CORE GRAVELX CARBON 2.7 PRO [22]	Fibra de carbono	12,5	6 999
Montanha	 Modelo: ATOM 29 [22]	Alumínio 6061-T6	22,3	2 050
Dobrável	 Modelo: Go Cycle [23]	Alumínio 6061-T6 e Fibra de carbono	16,3	4 500

2.2.6 Scooter elétrica e Motocicleta elétrica

As scooters e as motocicletas elétricas (Figura 2.6) adotam a estrutura base dos modelos convencionais, apenas é substituído o motor de combustão interna por um motor elétrico e as baterias são integradas discretamente no quadro. Estes veículos permitem ao utilizador um nível de conforto superior, uma vez que este se encontra sentado. A autonomia é superior aos restantes veículos anteriormente mencionados, podendo variar entre os 40 e 100 km. Segundo o regulamento n° 168/2013 da UE [24], estes veículos de duas rodas encontram-se incluídos na categoria L, pois utilizam um motor com uma potência superior a 250 W. Desta forma, surge a obrigação de efetuar registo do veículo, seguro e ainda obter uma carta de condução.



Figura 2.6 - a) Scooter elétrica GOVECS FLEX [25], b) Motocicleta elétrica Brammo Enertia Plus (adaptado de [25])

2.3 Mercado de veículos elétricos de duas rodas

O mercado de veículos elétricos de duas rodas é um mercado em expansão, principalmente impulsionado pelas vendas de BE. Este mercado encontra-se liderado pela China que regista um volume anual de vendas de cerca de 30 milhões de BE [15]. Em segundo lugar surge o mercado europeu com uma grande relevância, pois nos últimos anos foi observada uma subida anual de 20% do número de vendas, como se pode observar no gráfico da Figura 2.7, que indica a evolução do mercado na UE entre 2006 e 2016 [26].

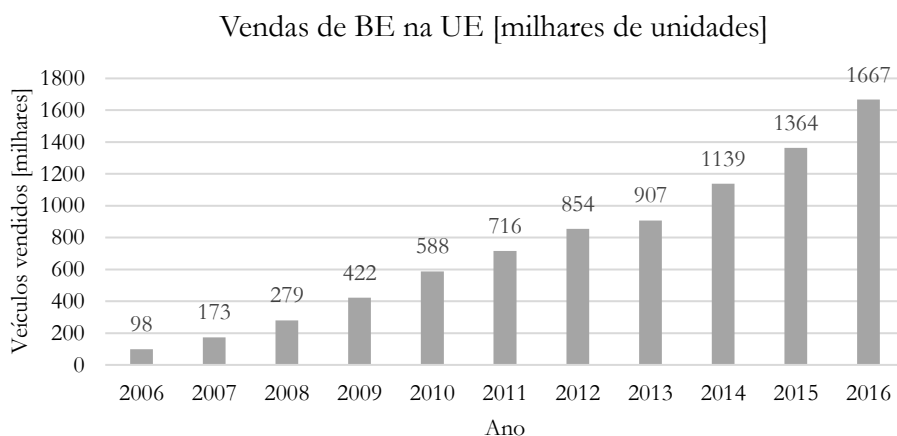


Figura 2.7 - Evolução do número de vendas de BE (2006-2016) (adaptado de [26])

Enquadrado no mercado da UE, é possível destacar alguns países: a Alemanha é o país que registou em 2016 o maior volume de vendas, responsável por 36% do total de 1667 milhares de unidades vendidas, a Holanda, a Bélgica e a França com percentagens de vendas de 16%, 10% e 8% respetivamente, são países que apresentam uma cotação relevante

Acerca de dados mais recentes, segundo a Confederação da Indústria Europeia de Bicicletas (CONEBI) [27], em 2019 foram vendidas cerca de 3,4 milhões de BE, um aumento de 23% relativamente ao ano anterior. Desta forma, em 2019 as vendas de BE representam 17% do total de vendas de bicicletas.

O mercado de veículos elétricos de duas rodas é visivelmente dominado pelas BE, pois o número de vendas destes veículos é bastante superior aos restantes de duas rodas com apoio elétrico. Segundo a Associação Europeia de Fabricantes de Motocicletas (ACEM) [28], o mercado europeu de motocicletas elétricas e ciclomotores elétricos também continua a aumentar, porém, em 2019 na UE encontram-se apenas registadas 14 111 motocicletas elétricas com potência superior a 4 kW, representando 1,3% do total dos registos de motocicletas. Em relação aos ciclomotores elétricos (*mopeds*), com potência entre 0,25 kW e 4 kW foram registadas 59 776 unidades.

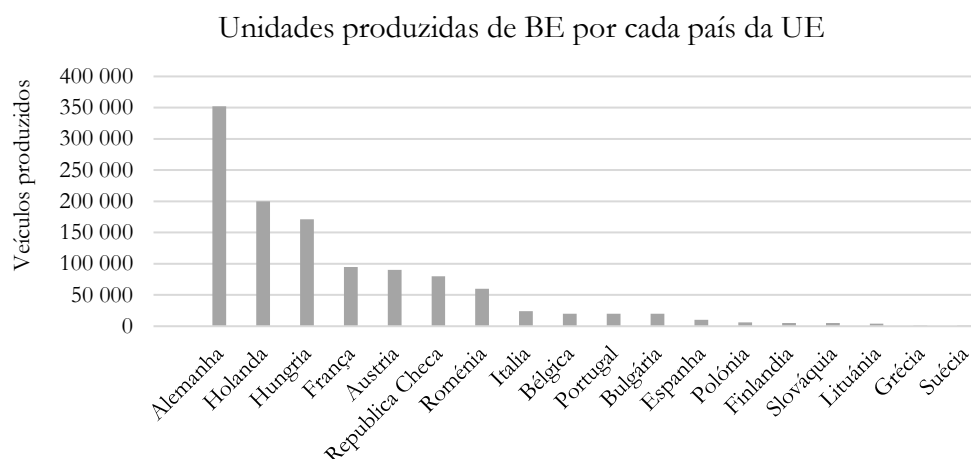


Figura 2.8 - Unidades produzidas de BE por cada país da UE (adaptado de [26])

Acerca da produção efetuada na UE ilustrada no gráfico da Figura 2.8, referente ao ano de 2016 é possível concluir que a Alemanha é o maior produtor de BE, responsável por 30% da produção, seguidamente a Holanda e a Hungria com 17% e 15 % respetivamente. Em Portugal, foram produzidas 20 000 unidades o que equivale a 2% da produção total de 1 164 000 unidades [26].

2.4 Quadro de velocípede e a sua geometria

O quadro é um componente crucial em qualquer veículo, pois a sua função é estabelecer uma ligação funcional e estrutural entre os restantes componentes do veículo. Desta forma a estrutura deve suportar a massa dos componentes e do ocupante. Qualquer falha estrutural do quadro compromete a funcionalidade do veículo. No caso dos velocípedes, o quadro é o componente principal, destinado a integrar os restantes componentes da bicicleta.

Convencionalmente é adotado um quadro tubular devido ao reduzido peso. A adoção deste tipo de quadro auxilia o processo de fabrico e permite obter um conjunto diversificado de geometrias.

A geometria do quadro é definida pelo perfil dos tubos constituintes e pelo ângulo formado entre eles e deve-se adequar à finalidade da bicicleta assim como devem ser consideradas as características antropométricas e biomecânicas do utilizador.

Contudo, observa-se no mercado uma predominância de bicicletas com quadro tubular em forma de trapézio, também designado por *diamond frame*. A adoção desta geometria provém dum período repleto de inovações na indústria do ciclismo, com o surgimento de novos modelos como a bicicleta apresentada em 1885 por *Starley* apelidada de *safety bicycle* [29].

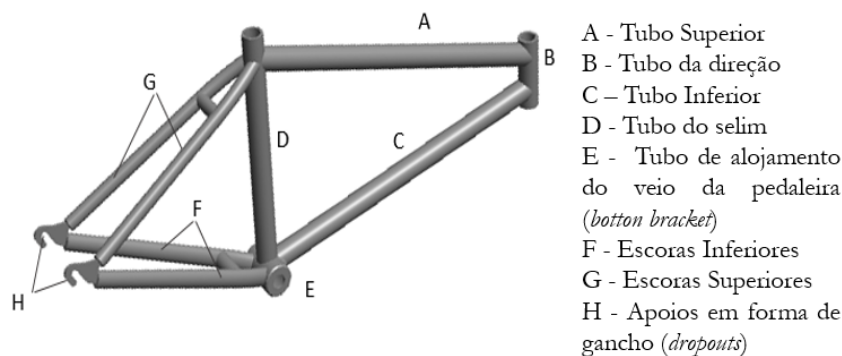


Figura 2.9 - Terminologias de quadro da bicicleta convencional (adaptado de [30])

O quadro da Figura 2.9 é constituído por diversos tubos unidos entre si. Na parte superior do quadro no tubo do selim (D) é instalado o espigão que suporta o selim. No tubo da direção (B) é conectado o avanço do guiador e o garfo que por sua vez aloja a roda dianteira [3]. No caso da roda traseira, esta é posicionada nos apoios (H), unidos aos pares de escoras G e F. Na região inferior central do quadro (E) é instalado o veio que acopla a roda da cremalheira e a manivela da pedaleira.

No caso do quadro de uma BE, este pode ou não apresentar diferenças, quando comparado com um quadro de bicicleta convencional. Existem kits de conversão que consistem na substituição de uma das rodas por uma roda que contenha um motor elétrico no seu cubo, cuja alimentação do motor é efetuada pela bateria, sendo esta fixada superficialmente no quadro, na maior parte dos casos no tubo inferior (C). Outra alternativa passa pelo posicionamento da bateria numa estrutura secundária, sob a roda traseira designada por porta bagageira.



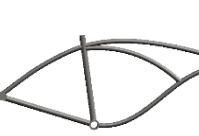





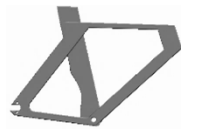

No caso de existirem alterações na geometria do quadro, estas são principalmente relacionadas com a integração do motor elétrico, conforme ilustrado na Figura 2.10. O *bottom bracket* possui uma cavidade de modo a fixar e alojar o motor elétrico conciliado com a roda da cremalheira e pedaleira.



Figura 2.10 - Motor elétrico instalado em conjunto com o eixo da pedaleira (adaptado de [31])

Apesar da maioria das bicicletas quer convencionais quer elétricas, apresentarem uma geometria de quadro do tipo *diamond*, existem diversas geometrias de quadro. Na Tabela 2.3 podem ser observados a representação 2D de alguns exemplos de geometrias de construção tubular mais comuns (primeira linha), assim como outras geometrias menos comuns (segunda linha).

Tabela 2.3 - Diferentes geometrias de quadro de velocípede

 A	 B	 C	 D	 E
 F	 G	 H	 I	 J

Importa realçar duas geometrias devido ao seu relacionamento com a mobilidade urbana. A geometria B, (Tabela 2.3), associada a uma BE cidadina, designada por quadro aberto (*Step-through frame*) [32]. O quadro aberto possui um tubo superior reto ou curvilíneo com reduzida altura, para melhorar a acessibilidade e facilitar a entrada e saída do velocípede. O aparecimento deste design é devido à utilização da bicicleta por parte do público feminino, pois a utilização de vestidos era dificultada devido a elevada altura do tubo superior do quadro.

Outra geometria de quadro adotada nas bicicletas dobráveis e adequada ao uso citadino é a geometria D (Tabela 2.3). Caracteriza-se por uma estrutura com reduzida altura, tendo em conta o tamanho das suas rodas de 20 polegadas. O tubo superior do quadro contém uma dobradiça de modo a permitir a compactação do quadro e resultante diminuição do seu comprimento. De modo a garantir a estabilidade do quadro durante a utilização, encontra-se presente um sistema de bloqueio.

2.5 Materiais e processos de fabrico do quadro de bicicleta

No processo de seleção de materiais, os principais objetivos são selecionar um material com bom desempenho para a função pretendida ao menor custo possível. No caso do quadro, a otimização da seleção do material do quadro é com base em critérios de desempenho estabelecidos com o relacionamento das propriedades mecânicas do material como: a tensão de rutura (σ_f), o módulo de elasticidade (E) e a densidade (ρ) [29]. O objetivo é obter uma estrutura leve e durável que facilite a locomoção do veículo, porém, com uma elevada resistência e rigidez, de modo a responder às diversas solicitações mecânicas a que este componente está sujeito. Desta forma pretende-se:

- Maximizar o quociente entre a resistência do material (σ_f) e a densidade do mesmo (ρ);
- Maximizar o quociente entre o módulo de elasticidade do material (E) com a densidade (ρ);
- Avaliar o preço de venda do material, tal como o custo de processamento desse mesmo material.

A Figura 2.11, ilustra o mapa de seleção de materiais, onde podemos ver que o conjunto de materiais sublinhados a azul ocupam um lugar de destaque no relacionamento entre a resistência do material (σ_f) e a densidade do material (ρ).

Atualmente, os materiais com maior utilização na construção de quadros de bicicleta quer convencionais quer elétricas são: as ligas de aço, as ligas de alumínio e os compósitos de fibra de carbono, embora também se adequam outras ligas metálicas, como as ligas de titânio.

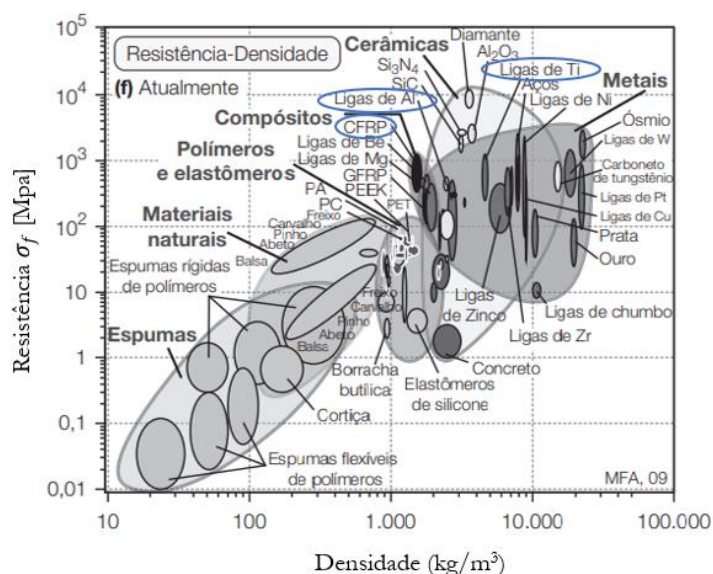


Figura 2.11 - Mapa de seleção de materiais, resistência do material (σ_f) em função da densidade do material (ρ) (adaptado de [33])

Tabela 2.4 - Propriedades de alguns materiais de quadros de bicicleta

Material	Densidade [kg/m ³]	Módulo de elasticidade [GPa]	Tensão de cedência [MPa]	Resistência à Tração [MPa]
Alumínio 6061-T6 [29]	2700	70	260	310
Alumínio 7005-T6 [29]	2800	72	290	350
Titânio Ti-6Al-4V [34]	4430	115	880	950
Aço AISI 4130 [29]	7850	210	460	560
Fibra de Carbono [29]	1760	230	-	1700

2.5.1 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio são atualmente o material com maior utilização para quadros de BE, isto devido à sua leveza e resistência, o que permite fabricar quadros com uma massa inferior a 3 Kg. Em relação à sua densidade, o alumínio tem aproximadamente um terço da densidade do aço (Tabela 2.4).

Outra vantagem da utilização deste metal está relacionada, com a elevada resistência à corrosão, pois o alumínio possui uma camada superficial auto protetora. No entanto, a sua rigidez é inferior em comparação ao aço, o que resulta em maior suscetibilidade a deformações. Contudo, esta limitação pode ser ultrapassada com o aumento do diâmetro e da espessura dos tubos que compõe o quadro [34]. O preço de um quadro de alumínio é superior ao aço, uma vez que o processo de formação da liga inclui uma maior complexidade.

Na construção dos quadros são utilizadas algumas ligas de alumínio (Tabela 2.4), principalmente a Al 6061-T6 e Al 7005-T6 [29], devido a boa maquinabilidade e soldabilidade que estas ligas conferem.

A construção do quadro de alumínio é iniciada com a utilização de tubos de alumínio obtidos por extrusão. Em seguida são efetuadas operações de conformação metálica, como o corte e dobragem. Os diferentes tubos são, posteriormente, moldados pelo processo de hidroformação, que consiste na inserção do tubo num molde e aplicação de água a elevada pressão, o que permite ao tubo adquirir o formato do molde com variações geométricas [31].

Este processo tem como benefício reduzir a quantidade de material utilizado e reduzir a concentração de tensões nas juntas, mas também facilita o processo de soldadura do quadro.

A soldadura do quadro é efetuada principalmente através do processo de soldadura TIG (*Tungsten Inert Gas*), por este garantir uma boa qualidade de ligação e um bom acabamento superficial. Por último, de modo a finalizar o quadro são efetuadas etapas de acabamento como revestimento e pintura.

2.5.2 Outras ligas metálicas

Alguns aços são utilizados na produção de quadros de BE, devido ao baixo custo deste material, encontra-se presente nos modelos mais baratos do mercado. O aço confere maior rigidez, resistência e durabilidade ao quadro em relação ao alumínio, porém, surgem desvantagens, como a sua elevada densidade e suscetibilidade de corrosão. Uma das ligas de aço com maior utilização é a AISI 4130 (Tabela 2.4) também designada por *Chromoly* devido à sua composição de cromo e molibdénio, esta liga confere ao aço uma resistência superior à corrosão [29].

Outro material utilizado é o titânio, este é bastante utilizado na produção de componentes para a indústria aeronáutica, embora na produção de quadros de BE apenas existam alguns fabricantes de quadros personalizados que utilizam o titânio. Uma das ligas utilizadas é a Ti-6Al-4V (Tabela 2.4) que contem alumínio e vanádio na sua composição [31], o que resulta em elevada resistência mecânica, reduzida densidade e elevada resistência à corrosão. O uso de ligas de titânio, não é efetuado em grande escala devido ao elevado preço deste material e às dificuldades de maquinagem, considerando a elevada dureza do titânio.

2.5.3 Compósitos de fibra de Carbono

O compósito de fibra de carbono é um material de grande aplicação, inicialmente com maior relevância na construção de aeronaves e de equipamentos desportivos de gama profissional [31]. Atualmente é um material com bastante relevância na construção de quadros de bicicletas, pois apresenta propriedades mecânicas bastante superiores aos restantes materiais, dependendo da orientação da fibra (Tabela 2.4). Esta fibra caracteriza-se principalmente pela sua leveza o que possibilita fabricar quadros com alguma complexidade e com uma massa inferior a 1,5 kg, porém, a utilização deste material compósito está associada a um elevado custo.

A sua produção é efetuada pela utilização das fibras de um precursor, normalmente (90% da produção total, o PAN (poliacrilonitrilo). O processo de produção envolve diversos processos térmicos e segue as seguintes etapas: fiação da fibra do precursor, estabilização da fibra, carbonação e grafitação. Ao longo deste processo extenso, a composição de carbono da fibra aumenta para valores superiores a 90% e devido à etapa de grafitação é afetada a sua estrutura. O processo da grafitação é bastante versátil, uma vez que com a variação da temperatura é possível obter fibras com diferentes módulos de elasticidade [35].

A fibra de carbono é então saturada com resina epóxi, obtendo um composto maleável em forma de tecido designado por pré-impregnado. Este composto é utilizado no fabrico do quadro e a técnica mais recorrente é a construção monocoque. O quadro monocoque consiste na moldação completa do triângulo dianteiro formando uma única peça.

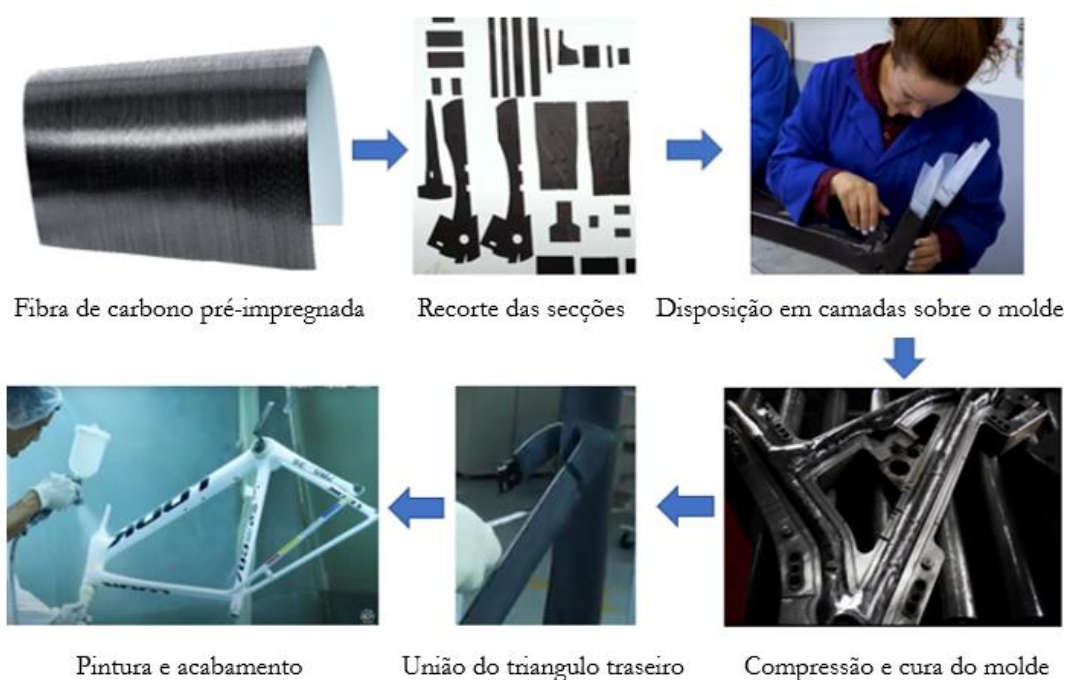


Figura 2.12 - Processo de moldação do quadro monocoque (adaptado de [36])

A Figura 2.12 representa a construção do quadro monocoque, que segue os seguintes passos:

- Em primeiro lugar, o tecido de pré-impregnado é cortado em diferentes folhas. As folhas são recortadas manualmente ou por tecnologia de Controlo Numérico Computorizado (CNC), com o intuito de obter centenas de pedaços de geometria variável. O recorte com CNC é vantajoso pois permite a diminuição de desperdício;

- Em seguida os pedaços do compósito são dispostos por camadas juntamente com a utilização de resina sobre um núcleo oco de material polimérico que pode ser removido no final do processo. A deposição das camadas é efetuada de modo a variar a orientação das fibras consoante as solicitações mecânicas das diversas zonas do quadro, porém, este processo é bastante moroso e requer mão de obra qualificada;
- A geometria do triângulo dianteiro é obtida devido à colocação da forma num molde, onde o material é sujeito a um processo de cura a elevada pressão durante sensivelmente 45 minutos, isto, com o objetivo de unir as diferentes camadas e obter superfícies interiores lisas;
- As escoras inferiores e superiores, que constituem o triângulo traseiro do quadro são moldados pelo mesmo processo. Estas são fixadas ao triângulo dianteiro através da adição de resina, juntamente com um processo de cura;
- Por último, são removidos quaisquer excessos da superfície do quadro e são efetuadas etapas de acabamento e pintura.

2.6 Materiais naturais com possível aplicação

A crescente consciencialização acerca das questões climáticas, contribui para o aumento da utilização de materiais sustentáveis, também designados por *green materials* [37]. A sua utilização surge como uma alternativa aos materiais tradicionais usados, que necessitam de grandes quantidades de energia.

Enquadrados nos materiais sustentáveis surgem os materiais naturais que provêm de fontes renováveis, por isso possuem um grande potencial de aplicação no desenvolvimento de novos produtos. Em relação à sua utilização na construção de quadros de bicicletas, alguns materiais naturais como o bambu, a madeira e até alguns derivados da madeira têm vindo a ser utilizados [32] por possuírem uma resistência mecânica satisfatória, considerando a sua reduzida densidade.

Tabela 2.5 - Algumas propriedades mecânicas de materiais naturais, dependentes da orientação

Material	Densidade [kg/m ³]	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à tração [MPa]
Bambu [37]	600-800	16-18	80-160
Madeira (freixo, carvalho) [29]	440-670	9-16	35-55
Painel de MDF [38]	700-800	3,59	7-16
Painel de Contraplacado [38]	400-600	6,96-8,55	34,5
Painel de OSB [38]	500-800	4,41-6,28	5-11

2.6.1 Bambu

O bambu é um material natural com um formato cilíndrico oco (coluna) que está dividido por nós. É uma planta de crescimento bastante rápido, que pode atingir uma altura de 40 m [39]. O uso deste material, surge através da sua coluna ou a utilização das fibras para a formação de bio-compósitos. O bambu possibilita a construção de quadros de bicicleta leves e suficientemente resistentes (Tabela 2.5), para além disso, a sua flexibilidade permite amortecer impactos e melhorar o conforto do utilizador. O quadro é construído pela junção das colunas de bambu com componentes de alumínio, designados por *lugs*¹, porém, são utilizadas cordas de *kenaf*² e resina na zona da união de modo a garantir a integridade do quadro [40].

O quadro representado na Figura 2.13 é comercializado pela empresa My Boo [41]. Este quadro sustentável e leve é fabricado com bambu proveniente de florestas no Gana e destina-se a uma utilização cidadina, pois possui uma geometria vantajosa para o utilizador, no que diz respeito a acessibilidade.

¹ Os *lugs* são componentes geralmente metálicos que asseguram a função de conexão dos tubos do quadro, referentes às juntas. Representam o tubo da direção, *botton bracket* e o topo do tubo do selim.

² *Kenaf* é uma planta. As suas fibras naturais associadas com resinas poliméricas formam compósitos com elevada resistência à flexão, o que possibilita a aplicação em diversas construções.

A combinação de colunas de bambu e alguns componentes de alumínio permite obter um reduzido peso, que ronda 2,5 kg. Os componentes de alumínio têm como função, reforçar o quadro e permitir o acoplamento dos restantes componentes da bicicleta. Este quadro com um tempo estimado de produção de 80 horas pode ser adquirido pelo preço de 999 €.



Figura 2.13 - Quadro em bambu desenvolvido pela empresa My Boo (adaptado de [41])

2.6.2 Madeira e derivados

A utilização de madeira no âmbito da construção de quadros de bicicleta não é nenhuma novidade. Com base na perspetiva histórica da bicicleta denota-se que os primeiros modelos conhecidos eram fabricados em madeira [29]. Com o passar dos anos, este material foi substituído pela utilização de materiais metálicos. Um quadro composto por madeira, proporciona um elevado conforto ao utilizador, uma vez que a madeira possui propriedades únicas (Tabela 2.5), com base na sua estrutura celular, pois consoante a orientação das fibras, pode funcionar como um excelente amortecedor.

Perante o projeto de construção, são adotadas técnicas provenientes da construção de mobiliário, porém, devem ser ponderadas as propriedades físicas da madeira como: humidade, densidade, retractilidade, resistência ao fogo, durabilidade natural e resistência química.

Atualmente, é possível encontrar alguns fabricantes que aplicam diferentes tipos de madeiras na construção das suas bicicletas, por exemplo, a empresa *Tympa Cycles* [42], que desenvolveu um quadro designado por GR 1.0 (Figura 2.14). A geometria do quadro tubular, com regiões ocas é bastante semelhante, às tradicionais geometrias de quadros metálicos. A instalação dos restantes componentes é facilitada devido à presença de componentes metálicos normalizados, como o caso dos *dropouts*. Este quadro destina-se a uma bicicleta versátil, que tanto pode ser usada em cidade como em trilhos.

O material utilizado é a madeira de freixo, as secções do triângulo dianteiro têm uma espessura aproximada de 5 mm, o que contribui para um peso aproximado de 1,8 kg. A elevada qualidade de construção e acabamento contribuem para o preço final de 2 720 €.



Figura 2.14 - Quadro em madeira, modelo GR 1.0 [42]

Os derivados da madeira são materiais obtidos através da prensagem de aglomerados de folhas ou partículas de madeira e com a adição de adesivos, como resinas de ureia-formaldeído e de fenol-formaldeído. Atualmente, tem vindo a aumentar a aplicação destes materiais, principalmente no setor da construção, uma vez que são comercializados em forma de placa e numa vasta gama de dimensões, o que em comparação com a madeira, permite um bom manuseamento para diversas aplicações.

A sua classificação é com base no tamanho das partículas de madeira utilizadas, como se pode visualizar na Figura 2.15. Alguns dos aglomerados com maior popularidade são o MDF (*Medium Density Fibreboard*), o OSB (*Oriented strandboard*) e o contraplacado (*plywood*).

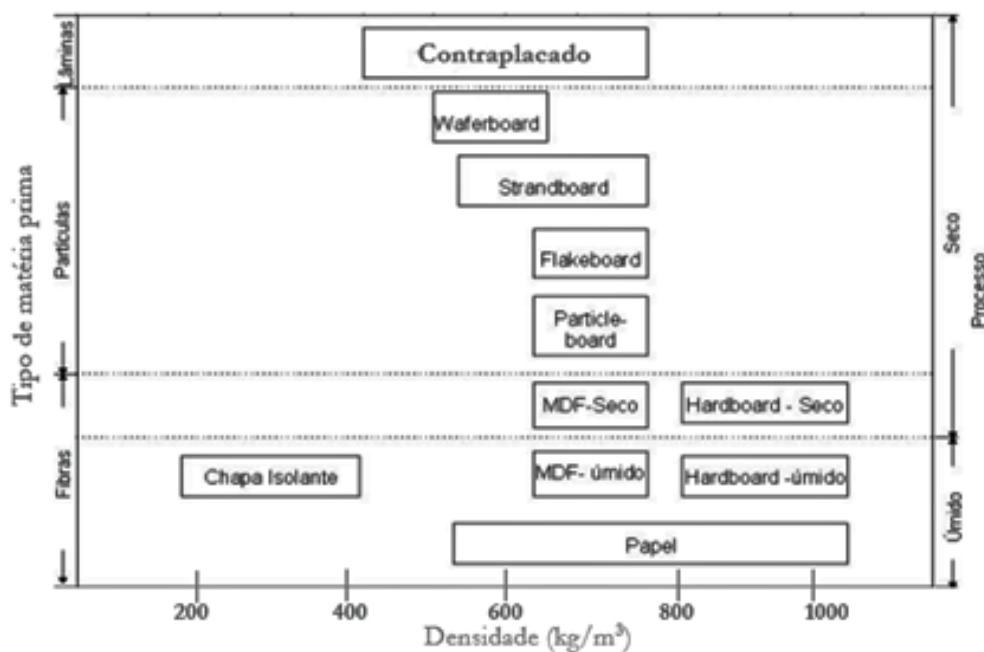


Figura 2.15 - Classificação de tipos de compósitos de madeira por tamanho de partículas, densidade e processo (adaptado de [43])

Um exemplo da aplicação de um derivado da madeira, foi o estudo realizado por *Nicholas Brent Taylor*, com o intuito primário de avaliar a potencialidade das bicicletas de madeira, tal como as exigências específicas deste tipo de bicicleta [32] e seguidamente efetuar o desenvolvimento de um protótipo com a utilização de um derivado da madeira. O protótipo efetuado encontra-se na Figura 2.16, onde foi utilizado contraplacado marítimo na sua construção, que também incluía componentes metálicos em regiões que necessitavam de reforço.



Figura 2.16 - Protótipo de quadro em contraplacado designado por Xylon (adaptado de [32])

3. Estudo do Ciclo de Vida do Quadro

3.1 Metodologia ACV

Análise do ciclo de vida (ACV) é um método que avalia o potencial impacto ambiental de um determinado produto ao longo das diversas etapas que compõem o seu ciclo de vida abordando um cenário *from cradle to gravel*, ou seja, desde a fase inicial correspondente à obtenção da matéria-prima, passando pela produção e utilização, até à fase de fim de vida, onde ocorre o tratamento do resíduo final. A metodologia ACV também considera os vários processos existentes entre as etapas relacionados com os fluxos de energia e de matéria. Deste modo, é possível quantificar o impacto ambiental de um produto através de diversos indicadores, embora cada um corresponda a uma categoria de impacto, por fim é obtido um indicador que agrupa todas as categorias em análise e indica o impacto ambiental do produto. A depleção da camada de ozono, o potencial de aquecimento global, o consumo de energia primária e o uso de água são algumas das categorias em evidência na metodologia do ACV. De modo a promover a sua utilização, este método encontra-se estandardizado pelas normas ISO 14040 e ISO14044 [44], que são um auxílio, pois funcionam como guia para a realização da análise dos indicadores relacionados.

3.2 Estudos de ACV de quadros presentes na literatura

Foi efetuada uma pesquisa na literatura acerca dos estudos ACV realizados, em que o produto em estudo era o quadro da bicicleta. Inicialmente, foi perceptível que a grande maioria dos artigos se referia ao estudo do velocípede considerando para a análise todos os componentes. Contudo, estes estudos foram relevantes para comparar a influência no impacto ambiental do quadro em comparação com os restantes componentes. Posto isto, foi observado um trabalho realizado por G. Mao *et al* [44] sobre a influência na sustentabilidade ambiental de soluções de partilha de bicicletas (*bicycle sharing*) presentes em diversas cidades chinesas com base no método de ACV. Uma das principais conclusões do estudo, enquadrada no âmbito desta dissertação, refere que a fase de obtenção da matéria-prima e de produção é responsável pela maioria das emissões de CO₂, ao longo de toda a vida do veículo. Esta fase corresponde a 60% das emissões totais de CO₂, já no caso da bicicleta convencional é referida uma percentagem de 70 %. Neste estudo também é indicado que para o caso da BE, o quadro em conjunto com a bateria e o motor elétrico são dos principais componentes com maior influência no impacto ambiental total do veículo. Isto justificado pela grande necessidade energética envolvida na produção.

Após ter sido observado que o quadro é o componente responsável pela maioria do impacto ambiental, quer para a BE, quer para a bicicleta convencional, pretende-se avaliar o impacto ambiental apenas do quadro, nomeadamente para compreender a influência do material selecionado sobre o resultado final, ou seja, o indicador global de impacto ambiental. Foi neste âmbito que surgiu a investigação realizada por E. O. Agyekum *et al* [40], o qual realizou uma ACV para quadros de bambu, alumínio e aço, com o objetivo de comparar os resultados destes três materiais. Os resultados encontram-se na Figura 3.1 evidenciando dez categorias de impacto ambiental. De forma global, conclui-se, que o impacto de um quadro de bambu é 50% inferior, em comparação ao quadro de alumínio e 30% inferior em comparação ao quadro de aço. Relembrando que o quadro em bambu, engloba diversos componentes metálicos, que também foram considerados para os resultados. Contudo, perante o critério de uso de água (Figura 3.1), apenas se verifica a influência do quadro de bambu, provocada pela utilização de inseticidas misturados em solução aquosa com a finalidade de preservar as colunas de bambu.

Desta análise observa-se o contributo da incorporação de materiais naturais na construção de quadros de velocípedes, tal como a sua influência no âmbito da redução da pegada ecológica.

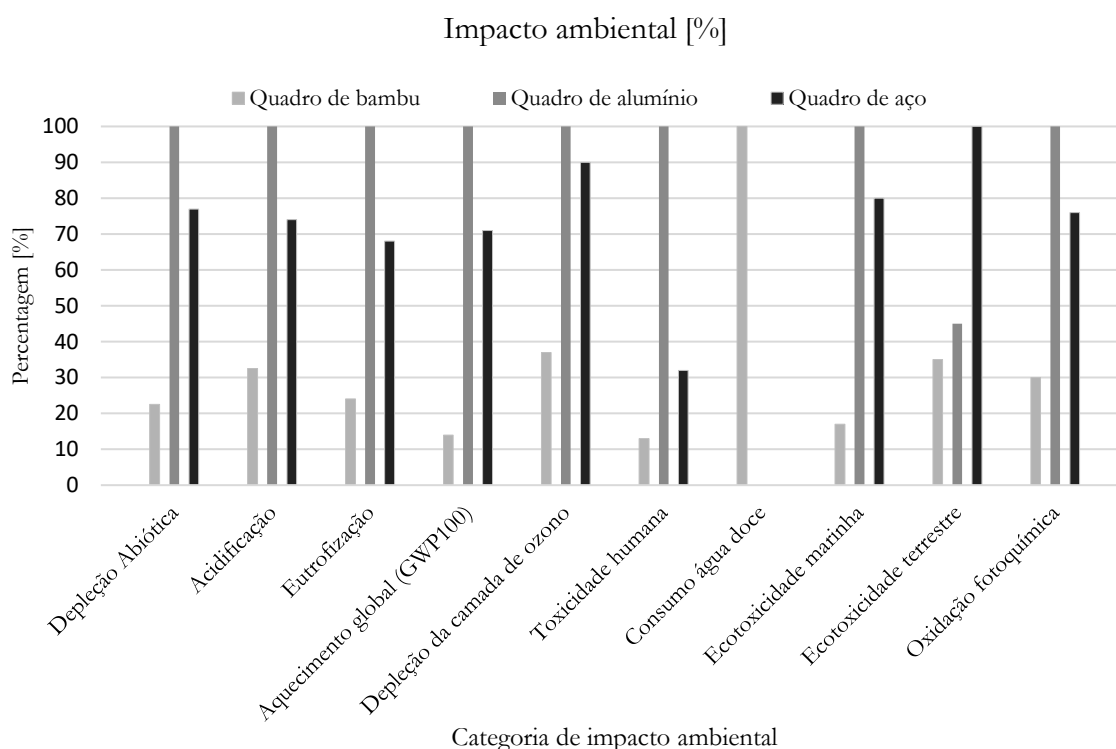


Figura 3.1 - Comparação do impacto ambiental com quadros de bambu, alumínio e aço perante dez categorias. O resultado do quadro com superior impacto na categoria é fixado a 100% (adaptado de [40])

3.3 Fontes de impacto ambiental do quadro

Com base no estudo anteriormente mencionado, são referidos neste tópico as principais fontes de impacto ambiental associadas ao quadro e ao longo do seu ciclo de vida, mencionando apenas a fase de obtenção de matéria-prima, fase de produção e fase de gestão do resíduo final. Como se trata de uma breve análise, não foi mencionada a fase de utilização, assim como todos os impactos gerados pelos fluxos de transporte.

3.3.1 Fase de obtenção da matéria-prima e produção

Foi anteriormente referido na secção 2.5 que os materiais utilizados na construção de quadros eram principalmente o alumínio e o compósito da fibra de carbono, no entanto, estes materiais são reconhecidos pelo seu elevado impacto ambiental, maioritariamente devido ao elevado consumo energético. Este ponto pode ser facilmente compreendido pela visualização do gráfico da Figura 3.2 relativo ao indicador de energia incorporada (*embodied energy*), por unidade de massa, que consiste no somatório de toda a energia necessária para a obtenção de um determinado material.

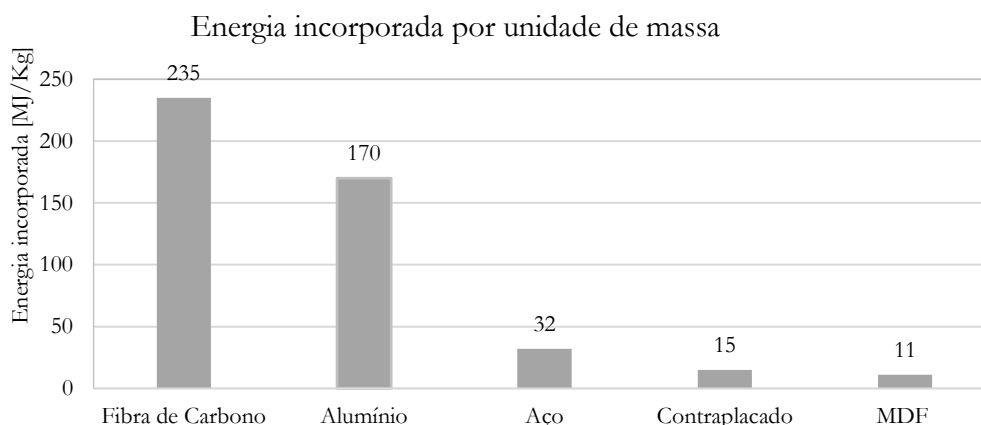


Figura 3.2 - Energia incorporada de diferentes materiais de construção (adaptado de [45] [35])

Observando primeiramente o alumínio, este metal é obtido através da extração de bauxite, e seguidamente processado através do processo Bayer. A bauxite é processada obtendo alumina, que por sua vez sofre um processo de eletrólise de modo a obter alumínio fundido. O processo de eletrólise é responsável por 65% do consumo energético total do processo, pois necessita de temperaturas a rondar 1000 °C. Todo este processo leva a que a intensidade carbónica aproximada do alumínio seja de 10 toneladas de CO₂ libertadas por tonelada de alumínio produzida. Por outro lado, o processo Bayer acresce outros problemas ambientais relacionados com a enorme quantidade de resíduos gerados do processo de lavagem (lamas vermelhas).

Em relação à produção do quadro em alumínio, foi abordado o método no tópico 2.5.1. Os processos de produção do quadro em alumínio também envolvem consumo de energia, contudo, é bastante inferior em comparação ao consumo relacionado com a obtenção da matéria-prima.

À semelhança do quadro em alumínio a fase de obtenção de matéria-prima representa um consumo excessivo de energia, visto que a fibra de carbono é obtida através de derivados do petróleo. São utilizados diversos processos térmicos de modo a obter primeiramente o precursor PAN e em seguida a fibra de carbono. Para além do consumo de energia, ao longo da produção são gerados gases como amónia (NH₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), gases nocivos que devem ser tratados [35]. A construção do quadro em fibra de carbono encontra-se descrita no ponto 2.5.3, sendo que grande parte do processo é efetuado de forma manual e o consumo de energia é bastante inferior quando comparado ao consumo de obtenção da matéria-prima.

Ao contrário dos materiais anteriormente descritos no caso da utilização de bambu é reduzido o consumo de energia, pois a obtenção deste material apenas carece de equipamento de corte. Por outro lado, os componentes metálicos utilizados na construção do quadro geralmente, em alumínio, são os principais responsáveis pelo impacto ambiental deste quadro [40].

3.3.2 Gestão do resíduo final

Perante o quadro de alumínio, a sua disposição é efetuada de forma sustentável, visto que a reciclagem é um método bastante atrativo devido o valor económico deste metal, porém, a reciclagem pode afetar as propriedades mecânicas da liga original.

Já no caso do quadro em fibra de carbono, o tratamento final deste componente pode ser efetuado de diversas formas como: deposição em aterro, incineração e reciclagem por via mecânica ou por via química [35]. Os métodos com maior recorrência são a deposição em aterro e a incineração devido a fatores económicos, pois os métodos de reciclagem para além de complexos e caros envolvem um grande consumo de energia.

Referente ao quadro de bambu, o resíduo final pode ser incinerado de modo a produzir eletricidade.

4. Normas e Regulamentos do Quadro

No desenvolvimento de novos produtos um dos tópicos com maior relevância é a segurança do utilizador aquando da utilização do produto. Desta forma foram adotadas normas europeias, desenvolvidas por instituições, como o Comité Europeu de Normalização (CEN), com o intuito de maximizar a segurança e a qualidade dos novos produtos.

No caso de desenvolvimento de novas bicicletas deve ser considerada a norma EN ISO 4210. Esta não só é utilizada como uma norma europeia, mas também como uma norma internacional e define os requisitos e especificações de segurança de bicicletas de corrida, bicicletas citadinas e bicicletas de montanha, desde que estas possuam uma altura do selim superior a 635 mm. A norma EN ISO 4210, está dividida em nove partes, sendo que cada parte corresponde a uma norma que identifica o processo de validação dos principais componentes e sistemas da bicicleta.

A norma EN ISO 4210-6, que tanto pode ser utilizada para validar quadros de BE como quadros de bicicletas convencionais, define os métodos e as condições para um conjunto de ensaios realizados no quadro da bicicleta. A Tabela 4.1 ilustra os diversos ensaios realizados segundo a norma, estes surgem com o objetivo de simular situações de impacto no quadro, de modo a observar a resistência mecânica do mesmo. Outra série de ensaios tem como intuito observar a resistência e a fadiga do quadro com a aplicação de cargas cíclicas em diversas zonas como na pedaleira, no selim e no garfo consoante o ensaio pretendido. Para todos os ensaios realizados, de acordo com a norma, a validação é verificada consoante a existência de fraturas ou fissuras visíveis em qualquer zona do quadro.

Tabela 4.1 - Ensaio experimentais para validação do quadro ISO 4210-6 (adaptado de [46])

Ensaio de impacto de massa em queda livre																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Legenda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Comprimento entre eixos</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Deformação permanente</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Massa de impacto</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Rolo da forqueta dianteira</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Apoio encastrado no eixo traseiro</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Direção de Impacto</td> </tr> </tbody> </table>	Legenda		1	Comprimento entre eixos	2	Deformação permanente	3	Massa de impacto	4	Rolo da forqueta dianteira	5	Apoio encastrado no eixo traseiro	6	Direção de Impacto		
Legenda																	
1	Comprimento entre eixos																
2	Deformação permanente																
3	Massa de impacto																
4	Rolo da forqueta dianteira																
5	Apoio encastrado no eixo traseiro																
6	Direção de Impacto																
Ensaio de impacto de quadro em queda																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Legenda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Comprimento entre eixos</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Deformação permanente</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Massa 1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Massa 2</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Massa 3</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Apoio com rotação eixo traseiro</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Suporte</td> </tr> </tbody> </table>	Legenda		1	Comprimento entre eixos	2	Deformação permanente	3	Massa 1	4	Massa 2	5	Massa 3	6	Apoio com rotação eixo traseiro	7	Suporte
Legenda																	
1	Comprimento entre eixos																
2	Deformação permanente																
3	Massa 1																
4	Massa 2																
5	Massa 3																
6	Apoio com rotação eixo traseiro																
7	Suporte																
Ensaio de fadiga com as forças exercidas ao pedalar (F_1 - 1000 N)																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Legenda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Apoio dianteiro</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Apoio traseiro</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Rotula</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>adaptador da pedaleira</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Barra de ligação ao eixo traseiro</td> </tr> </tbody> </table>	Legenda		1	Apoio dianteiro	2	Apoio traseiro	3	Rotula	5	adaptador da pedaleira	6	Barra de ligação ao eixo traseiro				
Legenda																	
1	Apoio dianteiro																
2	Apoio traseiro																
3	Rotula																
5	adaptador da pedaleira																
6	Barra de ligação ao eixo traseiro																
Ensaio de fadiga com forças horizontais (F_2, F_3 - 450 N)																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Legenda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Rolo da forqueta dianteira</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Apoio com rotação traseira</td> </tr> </tbody> </table>	Legenda		1	Rolo da forqueta dianteira	2	Apoio com rotação traseira										
Legenda																	
1	Rolo da forqueta dianteira																
2	Apoio com rotação traseira																
Ensaio de fadiga com uma força vertical (F_4 - 1000 N)																	
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Legenda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Rolo da forqueta dianteira</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Extensão horizontal</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Conexão de escora traseira</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Apoio traseiro com rotação</td> </tr> </tbody> </table>	Legenda		1	Rolo da forqueta dianteira	2	Extensão horizontal	3	Conexão de escora traseira	4	Apoio traseiro com rotação						
Legenda																	
1	Rolo da forqueta dianteira																
2	Extensão horizontal																
3	Conexão de escora traseira																
4	Apoio traseiro com rotação																

5. Desenvolvimento Conceptual

Ao longo deste capítulo serão debatidos diversos subtópicos, de modo a ilustrar as metodologias selecionadas, até alcançar um conceito referente ao quadro de BE. Primeiramente será aplicado um conjunto de ferramentas integrantes da metodologia de desdobramento da função qualidade (QFD), mais precisamente a aplicação da matriz do planeamento do produto (matriz da qualidade) que irá processar as necessidades recolhidas e assim exprimir com uma determinada prioridade as especificações do quadro orientadas para a engenharia.

Adicionalmente integrado neste capítulo será realizado o processo de geração conceptual, contudo, o conceito gerado surgirá com recurso a um método de design computacional no qual são consideradas as variáveis de projeto assim como um conjunto de restrições de forma a obter um conceito otimizado.

5.1 Quality Function Deployment (QFD)

A metodologia usada no âmbito de desenvolvimento do produto é o desdobramento da função qualidade. QFD é uma das ferramentas com maior destaque e utilização no processo de desenvolvimento de novos produtos devido a diminuir o número de alterações efetuadas em fases tardias do projeto, contribuindo assim para uma redução de tempo e custos de operação. O QFD é um método focado no consumidor, caracteriza-se essencialmente por identificar necessidades por parte da voz do cliente e posteriormente converter essas necessidades em especificações no produto [47].

5.1.1 Considerações iniciais de desenvolvimento

Inicialmente são tomadas algumas considerações. O quadro a desenvolver destina-se a uma bicicleta com apoio elétrico (*pedelec*). O posicionamento do motor elétrico no veículo é no cubo da roda traseira. Esta opção é justificada devido ao baixo custo e a facilidade de montagem que este tipo de motores possibilita, para além de que não afeta o dimensionamento do quadro, em comparação com os motores aplicados no eixo central de transmissão. Apesar destas vantagens, o posicionamento do motor no cubo da roda traseira influencia principalmente a distribuição de peso do veículo. O motor com um peso aproximado de 3,5 kg, aumenta a carga sobre o eixo traseiro, afetando a dinâmica do veículo. Perante esta situação, a geometria e o dimensionamento do quadro devem ser tidos em consideração, assim como o posicionamento da bateria, que irá ser definida após o desenvolvimento de um conceito.

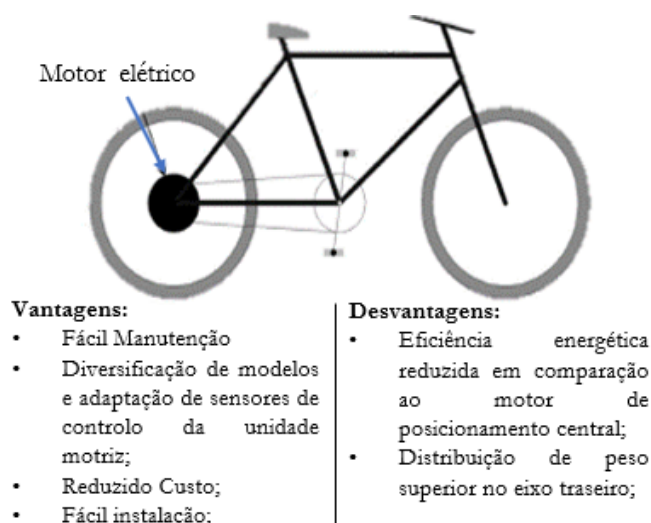


Figura 5.1 - Vantagens e Desvantagens da aplicação do motor elétrico na roda traseira

Outra consideração estabelecida previamente, diz respeito ao tipo de BE a que o quadro se destina, sendo desde logo estipulado que a estrutura se destina a uma bicicleta cidadina, isto devido à crescente importância de geração de novas soluções aplicadas à mobilidade urbana com a premissa de promover novas formas sustentáveis de transporte. Por outro lado, esta seleção também considera outro ponto de vista, o qual se refere à exigência estrutural de uma bicicleta cidadina, quando comparado com uma bicicleta de montanha. As condições de carga são superiores num quadro de bicicleta de montanha, pois destina-se a uma utilização severa com base em terreno irregular, o que demonstra a superior exigência em relação ao desenvolvimento. Enquanto, no caso de um quadro de bicicleta cidadina, este destina-se à utilização em terrenos regulares com estrada pavimentada, o que não impossibilita o surgimento de irregularidades, como por exemplo, a situação de passagem por um lancil.

5.1.2 Identificação do público-alvo

Pretende-se descrever o grupo de potenciais consumidores, para a BE que irá conter o quadro a desenvolver. A identificação é realizada através de um conjunto de critérios como sexo, idade, condição económica e área de residência. O quadro antes de chegar ao consumidor final deve seguir para uma empresa de produção de bicicletas, de modo a efetuar a posterior montagem dos restantes componentes da BE. Como se trata da montagem de um veículo, por razões de segurança, esta não deve ser montada pelo consumidor final.

Desta forma o público-alvo é definido, considerando a BE e não apenas o quadro. Com esta consideração o segmento de mercado que se pretende atingir é o conjunto de indivíduos, de ambos os sexos, com idades compreendidas entre os 25 e os 75 anos e uma classe económica média. O intervalo de idades admitido é bastante abrangente e justificado com o reduzido esforço físico necessário para propulsionar uma BE em comparação com uma bicicleta convencional.

O grupo de consumidores identificados, são indivíduos que residem em zonas urbanas e que pretendem adquirir uma BE como modo de transporte para as deslocações do dia-a-dia, como para o trabalho ou apenas por simples lazer, todavia estas deslocações são efetuadas em terreno regular como estradas pavimentadas.

Em relação ao estilo de vida do consumidor identificado, caracteriza-se por um conjunto de consumidores informados, no que diz respeito às questões ambientais, ou seja, pessoas que procuram e valorizam produtos sustentáveis, com o propósito de diminuir a sua pegada ecológica.

5.1.3 Identificação das necessidades do consumidor

A identificação das necessidades do cliente foi realizada com base em estudos relacionados com a utilização da BE, ou seja, avaliando a experiência da utilização do quotidiano. Através da realização de entrevistas e inquéritos foram relatadas algumas situações que provocam descontentamento no utilizador, tal como foram identificados alguns fatores que influenciam o sucesso de comercialização de uma futura BE.

Por outro lado, foram recolhidas algumas opiniões relativamente à aquisição de quadros com a aplicação de materiais sustentáveis.

Primeiramente foi observado um estudo realizado por *Jones et al* [48], com o objetivo de identificar os motivos e as barreiras relacionadas com a utilização de uma BE. Para isso, foram entrevistados 22 utilizadores residentes no Reino Unido e na Alemanha, com idades compreendidas entre os 37 e os 76 anos. Os maiores desafios relatados são devido ao peso da BE, pois o elevado peso dificulta o processo de transporte do veículo em situações que existe uma plataforma ou passeio a ultrapassar.

Em segundo lugar, foi observado um estudo realizado por *Stilo et al* [49], que abordou um conjunto de características que devem ser adotadas em projetos futuros de BE. Contou com a participação de 638 indivíduos de ambos os sexos e maioritariamente residentes na Europa e na América do Norte.

A principal conclusão do estudo é que os entrevistados expressaram vontade em adquirir uma BE com superior nível de segurança e tecnologia. Com base no conjunto de respostas foi também elaborado um diagrama de afinidades com características prioritárias a incluir no desenvolvimento de uma BE. As características mencionadas relacionam-se com: o baixo peso, a reduzida manutenção, a qualidade de design, a fiabilidade e a durabilidade. Outra conclusão, indica que 53% dos entrevistados considera que o preço justo de uma BE (Figura 5.2), deve situar-se num intervalo entre 1 200 € e 1 700 €.

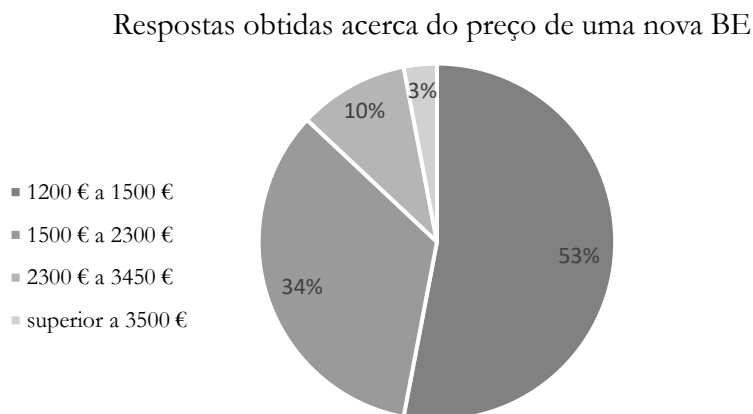


Figura 5.2 - Respostas obtidas acerca do preço disposto a pagar por uma nova BE (adaptado de [49])

Por fim, foram identificados alguns comentários presentes no trabalho realizado por *Nicholas Brent Taylor* [32], relacionados com a aquisição de uma bicicleta construída com materiais naturais, nomeadamente a utilização de bambu e madeira. As principais preocupações identificadas relacionam-se com a segurança e manutenção, pois, a maioria do público, considera uma bicicleta deste tipo, bastante frágil e de reduzida durabilidade, apesar de reconhecer o benefício ambiental da adoção destes materiais sustentáveis, tal como design diferenciador que estes oferecem.

Com base nos estudos previamente referidos e nos exemplos de quadros fabricados em material natural expressos na secção 2.6 é possível estabelecer um conjunto de requisitos do cliente em relação ao quadro a desenvolver:

- **Sustentável** - Requisito estabelecido no âmbito deste estudo, uma vez que se pretende o desenvolvimento de um quadro com uma pegada ecológica reduzida, através da utilização de materiais de base natural na construção do quadro. A sustentabilidade do quadro não é apenas assegurada na sua fase de construção, dado que no fim da sua vida útil, este pode ser reciclado.
- **Leve** - Desenvolver um quadro leve é um ponto fundamental que vai de encontro à necessidade pretendida pelo cliente: uma bicicleta elétrica com reduzido peso, possibilitando o transportar pela mão, quando as condições assim o exigem. A construção de um quadro leve depende da quantidade de material utilizado no fabrico, assim como a densidade do material selecionado.
- **Seguro** - Uma vez que a principal função do quadro é assegurar a estabilidade estrutural, o quadro deve possuir uma robustez adequada. Este requisito é crucial em todo o processo de desenvolvimento do quadro, pois garantir a segurança na utilização de qualquer veículo é prioridade máxima
- **Manobrável** - Requisito relacionado com a funcionalidade. A manobrabilidade está relacionada com a agilidade de locomoção, ou seja, simples quer em movimento retilíneo quer em movimento curvilíneo. As dimensões, o peso e a rigidez são os principais fatores que afetam a manobrabilidade do velocípede, no dimensionamento o parâmetro com maior influência é o ângulo do tubo da direção. Por outro lado, um quadro manobrável também depende fortemente da localização do centro de massa.

- **Confortável** - O conforto durante a locomoção é essencial e proporciona bem-estar ao utilizador diminuindo a fadiga. Neste âmbito, o quadro desempenha uma função relevante na absorção dos impactos originados aquando da utilização do veículo, conseqüentemente o material do quadro deve colmatar as vibrações mecânicas originadas pelo contacto do veículo com o pavimento. O dimensionamento do quadro também está relacionado com o conforto, sendo essencial adequar as dimensões antropométricas do utilizador ao quadro. A incorreta postura do utilizador na bicicleta não só cria desconforto, mas também pode originar lesões corporais.
- **Adaptável** - O quadro deve ser compatível com a maioria dos componentes estandardizados de modo a diminuir o custo de fabrico e facilitar operações posteriores de manutenção. A adaptabilidade também está relacionada com a adoção da maioria dos acessórios disponíveis no mercado, com o intuito de melhorar a experiência do utilizador aquando da utilização do velocípede.
- **Boa acessibilidade** - Durante o dia a dia são diversas as ações de entrada e saída do veículo. Este processo pode provocar situações de desequilíbrio, agravadas consoante o tipo de vestuário utilizado. De modo a atender este requisito, as dimensões do quadro devem ser pensadas, principalmente, a altura do tubo superior.
- **Fácil manutenção** - Em diversos produtos é expresso o desejo de reduzida manutenção, uma vez que o consumidor não quer despendar parte do seu tempo útil e muito menos despendar recursos financeiros com um técnico especializado. Em relação à manutenção do quadro é reduzido o número de tarefas de manutenção, pois são essencialmente operações de limpeza e de reparação de riscos existentes. Contudo, o design do quadro deve minimizar as possíveis zonas de acumulação de resíduos.
- **Durável** - Este requisito está relacionado com a vida útil do quadro. Nem sempre a BE é parqueada em locais protegidos. Quando colocada em locais abertos, encontra-se exposta à radiação solar e, por vezes, a condições climáticas adversas como precipitação. De modo a atender este requisito, o quadro deve possuir um revestimento com intuito de evitar a degradação ao longo do tempo.
- **Preço acessível** - No gráfico da Figura 5.2 encontra-se presente a gama de preços indicada por futuros clientes para um BE, porém, com base na análise de benchmarking referente a quadros sustentáveis denota-se que apenas o preço do quadro é superior ao preço pretendido pelo cliente. De forma a atender esta solicitação do cliente deve optar-se por materiais e processos de fabrico de baixo custo.
- **Design apelativo** - O quadro deve apresentar uma estética apelativa e atrativa devido ao seu nível de acabamento e qualidade de revestimento. Com a adoção de uma combinação de cores e diferentes padrões de customização é possível cativar a atenção do consumidor.

5.1.4 Modelo Kano

Com o propósito de priorizar os requisitos anteriormente enunciados, surge o modelo Kano, esta metodologia assimétrica e não-linear avalia a satisfação do cliente perante o desempenho dos requisitos. Outras metodologias defendem uma relação linear entre o desempenho dos requisitos e a satisfação do consumidor, porém, essas metodologias revelam alguma ineficácia, no que diz respeito à seleção dos requisitos que devem integrar o novo produto e quais devem receber maior priorização [47].

A utilização da ferramenta do modelo Kano processa-se através de um gráfico também designado por diagrama de Kano, em que o eixo das abcissas é um medidor do grau de desempenho de um atributo, enquanto o eixo das ordenadas é referente ao grau de satisfação do cliente. As três funções representadas no gráfico indicam as três principais categorias, segundo o modelo de classificação dos requisitos descrito no Anexo A.

Atendendo a Figura 5.3, observa-se a classificação obtida, da qual denota-se que grande parte dos requisitos possuem uma relação proporcional com a satisfação do cliente. Apenas os atributos robusto e adaptável são classificados como obrigatórios devido à sua forte relação com a funcionalidade e segurança do quadro. A fácil manutenção e design apelativo foram classificados como atrativos por serem atributos com potencial para surpreender o consumidor.



Figura 5.3 - Diagrama de Kano e classificação dos requisitos do quadro

5.1.5 Especificações do quadro

Com o objetivo de proceder ao relacionamento dos requisitos do cliente com o produto, torna-se necessário estabelecer um conjunto de especificações para o quadro. Estas especificações ou requisitos do produto são um conjunto de parâmetros mensuráveis, no entanto, algumas especificações são características qualitativas, relacionadas com o material do quadro e o aspeto visual. Na Tabela 5.1 encontra-se estabelecido o conjunto das principais especificações do quadro e as respetivas unidades métricas. A especificação que refere as dimensões do quadro é bastante abrangente, pois pode ser dividida em múltiplas especificações como por exemplo: a altura do tubo do selim, o comprimento do tubo superior, o comprimento da escora inferior, o ângulo do tubo do selim e o ângulo do tubo da direção. Estas especificações anteriormente mencionadas são, apenas, algumas dimensões referentes ao quadro, porém, as que têm maior relevância para o design e cumprimento dos requisitos do cliente.

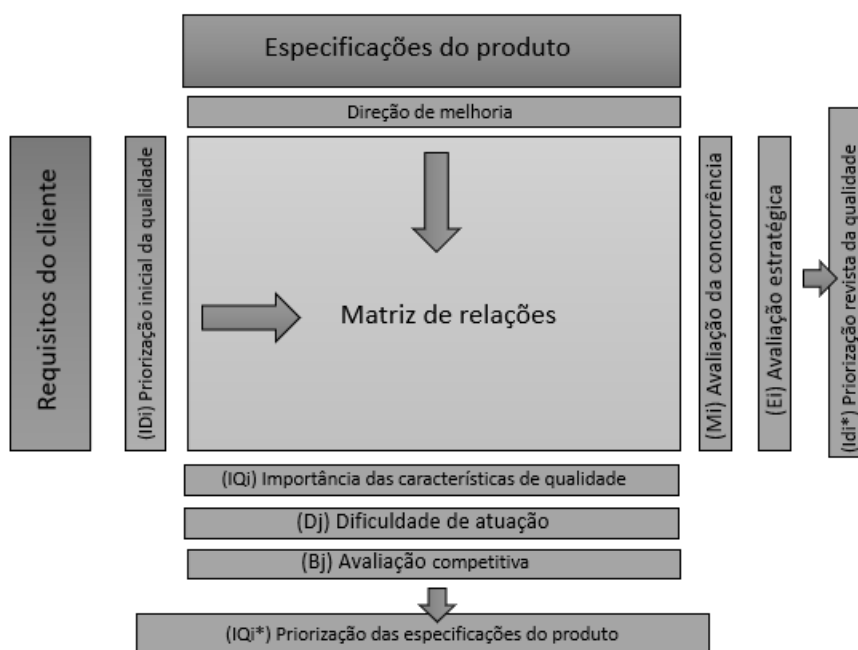
Tabela 5.1 - Especificações do quadro e respetiva unidade

Especificação		Unidade
Desempenho	Rigidez da estrutura	GPa
	Carga máxima suportada	kg
	Vida útil	anos
	Periodicidade de manutenções	meses
	Operações de montagem	unidade
Dimensionamento	Dimensões do quadro	mm
	Massa	g
Outros	Nível Acabamento	-
	Revestimento	-
	Custo	€
	Geometria	-

5.1.6 Matriz da qualidade

No conjunto de matrizes da metodologia do QFD, apenas se pretende utilizar a matriz da qualidade para efeitos do presente estudo, isto devido à superior relevância e utilidade, que esta ferramenta representa em todo o processo de tomada de decisão.

Na Figura 5.4 encontra-se presente o diagrama da matriz da qualidade, a qual foi preenchida no âmbito do estudo e encontra-se no Anexo A. A matriz caracteriza-se principalmente pelo relacionamento entre os requisitos do cliente e especificações do produto obtidos previamente. A correlação entre ambos é expressa na zona da matriz de relações, onde é atribuído o grau de relação, com base na utilização de valores 1,3 e 9 que classificam a relação em forte, média e fraca, respetivamente.

**Figura 5.4** - Esquema da matriz da qualidade (adaptado de [50])

Um dos resultados da utilização da matriz da qualidade é a priorização corrigida dos requisitos do cliente face à priorização inicial [ID_i], estabelecida com o auxílio da classificação do modelo Kano, e do diagrama de Mudge presentes no Anexo A. O diagrama de Mudge foi uma ferramenta utilizada para quantificar os requisitos consoante o seu grau de importância e assim estabelecer a ordem de priorização inicial (ID_i).

Pretende-se obter a priorização revista da procura da qualidade (ID_i^*) através do cálculo da Equação 5.1, que aborda a posição do produto em relação ao mercado (M_i) e também a sua avaliação estratégica (E_i). Em relação à avaliação da concorrência foi realizada com a comparação do quadro pretendido com os atuais quadros compostos por materiais metálicos e compósitos.

$$ID_i^* = ID_i * \sqrt{M_i} * \sqrt{E_i} \quad (5.1)$$

Da utilização da Equação 5.1 são obtidos um conjunto de valores que foram dispostos no gráfico da Figura 5.5, onde é possível observar a nova ordem de importância dos requisitos obtida, onde se realça o posicionamento dos atributos sustentável e leve, face aos restantes, por outro lado são reduzidas as alterações em relação a hierarquização obtida do diagrama de Mudge.



Figura 5.5 - Priorização revista da procura da qualidade

Da utilização da matriz da qualidade também se pretende obter uma hierarquização das especificações do produto. Atendendo à Equação 5.2 obteve a importância das características de qualidade (IQ_j) através do relacionamento da priorização revista (ID_i^*) com a intensidade do relacionamento entre os itens da qualidade solicitada e a característica de qualidade (DQ_{ij}).

$$IQ_j = \sum_{i=1}^n ID_i^* * DQ_{ij} \quad (5.2)$$

Da Equação 5.3 resulta a priorização das especificações do produto face à priorização inicial (IQ_i), resultado da avaliação do produto face ao mercado (B_j) para cada característica e da dificuldade de atuação sobre cada uma (D_j).

$$IQ_i^* = IQ_i * \sqrt{D_j} * \sqrt{B_j} \quad (5.3)$$

A utilização das equações 5.2 e 5.3, permitiu obter o gráfico referente ao peso de cada especificação do quadro (Figura 5.6), destacando principalmente as características referentes à massa, dimensionamento do quadro, vida útil e rigidez da estrutura. O seu grau de importância é explicado devido ao elevado número e grau de relacionamento que estas características possuem com os requisitos identificados do cliente.

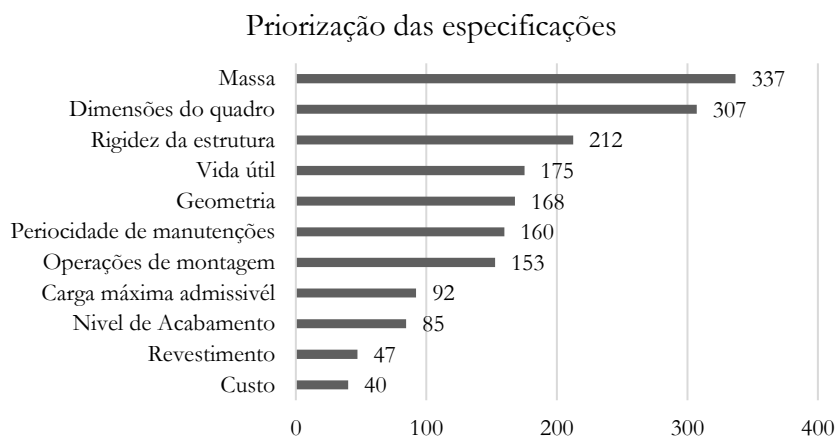


Figura 5.6 - Priorização das especificações do quadro

5.2 Otimização topológica no processo de geração conceptual

Após a definição dos requisitos e especificações referentes ao quadro de bicicleta elétrica segue-se a geração conceptual, sendo que esta fase é convencionalmente caracterizada pela elaboração de conceitos através de esboços ou desenhos, no entanto, pretende-se incluir neste trabalho um sistema alternativo que considera a implementação de métodos de geração conceptual por meio computacional.

Com o crescimento do poder computacional surgiram algoritmos de modo a viabilizar e aprimorar as ferramentas autónomas de design [51], com intuito de obter uma ampla variedade de designs que respeitam as variáveis e as restrições do projeto. Neste contexto, surge o método de otimização topológica (OT), ferramenta, cujo objetivo passa por obter uma solução melhorada de distribuição de material para um determinado domínio pré-definido (Figura 5.7), isto em função de um critério que se pretende maximizar ou minimizar consoante o projeto. São diversas as aplicações da OT em problemas de engenharia, nomeadamente no desenvolvimento de componentes estruturais como o caso do quadro de bicicleta.

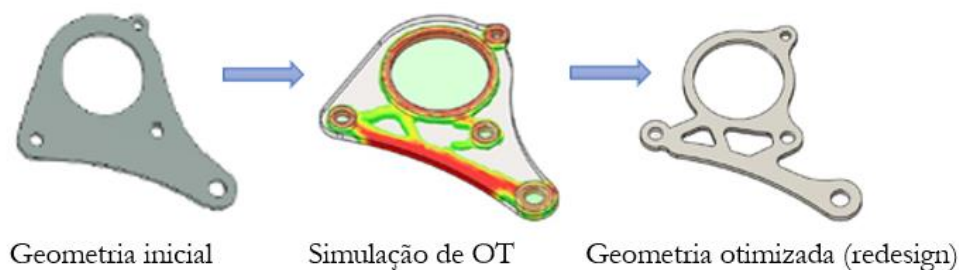


Figura 5.7 - Exemplo ilustrativo de otimização topológica adaptado de [51]

Para a obtenção do conceito referente ao elemento estrutural foi utilizado o método de OT, ou seja, o método de geração conceptual via computacional. Esta escolha para o componente estrutural em estudo, deveu-se a diversos fatores relacionados com as vantagens do design por via computacional relativamente a metodologia tradicional, na qual são elaborados esboços com reduzido detalhe. Posto isto, são diversos os benefícios desta tecnologia, uma vez que este método se inclui nas ferramentas de engenharia auxiliada por computador, designados pela sigla CAE (*Computer Aided Engineering*). Alguns dos principais benefícios são:

- A obtenção de componentes com reduzida massa, sem comprometer os requisitos estruturais previamente estabelecidos em etapas prévias do projeto. Observou-se que na priorização das especificações do quadro (Figura 5.6) que a massa e a rigidez são duas características com maior relevância no projeto, sendo esta a justificação em relação à adoção do método de OT;
- Promoção da sustentabilidade com a redução da quantidade de matéria-prima necessária, assim como redução do consumo energético;
- Contribuição para o aumento da criatividade associada à facilidade de comparação de resultados, uma vez que são gerados com reduzido esforço diversos conceitos, com base na inteligência artificial, que apresentam sempre alguma variação entre si. As soluções obtidas são caracterizadas por difícil concretização ou até inimagináveis por parte do ser humano e da sua capacidade criativa. No caso do quadro são diversas as soluções já existentes referentes a geometria, como foi analisado no estado de arte (secção 2.4), portanto é expectável que se obtenha um conceito com uma geometria original;
- Otimização do processo de desenvolvimento de produto, com a inclusão de recursos computacionais, não só é acelerada a fase de desenvolvimento conceptual, mas também todo o processo de desenvolvimento, o que contribui para uma redução de custos.

São diversos os softwares que dispõem atualmente de um módulo de OT, no entanto, foi adotado o software *Fusion 360* da empresa *Autodesk*, devido à superior interatividade para com o utilizador, assim como devido à sua eficiência, no que diz respeito à realização das simulações via *cloud*. O *Fusion 360* dispõe de um módulo de OT, no entanto este é designado por *Shape Optimization* e o algoritmo utilizado que define a distribuição de material é o SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*). Resumidamente a abordagem SIMP utiliza o MEF (Método dos Elementos Finitos) com intuito de dividir o domínio inicial em pequenas porções e assim proceder à aplicação de um filtro referente à função objetivo, na qual se pretende minimizar a energia de deformação e maximizar a rigidez. Para cada elemento do domínio é obtida uma “densidade virtual” num intervalo de valores entre 0 e 1, sendo que os valores que tendem para 0 indicam as zonas onde deve ser removido material, isto é, zonas com reduzidas concentrações de tensões, por outro lado a gama de valores que tende para 1 representa as zonas que obrigatoriamente devem conter material, referentes às zonas com maior concentração de tensões.

Na Figura 5.8 é possível observar a metodologia aplicada com recurso ao software *Fusion 360*, que apresenta os passos desde a geometria inicial até à obtenção do conceito para o elemento estrutural em causa. Cada secção será detalhada nos seguintes tópicos.

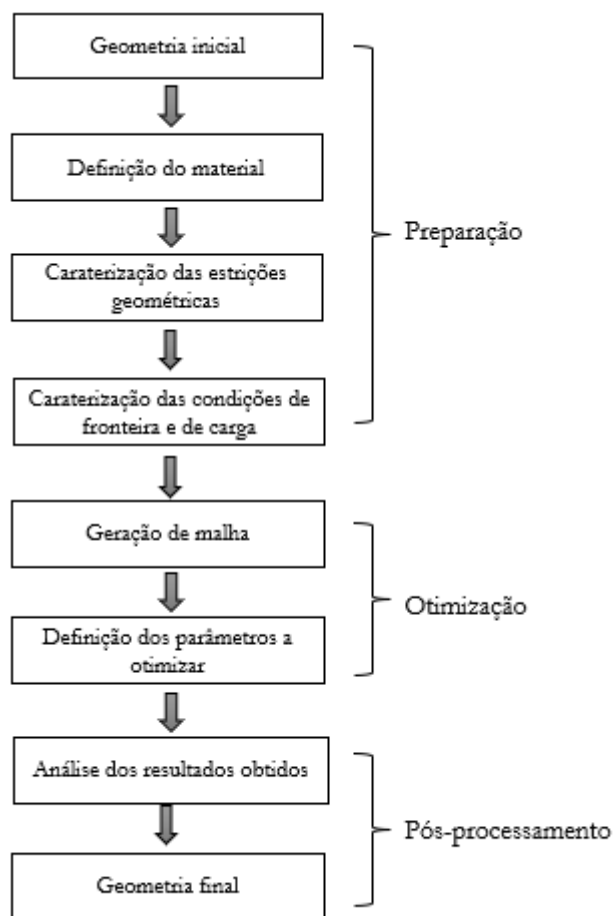


Figura 5.8 - Processo utilizado de otimização topológica

5.2.1 Dimensionamento da geometria inicial

O processo de OT inicia-se com a definição do domínio inicial. Para o caso em estudo pretende-se desenvolver uma volumetria “cheia”, semelhante ao esboço exposto na Figura 5.9, referente ao quadro de um velocípede para posteriormente obter uma estrutura otimizada, visando principalmente a redução de massa.

Nesta fase prematura do processo de desenvolvimento, foram desde logo efetuadas um conjunto de decisões que usualmente são referentes à fase de design de detalhe, pois antes da obtenção de qualquer conceito são precocemente definidas características como: as dimensões base do quadro, o acoplamento da roda traseira, o alojamento da caixa da direção, assim como do suporte do eixo da pedaleira.

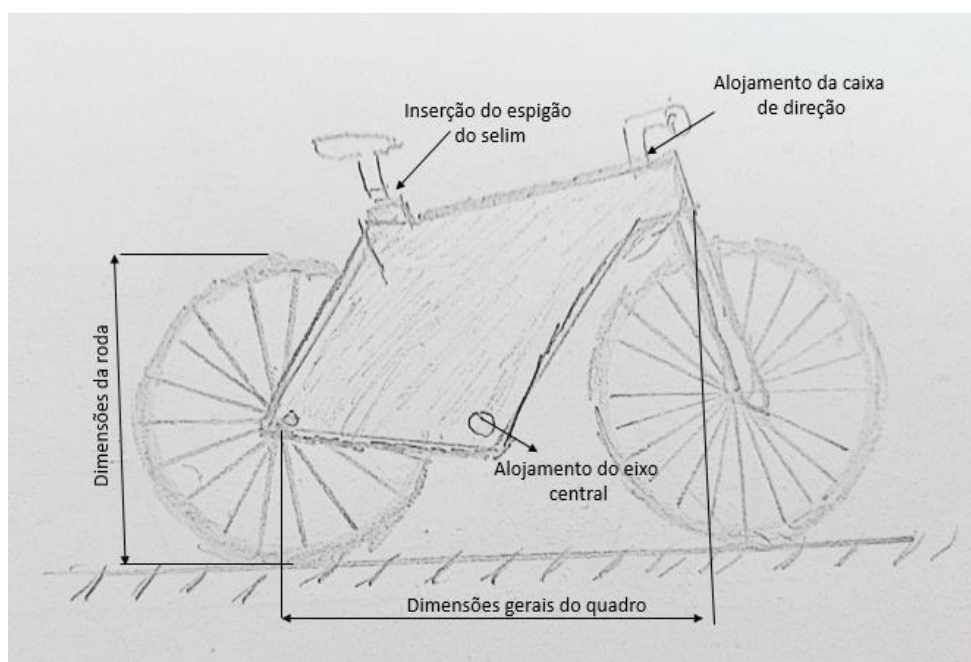


Figura 5.9 - Esboço da geometria inicial do quadro

- **Dimensões do quadro**

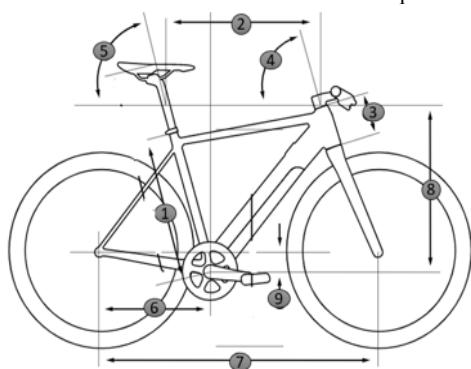
Para o dimensionamento do quadro foi adotado um procedimento de engenharia inversa, uma vez que, para obtenção das dimensões do quadro foi consultado um catálogo com as dimensões para os vários tamanhos disponíveis. Este catálogo pertence ao fabricante europeu de bicicletas, *Canyon Bicycles* [52]. Dos diversos modelos que a marca possui foi consultada a gama de BE destinadas a uma utilização urbana. A principal vantagem da utilização desta metodologia de engenharia inversa é assegurar que o quadro a desenvolver é ergonómico, pois parte-se do princípio que ao adotar o dimensionamento de um modelo da concorrência, é uma forma de garantir que nesta fase foram tidas em consideração as medidas antropométricas do utilizador. No entanto, ao longo deste estudo é efetuado uma verificação ergonómica de modo a observar o ajuste do quadro a conceber, com as medidas antropométricas do utilizador.

Denotar que às proporções corporais variam de indivíduo para indivíduo, o que impossibilita desenvolver um quadro adequado a toda a população adulta, no entanto, a estratégia passa pela adoção, por parte dos diversos fabricantes de bicicletas, de um sistema de standardização, no qual são classificados diferentes tamanhos de quadros em função de uma variável antropométrica, geralmente a estatura. O fabricante anteriormente mencionado, utiliza a Tabela 5.2, que distingue os diferentes tamanhos de quadro disponíveis em função da altura do utilizador.

Tabela 5.2 - Tamanho do quadro em função da altura do utilizador (adaptado de [52])

Tamanho		Altura do utilizador
S	Pequeno	160 cm até 170 cm
M	Médio	170 cm até 180 cm
L	Grande	180 cm até 190 cm
XL	Muito grande	Superior a 190 cm

As medidas selecionadas para o dimensionamento da geometria inicial estão presentes na Tabela 5.3 e são referentes a um quadro de tamanho L. Logo conclui-se que este tamanho é ajustado a indivíduos com uma altura compreendida entre 180 e 190 cm.

Tabela 5.3 - Valores adotados para o dimensionamento da geometria inicial (adaptado de [35])

1	Altura do tubo do selim	520 mm
2	Comprimento do quadro	590 mm
3	Comprimento do tubo da direção	100 mm
4	Ângulo do tubo da direção	70°
5	Ângulo do tubo do selim	73,5°
6	Distância entre o eixo traseiro e eixo central	450 mm
7	Distância entre eixos	1116 mm
8	Altura do tubo da direção	620 mm
9	Diferença de altura entre o eixo traseiro e o eixo central	60 mm

- **Tamanho da roda**

Em relação às dimensões da roda, o essencial é garantir o correto movimento de rotação deste componente e deve-se ter em conta o diâmetro externo e a sua largura. Posto isto, foi selecionada uma roda de 28 in, com a designação 45-622, segundo a norma ISO 5775 referente à standardização de rodas de bicicletas [32]. Denotar que a designação significa que o diâmetro interno do pneu é de 622 mm, enquanto a largura é de 45 mm. Em relação ao diâmetro externo da roda o seu valor é de 700 mm. A escolha de uma roda de 28 in confere uma elevada estabilidade e segurança à bicicleta, assim como permite ultrapassar com relativa facilidade obstáculos, como passeios. No entanto, a adoção deste tamanho diminui ligeiramente a capacidade de manobrabilidade em comparação com rodas de tamanho inferior.

- **Alojamento da caixa de direção, do suporte do eixo central e do espigão do selim**

Relativamente à caixa da direção todos os tipos e medidas encontram-se listados num sistema designado por SHIS (*Standard Headset Information System*) [53]. Para o caso em estudo foi considerado que o quadro a desenvolver deve ser fabricado de modo a incluir uma caixa de direção do tipo tradicional, na qual os rolamentos são alojados no interior dos copos, (Figura 5.10-a) e permanecem no exterior do tubo da direção. Importa referir que o diâmetro interior do tubo da direção é de 30 mm.

Em relação ao suporte do eixo central (*bottom bracket*), todas as dimensões encontram-se igualmente standardizadas, pelo que para o presente caso foi adotado o *bottom bracket* com maior utilização, cujo se designa pela terminologia *BSA/English*. No que diz respeito, à modelação da geometria base, importa reter que o diâmetro interno do suporte (Figura 5.10-b) é de 34,8 mm e o comprimento de 68 mm [53].

De forma a finalizar a modelação da geometria base foi adicionada uma cavidade cilíndrica de modo a alojar o espigão do selim, os diâmetros presentes no mercado variam de 22,2 mm até 32,4 mm [53], portanto foi modelada uma cavidade para alojar um espigão com 25 mm de diâmetro.

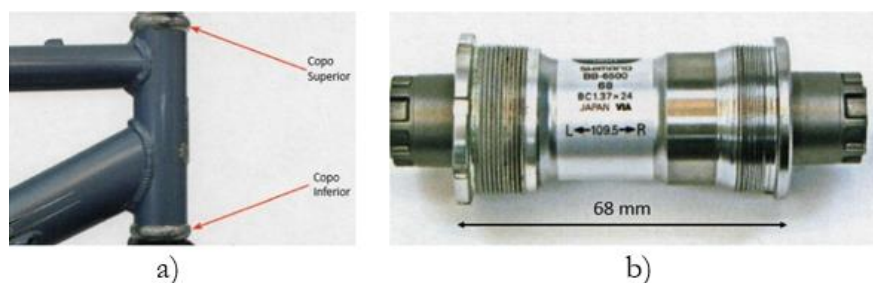


Figura 5.10 - Componentes selecionados a integrar no quadro a) Caixa de direção do tipo convencional (externa), b) *Bottom Bracket* tipologia *BSA/English*, (adaptado de [31])

Com os dados referidos nos pontos anteriores, principalmente da Tabela 5.3, recorreu-se ao software CAD *Solidworks* 2020 de forma a modelar a geometria base do quadro. O resultado pode ser visualizado na Figura 5.11.



Figura 5.11 - CAD referente a geometria base obtida

5.2.2 Situações de carga consideradas

Durante a utilização da bicicleta ocorrem diversas situações, associadas às decisões tomadas pelo utilizador para com o velocípede, decisões que passam, como por exemplo, pelo ato de pedalar, seja sentado ou em pé, ou o ato de manobrar o guiador conforme a direção pretendida. Nestas situações, as solicitações mecânicas diferem, assim como a intensidade e localização das mesmas. Ora estes esforços, para além de serem distribuídos por diversos componentes do veículo, são, principalmente, aplicados sobre o quadro, não fosse este, o componente responsável por essa função estrutural.

Nesta secção são descritos os casos de carga aplicados na estrutura posteriormente ponderados na simulação de OT. Foram selecionados quatro casos: situação de impacto vertical, situação de início de pedalada, situação de pedalada em pé e situação travagem dianteira. Estas situações foram adaptadas de um estudo de *Maestrelli and Falsini* [54] e para cada caso é descrito a localização, a magnitude e direção das forças aplicadas. Considerou-se que a estrutura permanece sobre um plano com inclinação 0° , bem como foram negligenciadas algumas forças opostas ao movimento. A intenção não é apenas analisar os esforços gerados numa situação normal de utilização do veículo, mas também prever uma situação de utilização abusiva onde é ultrapassado o limite de carga entreposta para a estrutura. Consequentemente, algumas forças apresentam magnitudes superiores às convencionais, isto significa que é adotado um fator de segurança como medida preventiva. Por outro lado, pretende-se uma aproximação aos ensaios dinâmicos de impacto presentes na norma ISO 4210-6, isto de modo a aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

- **Caso 1 - Impacto Vertical**

No primeiro caso, encontra-se uma única carga vertical (Figura 5.12), com sentido negativo (eixo Y) e com magnitude de 2400 N aplicada na extremidade superior do tubo do selim. O objetivo deste caso é avaliar a carga máxima que a estrutura deve suportar, só mesmo no pior dos cenários, pois normalmente a magnitude da carga causada pelo peso do ocupante é de aproximadamente 690 N, valor resultante da multiplicação da massa do ocupante de 70 Kg pela aceleração da gravidade de 9.81 m/s^2 .

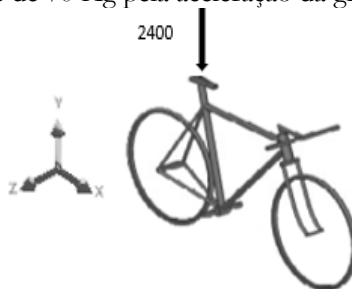


Figura 5.12 - Representação da força [N] aplicada no caso de impacto vertical (adaptado de [54])

- **Caso 2 - Início de Pedalada**

Esta situação é referente ao caso de início de pedalada, no qual o peso do utilizador é suportado pelo selim e é exercida uma força no pedal direito de modo a iniciar o movimento. Denotar que para uma bicicleta com pedalada assistida, o motor elétrico apenas atua sob o sistema de transmissão após ter sido iniciada a pedalada, portanto é desprezado o binário produzido pelo motor para a presente situação. Durante a pedalada são aplicadas forças cíclicas alternando entre o pedal direito e esquerdo, no entanto é adotado o caso de aplicação de força no pedal direito devido à presença do sistema de transmissão neste mesmo lado, o que conduz a um nível superior de esforços neste lado em comparação com o lado esquerdo. As forças aplicadas no presente caso podem ser observadas na Figura 5.13. Observa-se uma carga com sentido descendente na superfície do assento, referente ao peso do ocupante (70 Kg). Também foi aplicada uma força, na zona do eixo central dividida nas componentes X e Y devida à propulsão gerada pelo membro inferior do utilizador. Para o mesmo caso é considerado o apoio das mãos no guiador, o que resulta em duas forças no sentido Y, porém, com sentidos opostos devido à própria estabilidade do veículo aquando da sua locomoção.

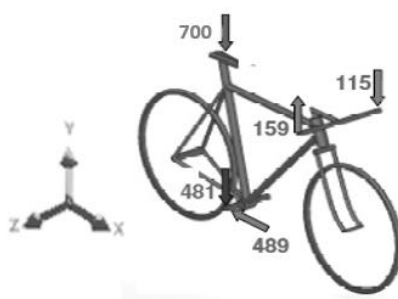


Figura 5.13 - Representação das forças [N] aplicadas no caso de início de pedalada (adaptado de [55])

- **Caso 3 - Pedalada em pé**

Durante a prática do ciclismo, surgem situações como pequenas inclinações onde se torna vantajoso adotar uma posição vertical sem apoio do selim. Esta posição pretende aumentar a potência da pedalada através da maximização da compressão dos pedais por parte dos músculos da anca e dos glúteos, assim como o aumento do balanceamento lateral do velocípede controlado pelos membros superiores que atuam sobre o guiador. Posto isto, é adotado o caso exposto pela Figura 5.14, observa-se uma situação bastante idêntica à anterior, no entanto, sem a presença da força no assento e também é possível visualizar o aumento da magnitude de todas as forças presentes no caso, resultantes do superior esforço efetuado pelo utilizador.

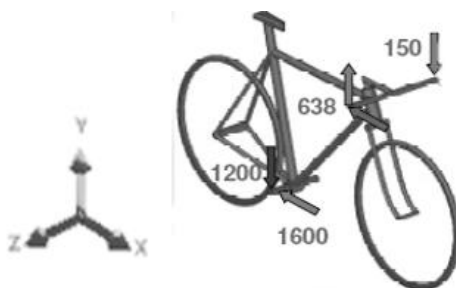


Figura 5.14 - Representação das forças [N] aplicadas no caso de pedalada em pé (adaptado de [55])

- **Caso 4 - Travagem da roda dianteira**

No último caso a ideia passa por efetuar uma análise perante a situação de desaceleração do velocípede. O acionamento do travão dianteiro conduz à alteração da localização do centro de massa, o que conduz a um desequilíbrio na distribuição de peso, pois aumentam os esforços sobre o eixo dianteiro. Dependendo da intensidade da desaceleração pode ocorrer perda de contacto entre a roda traseira e o solo. Na Figura 5.15 pode ser observada a representação das cargas consideradas para a análise estática, nesta situação são consideradas duas forças paralelas aplicadas na extremidade inferior do garfo, com sentido oposto à inércia do movimento. O utilizador de forma a contrariar o fenómeno da inércia, apoia os membros superiores com firmeza no guiador, enquanto os membros inferiores permanecem sobre os pedais. A magnitude das forças aplicadas no guiador é bastante superior em comparação com os restantes casos apresentados, justificado pelo deslocamento de massa do utilizador que anteriormente apoiava no selim.

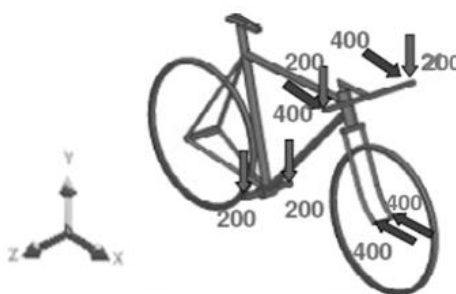


Figura 5.15 - Representação das forças [N] aplicadas no caso de travagem da roda dianteira, (adaptado de [54])

5.2.3 Definição das condições de simulação

O processo iniciou-se com a definição do material, sendo o MDF, o material escolhido, isto por se enquadrar nos objetivos do estudo e por se tratar de um derivado da madeira com uma densidade de 800 kg/m^3 [55], o que contribui para que a geometria base possua uma massa virtual de 15,28 kg.

Apesar do facto deste material apresentar uma ligeira variação de densidade ao longo da sua composição [55] é possível efetuar uma aproximação, considerando um material isotrópico, uma vez que o software está limitado a este tipo de materiais.

De seguida foram atribuídas as condições de fronteira. Para o componente em estudo foi definido que o quadro é suportado por um apoio cilíndrico no eixo traseiro resultante do contato da roda traseira com o solo. Em ambos os pontos de fixação, não é possível ocorrer deslocamento na direção axial e radial. Apenas é permitido que ocorra deslocamento na direção tangencial em torno do eixo traseiro. O quadro foi de igual forma restringido na região do tubo da direção. Devido ao suporte da roda dianteira em conjunto com o garfo, foi aplicado um apoio cilíndrico fixo nas direções radial e tangencial e livre na direção axial. Posteriormente de modo a complementar o sistema foi adicionado um suporte de contato que bloqueia o movimento na direção axial, simulando a interação entre o garfo e base inferior da caixa de direção.

Igualmente foram representadas as forças caracterizadas pela sua: magnitude, direção, sentido e superfície de atuação (Figura 5.16). Na simulação não foram incluídos o guiador, o eixo da pedaleira e o garfo dianteiro, assim as forças aplicadas sobre estes componentes foram estabelecidas como forças remotas e os componentes ausentes são substituídos por corpos rígidos, ou seja, não deformáveis.

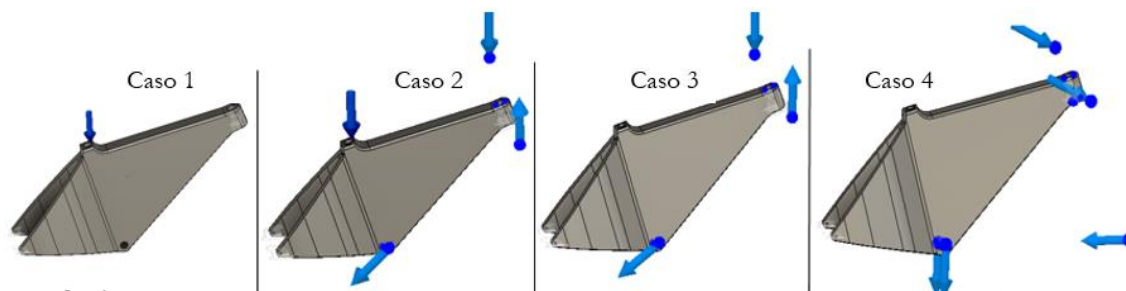


Figura 5.16 - Representação das forças aplicadas nos diferentes casos

Um dos passos fundamentais no processo de OT é definir as restrições geométricas, ou seja, especificar no algoritmo do software quais as zonas onde é interdito remover material, pois estas zonas são cruciais em termos de funcionalidade do objeto. Perante o quadro, atendendo a Figura 5.17 é fundamental preservar material nas zonas representadas a verde com geometria cilíndrica. Também foi adicionado um plano de simetria Oxy, de forma a garantir que a geometria obtida seja simétrica segundo este plano.

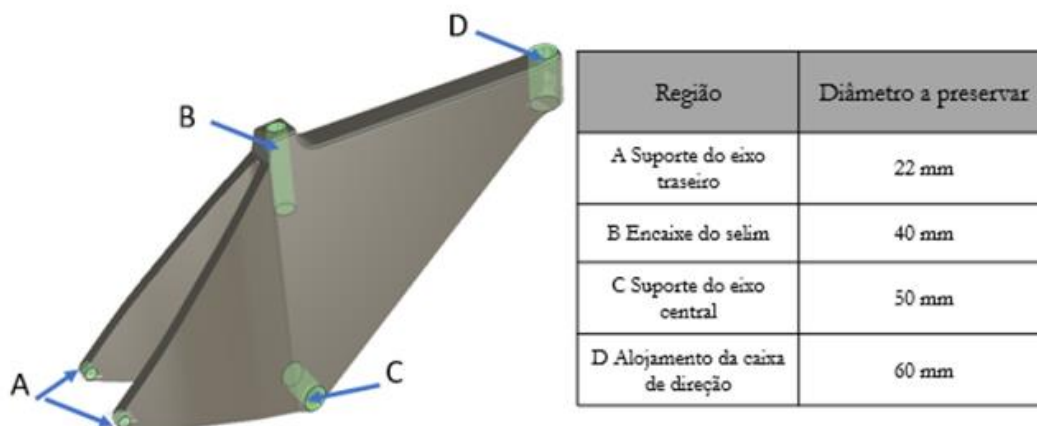


Figura 5.17 - Especificação das zonas a preservar

Posto isto, no software *Fusion 360* é introduzida a percentagem da massa da geometria inicial que se pretende preservar, isto integrado na função objetivo de minimizar a conformidade (*compliance*), ou seja, minimizar a energia de deformação e conseqüente maximização da rigidez. Sendo assim, optou-se por introduzir como alvo uma percentagem de 35% da massa inicial, desta forma prevê-se que os resultados obtidos possuam uma massa superior a 5 kg. Porém, esta decisão foi estabelecida com base num processo iterativo, justificado no tópico seguinte.

5.2.4 Discussão dos resultados obtidos

Relativamente à geometria inicial foram realizadas simulações com outras amostras com volumetria superior. Em comparação com o modelo apresentado na secção 5.2.1, apenas se verificou que com o aumento do volume, maior é a “liberdade” em relação à distribuição de material.

Por outro lado, foram efetuadas simulações, apenas com a variação do tipo de material. Observou-se que o tipo de material escolhido não influencia a geometria obtida, ou seja, qualquer que seja o material isotrópico selecionado, independentemente das suas propriedades mecânicas, o resultado é sempre o mesmo, devido ao facto de previamente ser estabelecida a massa alvo, assim como o objetivo de maximizar a rigidez, apenas é observável em função da densidade do material selecionado.

Com a observação da Figura 5.18, é possível observar dois resultados gerados nas mesmas condições, exceto nas características da malha, assim visualizando o resultado A, conclui-se que a adoção de uma malha com reduzido refinamento produz uma estrutura descontínua, enquanto a adoção de malha com elevado refinamento leva a uma estrutura composta por ramificações tipo “treliça”.

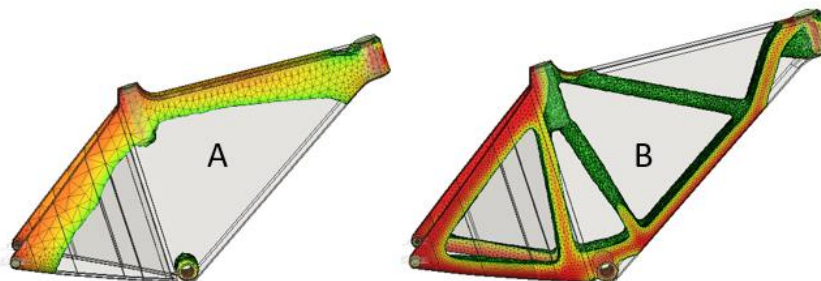


Figura 5.18 - Resultados obtidos referentes a influência do tamanho dos elementos da malha, resultado A- malha inicial com 92653 elementos, resultado B- malha inicial com 419049 elementos

Conforme referido anteriormente, foi estabelecido que o objetivo é obter uma estrutura com 35% da massa da geometria inicial. Esta decisão é justificada com base num experimento, onde foram realizadas quatro simulações nas mesmas condições, porém, com diferentes objetivos de percentagem de massa inicial, 15%, 25% e 35%. Os resultados podem ser visualizados na Figura 5.19. Naturalmente, conclui-se que não é possível optar por realizar simulações com percentagens de massa inicial bastante reduzidas, nomeadamente 15% e 25% devido à existência de rutura de ligações.

Logo não é possível otimizar uma estrutura para valores de massa, semelhantes aos referidos na secção 2.6, para quadros fabricados em bambu ou madeira.

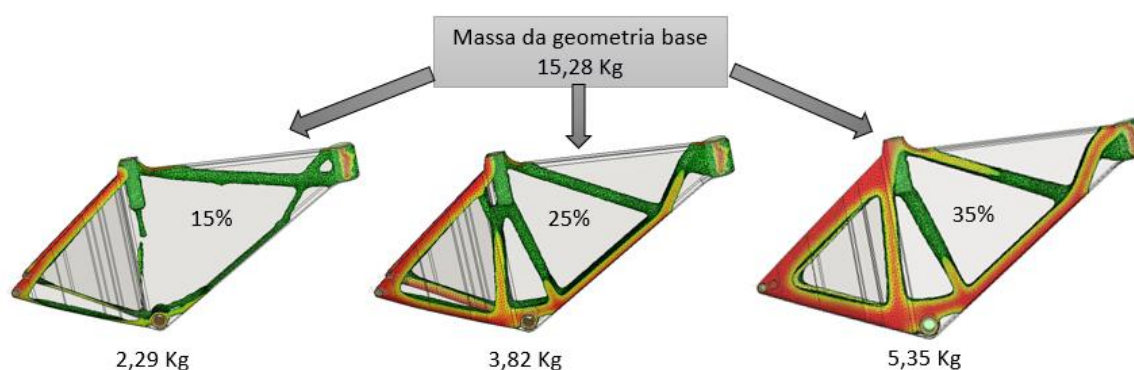


Figura 5.19 - Resultados com diferentes percentagens de massa inicial

Ainda observando a Figura 5.19, nomeadamente o resultado obtido com uma massa de 5,35 kg, é possível identificar uma estrutura composta por diversas ramificações, no entanto, foi verificado, que uma das ramificações pode interferir com o sistema de transmissão do velocípede, especificamente com a passagem da corrente. Como se trata de um componente móvel, suscetível a diversas oscilações, é necessário garantir uma margem de segurança que impeça o contacto da corrente com a estrutura. Foi averiguado que ao prosseguir com o conceito anteriormente descrito existe uma folga de 18 mm para permitir a passagem da corrente que usualmente tem 8 mm de espessura. Por consequência, não é possível afirmar que não ocorrerá contacto entre a corrente e o quadro e possivelmente também degradação da estrutura.

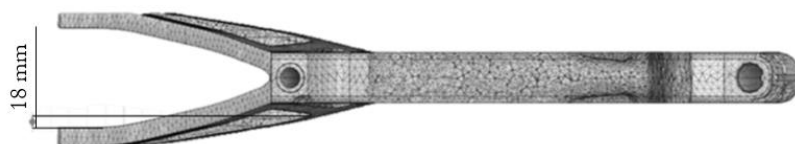


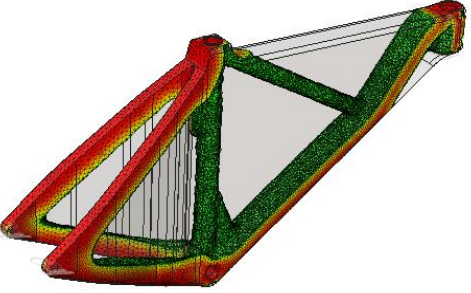
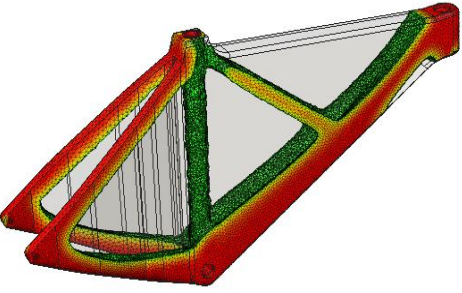
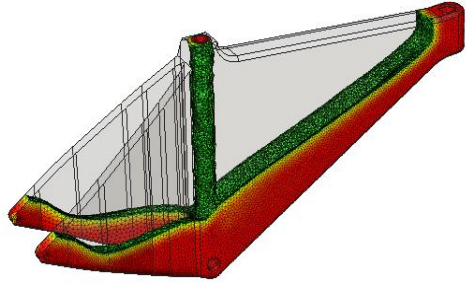
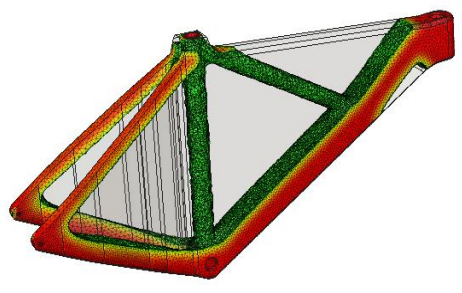
Figura 5.20 - Avaliação da folga existente para instalação do sistema de transmissão

De modo a resolver o problema anteriormente descrito e com o intuito de evitar qualquer tipo de incompatibilidade com o sistema de transmissão foi alterado o conjunto de restrições geométricas mencionadas na secção 5.2.3, referente à permanência da região de alojamento do selim. A alteração efetuada passou pelo prolongamento da zona a preservar até ao eixo central, limitando assim a geometria do quadro, o que levou à formação de apenas uma ramificação na zona central do quadro, semelhante ao tradicional tubo do selim.

Os resultados são referentes às quatro situações de carga referidas na secção 5.2.2 e podem ser observados na Tabela 5.4. Estes são expressos através de um código de cores, onde o vermelho identifica as regiões com maior concentração de tensões, nas quais deve permanecer obrigatoriamente material. Comum aos diversos casos, denota-se que o material é mantido na fronteira do domínio pré-estabelecido e a exceção do caso 3, nos restantes resultados visualiza-se a formação de uma estrutura triangular para suporte do eixo traseiro, bastante semelhante a geometria típica (*diamond frame*).

Perante o caso do impacto vertical, a distribuição de massa tende para a parte traseira do quadro, formando nesta região secções com espessura considerável. Por outro lado, no caso 2 verifica-se uma concentração de material entre o eixo central e a caixa de direção, obviamente devido à existência de forças nestas regiões. Para o caso 3, devido à elevada magnitude das forças aplicadas no eixo central a distribuição de material é efetuada, preferencialmente, na proximidade do eixo central, o que conduz a uma estrutura sem reforço na zona de posicionamento do espigão do selim. Por fim no caso 4 foi obtida uma estrutura balanceada, no entanto, com maior reforço na parte frontal, pois a maioria dos esforços são localizados na caixa de direção.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos das diversas situações de carga considerados

<p>Caso 1 Impacto Vertical</p> 	<p>Caso 2 Início de Pedalada~</p> 
<p>Caso 3 Pedalada em pé</p> 	<p>Caso 4 Travagem da roda dianteira</p> 

Todos os resultados anteriormente discutidos diferem em termos de distribuição de material, porém, para os casos 1, 2 e 4 foram obtidas estruturas bastante semelhantes em termos de geometria, no entanto, pretende-se selecionar um conceito resistente, perante as condições estudadas de modo a prosseguir com o desenvolvimento e para tal foi efetuado um caso, com aplicação simultânea das forças do caso de início de pedalada e o caso de travagem dianteira (Figura 5.21).

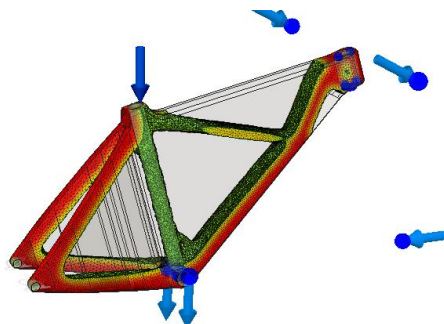


Figura 5.21 - Resultado obtido para a situação de forças combinadas

5.2.5 Pós-processamento e conceito gerado

O reconhecimento do potencial da metodologia de OT¹, tem por base os diversos estudos realizados até à data, que promovem o desenvolvimento de produtos de elevado desempenho, assim como, provêm da crescente utilização em ambiente fabril, no entanto, o maior desafio relaciona-se com a etapa de pós-processamento do resultado obtido [56].

A maioria dos softwares que disponibilizam um módulo de simulação de OT¹, apenas permitem extrair um modelo sólido composto pela malha de triângulos, logo relembrando os resultados anteriormente discutidos. Obteve-se um sólido com inúmeras superfícies triangulares, portanto diversas irregularidades que dificultam o processo de prototipagem, isto sem antes se efetuar qualquer operação de pós-processamento.

No entanto, qualquer operação de pós-processamento resulta na perda de propriedades do resultado inicialmente obtido, nomeadamente, propriedades como a massa ou até a própria rigidez da estrutura.

Posteriormente foi sobreposta a malha sob o CAD da geometria inicial (Figura 5.22-a) de modo a remover material no interior e assim obter o formato da malha, embora com algumas modificações (Figura 5.22-b). Em seguida foram modeladas algumas cavidades na parte frontal do quadro (Figura 5.22-c) com o propósito de minimizar a massa, outra alteração foi o arredondamento das bordas do modelo, eliminando a presença de arestas vivas responsáveis por concentração de tensões. Com estas alterações é estimado que o conceito tenha uma massa de 4,89 Kg considerando que o material utilizado é o MDF. Em relação ao centro de massa do componente prevê-se que a sua localização seja ligeiramente deslocada para a parte frontal do quadro a uma altura de 267 mm do centro do eixo da pedaleira.

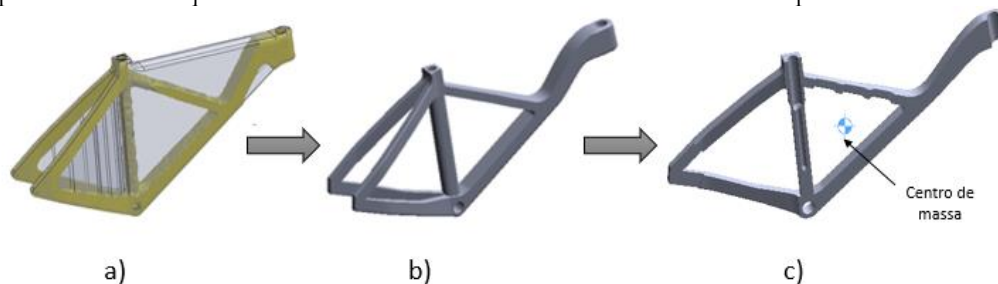


Figura 5.22 - Método de pós-processamento utilizado e conceito gerado: a) Sobreposição da malha na geometria inicial; b) Conceito modelado; c) Conceito otimizado com a inclusão de cavidades na ramificação frontal do quadro (vista de corte);

6. Análise do Quadro Proposto

6.1 Integração dos restantes componentes da BE

Após a obtenção da proposta do quadro explicitada no tópico anterior, ainda sem considerações em relação ao processo de fabrico, surge a necessidade de integrar os restantes componentes e assim modelar a bicicleta elétrica com a finalidade de visualizar o seu aspeto final. Sendo assim, foi realizada a montagem do quadro com os restantes componentes estandardizados (Figura 6.1), que foram retirados da biblioteca online de ficheiros CAD do website *GrabCAD* [57]. Os modelos foram, posteriormente, modificados em termos de dimensionamento para garantir a funcionalidade de todo o sistema. Apenas não se encontram representados os cabos responsáveis pelo acionamento dos travões e controlo do motor elétrico.



Figura 6.1 - Quadro proposto com integrado na bicicleta elétrica

Os componentes instalados são referentes aos diversos sistemas presentes na arquitetura da bicicleta elétrica, como por exemplo o par de rodas de 28 in, o selim, o sistema de direção, o amortecedor frontal e o sistema de travagem composto por travões de disco em ambas as rodas. Assim como os restantes velocípedes é possibilitada a integração de acessórios complementares como luzes, refletores, guardalamas e porta bagageira.



Figura 6.2 - Sistema de transmissão de uma mudança

Atendendo a Figura 6.2, também é proposto a adoção de um sistema de transmissão constituído por uma única mudança (*single speed*). Esta opção resulta numa redução do número de componentes, dado que a corrente estabelece a ligação entre a cremalheira e o único carreto instalado no eixo traseiro, logo exclui-se a presença da cassette e do desviador traseiro, assim como todo o sistema de controlo do desviador. Isto possibilita diversas vantagens como a redução do peso total do velocípede, assim como a redução dos custos de fabrico.

No que diz respeito à bateria, é proposto que este componente seja fixo superficialmente à estrutura com recurso a elementos de fixação, sendo assim, observa-se na Figura 6.1 que a bateria se localiza no centro da estrutura, na proximidade do eixo da pedaleira, o que contribui para a diminuição da altura do centro de massa do velocípede, bem como para a melhoria da distribuição de massa.

6.2 Análise estrutural

Na secção 5.2 foi utilizado o processo de OT, o que permitiu obter um componente estrutural otimizado em termos de massa e rigidez, no entanto, isto não permite garantir a viabilidade mecânica do componente, ou seja, se o quadro resiste aquando da utilização da BE, ainda para mais tendo em conta todas as alterações efetuadas na etapa de pós-processamento e a sua influência sob o comportamento da estrutura. Logo neste âmbito, tal como nos diversos casos de aplicação do método de OT é efetuada uma análise com MEF para avaliar o design proposto em relação a deformações resultantes da concentração de tensões, pretendendo sempre que as tensões obtidas, sejam inferiores a tensão de cedência do material, mantendo o sistema no regime elástico e evitando danos na estrutura.

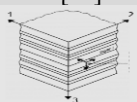
Posto isto, foi realizada uma análise estrutural do tipo estático com recurso ao software *ANSYS 2021 R1* com a ferramenta *Mechanical*, onde foram recriados os casos descritos na secção 5.2.2, porém, neste processo foram modelados e incluídos componentes metálicos de reforço, nas regiões, onde são integrados os restantes componentes da BE. Esta opção para além de ser prática comum em projetos de desenvolvimento de quadros em material natural, como observado na secção 2.6, é justificada pela reduzida resistência dos materiais naturais, o que impossibilita contacto direto destes com outros componentes, em zonas com elevada concentração de tensões, daí a adoção dos reforços metálicos em alumínio.

Com o propósito de obter dados para comparação com o quadro proposto, procedeu-se à realização da análise estrutural com as mesmas condições, para um quadro convencional, em alumínio 6061 modelado previamente com dimensões semelhantes ao quadro proposto. O quadro modelado, tal como os resultados obtidos podem ser observados no Anexo C.

Para a realização das simulações foram mantidas as condições de fronteira aplicadas na simulação de OT, contudo, foi necessário definir os materiais dos componentes, as ligações entre eles e também estabelecer os parâmetros da nova malha. Em relação aos suportes presentes na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** foram aplicadas as propriedades mecânicas referentes ao alumínio 6061-T6 presentes na Tabela 6.1.

Por outro lado, no caso do quadro foram realizadas duas simulações distintas, utilizando o MDF e o contraplacado. Apesar do MDF continuar a ser considerado um material isotrópico, contrariamente o contraplacado é um material ortotrópico, pelo que foi necessário obter as propriedades mecânicas elásticas para as 3 direções do referencial. As propriedades consideradas para estes dois materiais encontram-se abaixo na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Propriedades mecânicas dos materiais utilizadas na análise estrutural

Material	Densidade [Kg/m ³]	Módulo de elasticidade [GPa]		Coeficiente de Poisson		Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rutura [MPa]
Alumínio 6061-T6 [29]	2700	68,9		0,33		260	310
MDF [58]	800	3,59		0,25		9	16
Contraplacado [59] 	650	E1	11,14	v12	0,0456	21	34,5
				v13	0,547		
		E2	5,88	v23	0,466		
				v21	0,024		
		E3	1,41	v31	0,0694		
				v32	0,112		

Para a realização das simulações foi estipulado que os diferentes componentes permanecessem ligados, formando assim a estrutura presente na Figura 6.3, porém, anteriormente no processo de montagem dos componentes efetuou-se uma avaliação de interferência dos contactos, com intuito de eliminar prováveis sobreposições e minimizar as folgas existentes.

No que diz respeito ao tipo de malha utilizada, foi gerada uma malha adaptativa, maioritariamente composta por tetraedros de dimensões variáveis consoante o tamanho das diversas superfícies que compõem o modelo. Foi definido que cada elemento tinha um comprimento de aresta mínimo de 7 mm. Em suma, a malha resultante possui no total 107 732 nós e 53 234 elementos.

**Figura 6.3** - Modelo, composto pelo quadro com a adição de reforços metálicos, considerado para a análise estrutural estática

6.2.1 Discussão dos resultados para as diferentes situações de carga

Seguidamente foram identificadas as regiões do quadro com maior concentração de tensões, tal como foram retirados os valores obtidos da tensão máxima de *Von Mises* para cada componente nas simulações, quer com MDF, quer com contraplacado.

Observou-se que para os vários casos, a tensão de *Von Mises* era superior nas simulações com o contraplacado em relação ao MDF, no entanto, obtiveram-se maiores coeficientes de segurança na presença do contraplacado, pois o coeficiente de segurança é calculado através da tensão limite elástica do material, sendo a tensão de cedência do contraplacado 43% superior ao valor da tensão de cedência do MDF.

Ainda foi possível denotar que os valores referentes às deformações máximas eram ligeiramente superiores nas simulações com contraplacado. Contrariamente ao MDF que possui sensivelmente as mesmas propriedades elásticas nas diversas direções, o contraplacado apresenta um módulo de elasticidade variável conforme a direção (Tabela 6.3), o que resulta numa estrutura com rigidez variável. Ora, isto combinado com a constituição do contraplacado, formado por placas de reduzida espessura intercaladas com adesivo, confere uma superior flexibilidade ao material, daí as deformações superiores em comparação ao MDF.

Da análise efetuada com o quadro convencional, foram obtidos os coeficientes de segurança. Por exemplo, em comparação com o quadro em contraplacado verifica-se uma diferença, 40%, 21% e 42% para os casos 1,2 e 4, respetivamente. Esta grande diferença é devida ao elevado limite de elasticidade do alumínio (260 MPa) em relação ao valor correspondente para o contraplacado (21 MPa).

- **Caso 1 - Impacto Vertical**

Em primeiro lugar, foi simulado o caso de impacto vertical, definido pela aplicação de uma única carga no topo do reforço do espigão do selim, lembrando que se pretende avaliar o comportamento da estrutura considerando o peso máximo que o quadro deve suportar. Posto isto, encontra-se na Tabela 6.2, os valores das tensões máximas de *Von Mises* obtidos para cada componente.

Tabela 6.2 – Valores das tensões máximas obtidos para o caso de impacto vertical

Componente	Tensão máxima de <i>Von Mises</i> [MPa]	
	Quadro em MDF	Quadro em contraplacado
Quadro	3,80	6,70
Reforço eixo da pedaleira	15,15	10,12
Reforço da caixa de direção	7,31	7,06
Reforço do espigão do selim	108,71	109,66
Apoio traseiro direito	139,36	147,69
Apoio traseiro esquerdo	150,60	155,21

Da análise da tabela observa-se que para o caso de impacto vertical, um dos componentes com maior acumulação de tensões é o reforço do espigão do selim (Figura 6.4-c), pois é neste componente que é aplicada a força, no entanto, os maiores valores registados, (destacados a laranja na Tabela 6.2), são referentes aos dois apoios traseiros (Figura 6.4-b) com ligeiro destaque para o apoio do lado esquerdo, pois por se tratar dos apoios traseiros estes componentes são sujeitos a uma elevada compressão.

Por outro lado, considerando apenas o quadro isolado, observou-se da análise da Figura 6.4-a, que a acumulação de tensões é principalmente localizada na parte traseira do quadro, região onde foi obtida a deformação máxima, aproximadamente 1,70 mm e também o valor da tensão máxima, situado nas proximidades do reforço do espigão do selim.

Perante esta situação foi obtido um mínimo coeficiente de segurança de 1,72 e 1,67 para o MDF e o contraplacado, respetivamente, correspondente à localização da tensão máxima no apoio traseiro esquerdo. Lembrando que esta situação, simula o carregamento máximo a que a estrutura deve ser submetida, o comportamento da estrutura foi satisfatório.

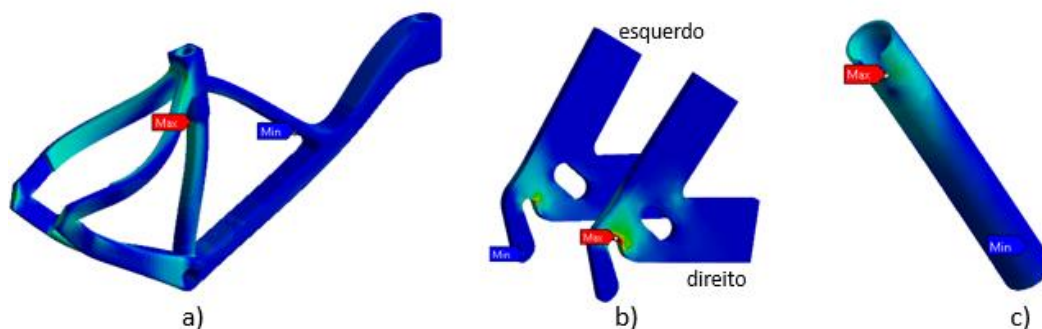


Figura 6.4 - Resultado da tensão de *Von Mises* para o caso de impacto vertical: a) Quadro (escala reduzida), b) Apoios do eixo traseiro, c) Reforço do espigão do selim;

- **Caso 2 - Início de Pedalada**

Em segundo lugar, foi efetuada a simulação do caso de pedalada normal, sendo que se prevê que seja a situação mais comum aquando da utilização da BE. Ora, este caso é composto por um conjunto de forças distribuídas pelos reforços: do espigão do selim, da caixa de direção e pelo eixo da pedaleira. Com base nos dados da simulação foi elaborada a Tabela 6.3, referente às tensões máximas de *Von Mises* obtidas para cada componente.

Tabela 6.3 - Valores das tensões máximas obtidos para o caso de início de pedalada

Componente	Tensão máxima de <i>Von Mises</i> [MPa]	
	Quadro em MDF	Quadro em contraplacado
Quadro	2,69	3,59
Reforço eixo da pedaleira	16,27	16,60
Reforço da caixa de direção	43,05	49,36
Reforço do espigão do selim	31,70	31,98
Apoio traseiro direito	71,71	74,29
Apoio traseiro esquerdo	41,48	46,33

Dos 4 casos presentes nesta análise, esta foi a situação com os menores valores registados de tensões máximas, o que contribui para obtenção de um coeficiente de segurança de 3,34 e 3,43 no caso do MDF e contraplacado respetivamente.

Os componentes com maior acumulação de tensões, coincidem com as regiões de fixação do quadro, ou seja, os dois suportes traseiros e o reforço da caixa de direção. Obteve-se uma diferença de 42% entre os valores do apoio traseiro direito e esquerdo (Figura 6.5-b), isto devido a existência de uma força aplicada no lado direito do eixo da pedaleira. Para o reforço da caixa de direção, o valor da tensão máxima é localizado no topo deste componente (Figura 6.5-c), coincidente com a superfície de aplicação das forças remotas, que simulam a presença do guiador.

Em relação ao quadro, atendendo a Figura 6.5-a é reduzida a acumulação de tensões neste elemento, pois os valores de tensão máxima são inferiores a 4 MPa e localizam-se na proximidade do reforço do eixo da pedaleira, tal como em redor do reforço da caixa de direção.

Dos 4 casos em análise, o caso de início de pedalada foi o que obteve os maiores coeficientes de segurança.

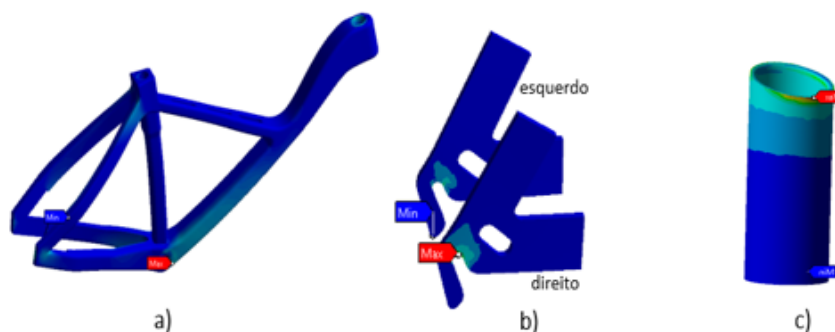


Figura 6.5 - Resultado da tensão de *Von Mises* para o caso de início de pedalada: a) Quadro (escala alterada); b) Apoios do eixo traseiro; c) Reforço da caixa de direção;

- **Caso 3 - Pedalada em pé**

Em seguida foi realizado o caso de pedalada em pé. Relembrando que em comparação ao caso anterior, ocorre um aumento na magnitude das forças, somente aplicadas no reforço do eixo da pedaleira, assim como no reforço da caixa de direção. As tensões máximas de *Von Mises* retiradas deste caso, podem ser observadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Valores das tensões máximas obtidos para o caso de pedalada em pé

Componente	Tensão máxima de <i>Von Mises</i> [MPa]	
	Quadro em MDF	Quadro em contraplacado
Quadro	5,88	10,94
Reforço eixo da pedaleira	51,81	46,77
Reforço da caixa de direção	112,18	115,52
Reforço do espigão do selim	5,01	5,67
Apoio traseiro direito	128,02	129,72
Apoio traseiro esquerdo	113,08	116,08

Um dos componentes com maior concentração de tensões é o reforço da caixa da direção, especificamente no topo deste componente (), registando em ambas as simulações uma tensão superior a 110 MPa, valor resultante da compressão exercida pelo guidador.

Para além da caixa de direção, ocorre uma elevada acumulação de tensões nas regiões de suporte da estrutura e na região central inferior do quadro e à semelhança do caso anterior, constata-se uma diferença, embora ligeira (11%), relativamente aos valores retirados para o apoio traseiro direito e esquerdo (Figura 6.6-b).

Dos resultados obtidos foi possível determinar os valores mínimos do coeficiente de segurança, que na simulação com MDF foi de 1,53 e na simulação com contraplacado foi de 2,01. Estes valores foram identificados no quadro, nomeadamente no bordo do alojamento do reforço do eixo da pedaleira, como se visualiza na Figura 6.6. Nesta figura, também se visualiza que os maiores esforços se concentram na parte inferior do quadro, assim como na região de contacto com o reforço da caixa de direção.

De modo geral, com análise dos coeficientes de segurança, os resultados do comportamento da estrutura são positivos.

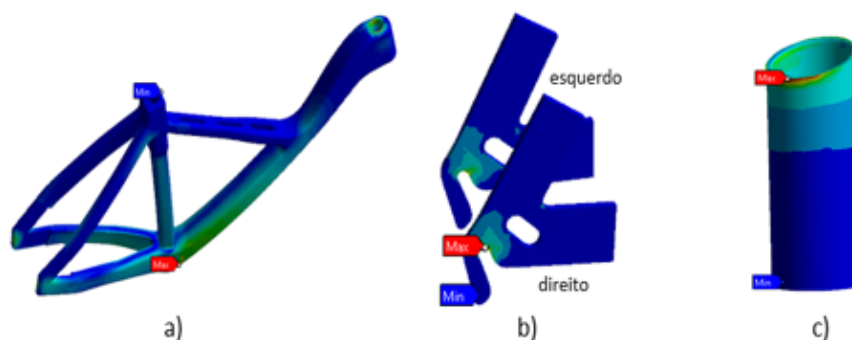


Figura 6.6 - Resultado da tensão de *Von Mises* para o caso de pedalada em pé: a) Quadro (escala alterada), b) Apoios do eixo traseiro, c) Reforço da caixa de direção;

- **Caso 4 - Travagem da roda dianteira**

Por fim, foi recriado o último caso referente à travagem da roda dianteira. Para esta situação a maioria das cargas estão aplicadas sob a caixa de direção, no entanto, foram alteradas as condições de fronteira ao remover o apoio cilíndrico aplicado na caixa de direção com intuito de observar as deformações resultantes na parte dianteira do quadro. Posto isto, encontra-se na Tabela 6.5, os valores das tensões máximas de *Von Mises* obtidos para cada componente.

Tabela 6.5 - Valores das tensões máximas obtidos para o caso de travagem da roda dianteira

Componente	Tensão máxima de <i>Von Mises</i> [MPa]	
	Quadro em MDF	Quadro em contraplacado
Quadro	14,06	20,66
Reforço eixo da pedaleira	15,83	9,75
Reforço da caixa de direção	138,52	141,09
Reforço do espigão do selim	5,46	6,41
Apoio traseiro direito	29,38	28,88
Apoio traseiro esquerdo	17,75	25,88

À semelhança do caso anterior, o componente com maior acumulação de tensões é o reforço da caixa de direção, a distribuição de tensões pode ser observada na Figura 6.7-b. Da análise da figura é observado que a região com maior concentração de tensões é a base do reforço da caixa de direção, isto deve-se ao apoio aplicado nessa superfície, que não permite que ocorra deslocamento na direção normal a esta.

Analisando os resultados obtidos na Figura 6.7-a, verifica-se uma acumulação superior de tensões na parte frontal do quadro, pelo que nesta região foram localizados os mínimos coeficientes de segurança, sendo 0,62 para o quadro em MDF e 1,06 para o quadro em contraplacado. Ora, um coeficiente de segurança inferior a 1, como no caso do MDF, significa que a tensão no local é superior à tensão limite de elasticidade do material, o que leva à ocorrência de deformações permanentes na estrutura.

Desta forma, através dos coeficientes de segurança não é possível garantir a viabilidade do quadro, porém, a situação recriada encontra-se sobredimensionada, pois desde logo não é considerada a influência da suspensão dianteira e além disto para a simulação foram considerados o guiador e a forqueta, como corpos rígidos. Consequentemente prevê-se que na realidade a acumulação de tensões seja menor no reforço da caixa de direção.

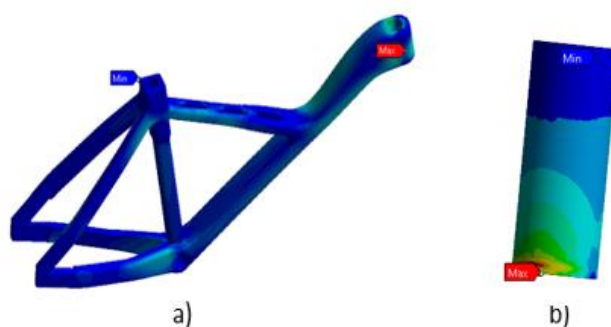


Figura 6.7 - Resultados da tensão de *Von Mises* para o caso de travagem dianteira: a) Quadro (escala reduzida), b) Reforço caixa de direção

6.3 Análise da Rigidez

A rigidez, é uma propriedade preponderante no desenvolvimento de qualquer componente estrutural. No caso da BE a rigidez refere-se ao conjunto de todos os componentes, porém, como se trata de um sistema complexo apenas é analisado o quadro isoladamente. Dependendo da função do velocípede, ora pretende-se um quadro com maior rigidez, ora pretende-se um quadro flexível. Um quadro rígido proporciona melhor desempenho em termos de aceleração e confere uma superior sensação de controlo do veículo, no entanto, cria desconforto ao transmitir elevadas vibrações ao utilizador, geradas devidos a irregularidades do piso, usualmente quadros com elevada rigidez destinam-se a uso profissional, especificamente corridas de ciclismo de estrada. Por outro lado, um quadro flexível, apesar de ser menos responsivo, proporciona um superior conforto ao absorver grande parte da energia gerada pelas irregularidades do piso, logo destinam-se para fins lúdicos ou para utilização urbana.

Posto isto, pretende-se com este tópico efetuar um conjunto de medições de rigidez, através do MEF à semelhança do ponto 6.2, para o quadro proposto, quer em MDF, quer em contraplacado, e do mesmo modo obter os valores nas mesmas condições para o quadro convencional, considerando 3 ligas metálicas: alumínio 6061-T6, aço AISI 4031 e titânio-6AL-4V. As suas propriedades mecânicas utilizadas encontram-se presentes na Tabela 2.4.

Existem inúmeras configurações de testes que podem ser utilizados para efetuar medições de rigidez, no entanto, não existe nenhuma norma específica de testes para a indústria do ciclismo. Contudo, o teste é definido principalmente por 3 fatores: caracterização dos suportes do sistema, definição e aplicação da força no quadro e obtenção do valor de deformação [60]. Assim sendo, foram calculados os valores de rigidez (K) consoante as direções vertical, lateral e longitudinal recorrendo à Equação(6.1, definida pelo quociente entre a força aplicada (F) pela deformação máxima (δ) resultante.

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (6.1)$$

No ensaio de rigidez vertical do quadro, procedeu-se a aplicação de apoios cilíndricos nos reforços traseiros e no reforço da caixa de direção, bem como foi considerada uma força vertical, com sentido negativo e uma magnitude de 2500 N.

Para o ensaio de rigidez lateral do quadro, manteve-se os mesmos suportes da simulação numérica anterior, no entanto, a particularidade desta situação reside na força aplicada perpendicularmente a superfície do quadro, com intensidade de 100 N e com origem na superfície do lado direito do reforço do eixo da pedaleira.

Por fim, no ensaio de rigidez longitudinal efetuado, foram alteradas as restrições do sistema ao apenas, fixar o quadro nos seus dois apoios traseiros. Nesta situação, procedeu-se à colocação de uma carga remota de 100 N na extremidade do garfo, sendo que este componente não é representado na figura e é considerado como um corpo rígido.

Os diferentes resultados das simulações podem ser observados no Anexo D. Através do cálculo da Equação (6.1 foi construída a Tabela 6.6, onde foram obtidos os valores de rigidez para os 3 testes considerados.

Tabela 6.6 - Valores de rigidez obtidos para os 3 ensaios considerados; a) materiais, quadro proposto, b) materiais, quadro convencional

Material	Análise da rigidez vertical do quadro		Análise da rigidez lateral do quadro		Análise da rigidez longitudinal do quadro	
	Deformação [mm]	Rigidez [N/mm]	Deformação [mm]	Rigidez [N/mm]	Deformação [mm]	Rigidez [N/mm]
MDF (a)	0,5719	4371	0,4428	226	1,4701	68
Contraplacado (a)	0,6463	3868	0,4772	210	1,5625	64
Alumínio 6061-T6 (b)	0,2514	9946	0,6622	151	0,2007	498
Aço AISI 4130 (b)	0,0823	30392	0,2168	461	0,0662	1511
Titânio-6Al-4V (b)	0,1506	16600	0,3967	252	0,1203	831

Dos resultados obtidos da Tabela 6.6, verifica-se de um modo geral que a rigidez é influenciada principalmente pelas propriedades do material, pois conclui-se que um material com maior módulo de elasticidade (aço) apresenta um deslocamento máximo menor e por conseguinte maior rigidez.

Denota-se que os maiores valores de rigidez provêm do teste de rigidez vertical, como seria de esperar, pois é nesta direção que a estrutura é submetida a um nível superior de esforços.

Acerca dos valores de rigidez lateral, observa-se que os valores calculados para o quadro proposto são superiores ao quadro convencional em alumínio. Ora, estes valores são resultado da presença de um reforço metálico no eixo da pedaleira do quadro proposto, sendo que a área de atuação da força é superior em relação ao quadro convencional, o que confere uma superior robustez naquela região.

Relativamente aos valores obtidos do teste de rigidez longitudinal, os valores de deformação máxima localizam-se na extremidade dianteira do quadro proposto. Apesar da existência de um reforço metálico na caixa de direção denota-se que esta região é bastante deformável e como tal, foram obtidos os menores valores de rigidez relativamente aos restantes testes efetuados. Destes mesmos valores denota-se uma diferença de 87 % entre a rigidez longitudinal do quadro proposto em MDF relativamente ao quadro convencional em alumínio 6061-T6.

6.4 Análise modal

A BE devido à sua reduzida massa é dos veículos com maior sensibilidade perante as irregularidades do piso. Devido a essas irregularidades e ao sistema de transmissão com apoio elétrico são geradas vibrações que percorrem todo o sistema desde as rodas, passando pela estrutura e por fim transmitidas ao utilizador. Contudo, estas vibrações são indesejáveis pois criam ruído, desconforto e dependendo da sua intensidade podem provocar deformações ou até a rutura da estrutura, isto quando os valores se aproximam das frequências de ressonância.

Para prevenir esta situação, foi realizada uma análise modal de corpo livre, com o intuito de prever o comportamento do quadro ao obter as frequências naturais do sistema, no entanto, em situação real o quadro permanece apoiado, pelo que os dados obtidos diferem da realidade. Os dados obtidos encontram-se na Tabela 6.7.

Foram realizadas simulações com o quadro proposto em MDF, tal como para o quadro em alumínio, que serve como comparação. Inicialmente foram desprezados os primeiros 6 modos de vibração, uma vez que a frequência obtida era bastante reduzida e estes valores são insignificantes para a análise. Sendo assim foram obtidos os seguintes valores para os 10 modos de vibração (Anexo F). Claramente nota-se que os valores para o quadro de MDF e contraplacado são inferiores aos valores do quadro de alumínio, isto é justificado pela superior rigidez do alumínio, em comparação com o MDF.

Um ponto importante é assegurar que as excitações do quadro não igualem as frequências naturais expressas na Tabela 6.7. Um acontecimento pouco provável, pois parte das irregularidades do piso são amortecidas pelo pneu e a suspensão frontal, o que conduz a diminuição da frequência. Por outro lado, o motor elétrico também influencia o sistema, contudo, com maior destaque para o ruído gerado em comparação com a reduzida influência na excitação da estrutura.

A frequência de excitação fornecida pelo pavimento varia entre 0.25 Hz e 20 Hz, no caso da BE considerando a sua velocidade máxima de 25 km/h, todas as frequências naturais se encontram acima da frequência usual de trabalho, pelo que prevê-se, que a estrutura dificilmente entrará em ressonância.

Tabela 6.7 - Frequências naturais obtidas dos respetivos modos de vibração

Modo	Frequência natural de vibração [Hz] quadro proposto (MDF)	Frequência natural de vibração [Hz] quadro convencional (alumínio)
1	41	91
2	53	99
3	98	226
4	146	261
5	160	314
6	200	320
7	233	346
8	264	352
9	280	396
10	282	399

7. Construção do Protótipo Físico

Até agora todas as análises realizadas no capítulo 6 tiveram como base um protótipo virtual, porém, neste capítulo pretende-se realizar a prototipagem de um modelo físico à escala real e totalmente funcional. Este protótipo surge como uma ferramenta de avaliação para verificar se o quadro desenvolvido cumpre os requisitos pré-definidos, principalmente assegurar que o produto cumpre a sua função estrutural de suporte, assim como assegurar que o quadro aloja corretamente os restantes componentes da bicicleta.




7.1 Definição do material do protótipo

Ao longo da secção 2.6 foi realizada uma análise acerca dos potenciais materiais para a construção do quadro com reduzida pegada ecológica, porém, após obtenção do conceito no capítulo 6 apenas foram realizadas simulações com o MEF, utilizando dois materiais: o MDF e o contraplacado.

Perante este projeto é desde logo descartada a possibilidade de utilizar o bambu como material de construção, devido à dificuldade de aquisição deste material, tal como a dificuldade do fabrico da geometria pretendida. Por outro lado, são diversos os estudos de quadros de bambu existentes na literatura, pelo que a sua utilização neste projeto, em nada acrescentaria em termos de inovação científica.

Sendo assim, a seleção do material do protótipo foi efetuada com a utilização de uma matriz de decisão, onde foram comparados 3 potenciais materiais: o MDF, o contraplacado e a madeira de pinho, perante um conjunto de 7 critérios com determinado peso, consoante o gráfico de priorização da procura da qualidade, obtido na secção 5.1.6. Para cada critério foi atribuído um valor 1, 3 e 9 correspondendo ao nível de desempenho, mau, médio e bom, respetivamente.

Tabela 7.1 - Matriz de decisão utilizada na seleção do material do protótipo

Critério	Peso	MDF 		Contraplacado 		Madeira de pinho 	
		Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso
Impacto ambiental	20%	9	1,8	3	0,6	3	0,6
Densidade	20%	3	0,6	9	1,8	9	1,8
Rigidez	15%	9	1,35	3	0,45	9	1,35
Resistência mecânica	13%	3	0,39	9	1,17	9	1,17
Durabilidade	12%	1	0,12	3	0,36	3	0,36
Custo	10%	9	0,9	3	0,3	9	0,9
Relevância científica	10%	9	0,9	3	0,3	1	0,1
Total	100%	41	6,1	33	4,65	37	5,05

Atendendo à Tabela 7.1, observa-se que a maior pontuação obtida (6,1), é referente ao MDF. Esta pontuação é essencialmente justificada pela classificação atribuída nos critérios de impacto ambiental, rigidez, custo e relevância científica.

Relativamente ao impacto ambiental, no capítulo 3 foi elaborado um gráfico (Figura 3.2), contendo os valores de energia incorporada para o contraplacado e para o MDF, observou-se que a produção de MDF apresenta um consumo energético ligeiramente inferior em comparação com o contraplacado.

Relembrando que o MDF é constituído por um aglomerado de fibras de madeira de média densidade comprimidas com a adição de adesivo, portanto, existe a possibilidade da produção de painéis de MDF através do aproveitamento de biomassa, especificamente resíduos florestais com dimensões variáveis o que confere uma produção mais sustentável, ao contrário do contraplacado que é obtido pela sobreposição de finas folhas de madeira provenientes da laminação de troncos de madeira com diâmetro considerável.

Da análise da rigidez efetuada no tópico 6.3 foram calculados os valores da rigidez para o quadro em MDF, sendo que estes eram superiores em comparação aos valores para o contraplacado. Logo a do MDF para a construção do protótipo confere uma superior rigidez a estrutura.

Através da consulta de catálogos de preços do fornecedor Madeivouga, [61] foi possível comparar o preço (€/m²), para os 3 materiais em análise. Verificou-se que o preço de uma placa de MDF é de 10,8 €/m² (variável com a espessura), sensivelmente o mesmo preço para placas de madeira de pinho, enquanto o preço para uma placa de contraplacado é o dobro, podendo ultrapassar os 30 €/m², dependendo do tipo de madeira utilizada. Assim ao utilizar o MDF prevê-se uma diminuição dos custos de prototipagem.

O último critério com maior influência na escolha do MDF para a construção do protótipo é a relevância científica do estudo. Como observado na secção 2.6 são diversos os projetos de aplicação da madeira na construção de quadros de bicicletas, tal como a aplicação do contraplacado, todavia não foi documentada na literatura qualquer aplicação do MDF pelo que este estudo surge como uma avaliação da viabilidade da aplicação deste material.

No entanto, a construção do protótipo neste material apresenta alguns agravantes como o aumento da massa e a diminuição da resistência mecânica da estrutura, isto em comparação com o protótipo caso fosse utilizado o contraplacado. Outra desvantagem, é a elevada degradação do MDF perante condições meteorológicas adversas, presença de agentes biológicos e elevada exposição solar. Esta desvantagem pode ser minimizada através da aquisição de uma placa de MDF hidrófugo com superior resistência á humidade embora ineficaz em caso de submersão em água.

7.2 Processo de prototipagem

Para construção do protótipo físico foram inicialmente discutidas algumas soluções como: maquinação do quadro como se fosse apenas uma única peça, construção do quadro através da sobreposição de camadas de reduzida espessura em função da geometria pretendida ou divisão do quadro em vários elementos passíveis de maquinação CNC.

A obtenção do quadro como se fosse uma única peça é um método inviável, visto que seria necessário a aquisição de uma placa de elevada espessura inexistente no mercado e por outro lado o processo seria limitado, devido às dimensões da mesa de trabalho do centro de maquinação. Outra desvantagem seria a enorme quantidade de resíduo gerado (serrim).

O método de construção do quadro através da sobreposição de camadas foi considerado desadequado, com base na quantidade de trabalho manual e na elevada utilização de adesivos sintéticos.

Portanto optou-se por prototipar o quadro, ao dividir este em vários membros, designados por secções como indicado na Figura 7.1.

Pretende-se que cada membro do quadro em MDF, seja obtido através da utilização de tecnologias de prototipagem rápida, nomeadamente pelo processo subtrativo de maquinação CNC. Esta decisão é justificada pela rapidez de obtenção das peças de elevada complexidade que compõem o quadro, no entanto é de salientar que a adoção deste processo acresce os custos de prototipagem assim como exige um elevado conhecimento por parte do operador.

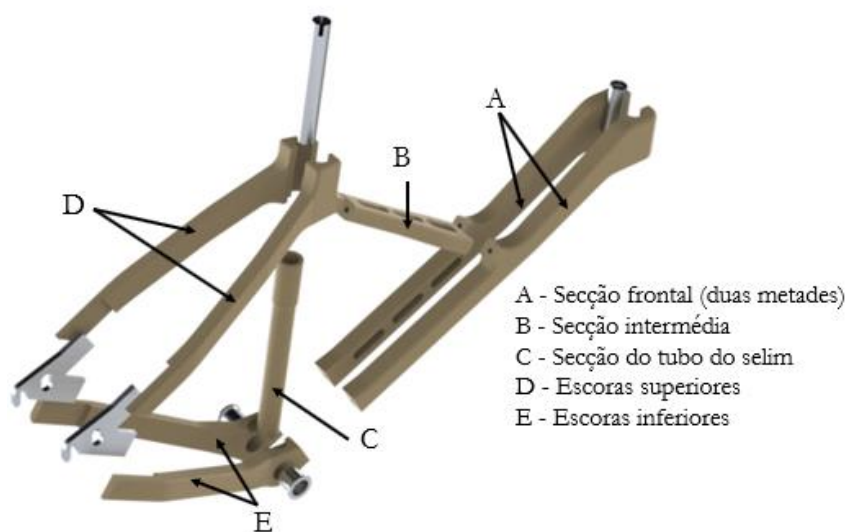


Figura 7.1 - Representação da separação dos membros do quadro em MDF com o posicionamento dos componentes em alumínio

7.2.1 Fabrico dos componentes metálicos

Numa primeira fase foram produzidos os componentes metálicos (Figura 7.2), os desenhos técnicos podem ser observados no Anexo C. Os referidos componentes foram maquinados no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro.

Os reforços traseiros (A e B) foram obtidos por maquinação CNC de uma porção de chapa de 10 mm de espessura. Através da comparação destes dois componentes denota-se a existência de 2 furos adicionais no reforço do lado esquerdo, é devido ao facto de a instalação do sistema de travagem de disco ser efetuada no lado esquerdo nesses mesmos furos.

A peça D1 e D2 foi obtida de um varão de alumínio com 50 mm de diâmetro, isto com recurso a um torno mecânico que também possibilitou a formação de roscas interiores em ambos os componentes com a especificação *Whitworth* 1,37"x 24.

Os componentes C e E foram facilmente maquinados, pois apenas foi necessário efetuar o corte de perfil tubular com diâmetro exterior de 32 mm (C) e 30 mm (E).



Figura 7.2 - Partes metálicas fabricadas em alumínio 6061-T6

7.2.2 Maquinagem dos componentes em MDF

Em seguida procedeu-se a fabricação das peças em MDF. A obtenção destes componentes, apenas é possibilitada após a geração do código CNC. Uma forma eficiente de geração, passa pela utilização de um software CAM (*Computer Aided Manufacturing*), que permite visualizar virtualmente toda a operação de maquinagem seguidamente a importação do ficheiro CAD. A simulação do processo, apenas é iniciada através da definição de um conjunto de parâmetros como: o sistema de eixos, o ponto de partida, as trajetórias, as dimensões do bloco e a geometria das ferramentas utilizadas.

Para a maquinagem dos diversos elementos em MDF hidrófugo foram necessárias duas placas com dimensões de 1210 x 1000 x 35 mm fornecidas pela empresa Madeivouga. Optou-se por uma placa com uma espessura de 35 mm, devido à disponibilidade de stock no momento, aquando da realização deste trabalho, o que obrigou a formar blocos com duas camadas (70 mm) de modo a maquinar os elementos de maior espessura.

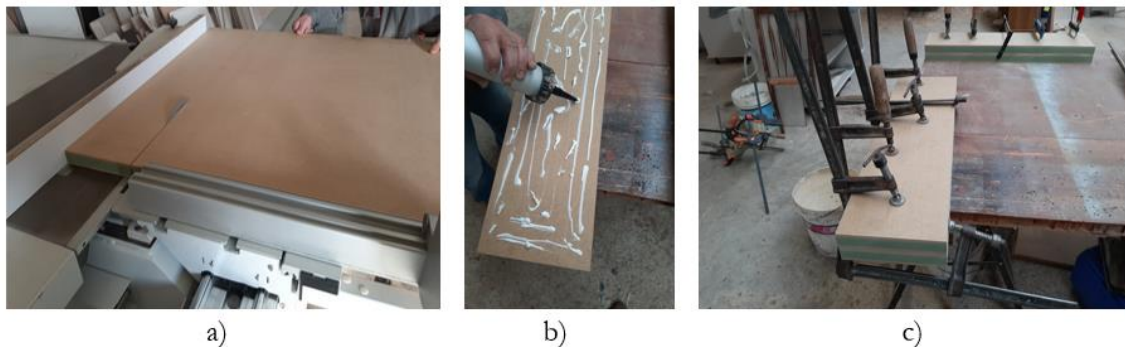


Figura 7.3 - Etapas de preparação dos blocos de MDF: a) processo de corte da placa de MDF; b) aplicação de adesivo; c) sobreposição das placas e prensagem com recurso a grampos

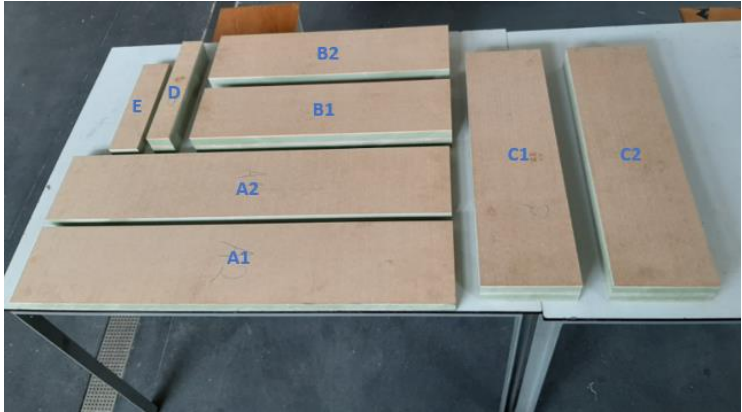
O processo de formação dos blocos para maquinagem encontra-se ilustrado na Figura 7.3 que ilustra as seguintes etapas:

- Inicialmente as duas placas de MDF são seccionadas com recurso a uma serra circular;
- Como anteriormente referido para alguns membros do quadro foi necessário efetuar a junção de duas placas. Esta ligação foi criada com a aplicação de um adesivo de base aquosa de poliacetato de vinila (PVA). Este adesivo caracterizado por uma tonalidade branca confere uma boa adesão estrutural, assim como alguma resistência à humidade, embora não resista às condições de submersão em água;
- Por último os blocos colados foram comprimidos pela ação de grampos, isto durante 72 h, período necessário para solidificação do adesivo;

O resultado do processo anteriormente descrito pode ser observado na Tabela 7.2, onde foi atribuído um código para cada membro, também se observa as dimensões dos blocos formados.

Tabela 7.2 - Dimensões dos blocos de MDF para maquinação dos diversos elementos

Código	Descrição do bloco	Dimensões
A1	Secção frontal direita	1000 x 200 x 35 mm
A2	Secção frontal esquerda	1000 x 200 x 35 mm
B1	Escora superior direita	700 x 200 x 70 mm
B2	Escora superior esquerda	700 x 200 x 70 mm
C1	Escora inferior direita	680 x 180 x 70 mm
C2	Escora inferior esquerda	680 x 180 x 70 mm
D	Secção do tubo do selim	380 x 60 x 70 mm
E	Secção intermédia	330 x 80 x 35 mm



Para a maquinação dos diferentes blocos foi utilizado o centro de maquinação CNC, Mícron VCE 500, presente no Laboratório de Tecnologia Mecânica do DEM. Este equipamento de 3 eixos, contém uma mesa de trabalho com 500 mm de comprimento e 400 mm de largura. Ora devido a estas características o processo de maquinação foi limitado pois os blocos das duas metades da secção frontal e das escoras do quadro, possuem um comprimento superior a 500 mm. Sendo assim, foi necessário adotar uma estratégia de maquinação por fases, através da fixação do bloco em diferentes posições. A estratégia passou por posicionar o bloco sobre uma placa de MDF com dimensões de 1000 x 200 mm. Nesta placa, com a função de apoiar o bloco foram realizados 6 furos roscados, com o intuito de também fixar o bloco com quatro parafusos CHC M10. O esquema de fixação adotado permite reduzir as vibrações resultantes do processo e assim melhorar a precisão de acabamento das peças.

Foi necessário utilizar um software de CAM para todos os componentes em MDF exceto para a secção do tubo do selim, no entanto foi preciso dividir o código em diferentes fases, isto devido às limitações dimensionais da mesa de trabalho do centro de maquinação. Por exemplo para as duas metades da secção frontal o processo de maquinação foi dividido em 2 fases, enquanto por outro lado para maquinação de cada uma das 4 escoras foram necessárias 4 fases, pois a obtenção das peças apenas é possibilitada através da maquinação de ambas as faces do bloco.

Com a geração dos códigos de controlo numérico, foi então iniciado o processo de maquinação. Este pode ser observado na Figura 7.4-a, de realçar que para cada bloco inicialmente foi selecionada uma fresa de topo de 4 navalhas com diâmetro de corte de 16 mm, isto com o objetivo de realizar a maioria do trabalho de desbaste, enquanto o acabamento final foi resultado da utilização de uma fresa de topo de 12 mm com um raio de ponta de 2 mm que permitiu a realização dos contornos da peça.

A peça referente à secção do tubo do selim foi produzida com recurso ao torno paralelo presente no Laboratório de Tecnologia Mecânica (Figura 7.4-b). O bloco que originalmente apresentava dimensões de 380 x 60 x 80 mm foi torneado até obter a forma de um cilindro com 45 mm de diâmetro, seguidamente foi torneada uma cavidade interior com 90 mm de profundidade através do avanço de uma broca de 30 mm de diâmetro.



Figura 7.4 - Fabrico dos componentes em MDF: a) Maquinação CNC do bloco da secção intermédia; b) Maquinação da secção do tubo do selim no torno paralelo

As peças obtidas por maquinação e a secção do tubo do selim encontram-se dispostas na Figura 7.5, note-se que os componentes permanecem em molduras com apoios que estabelecem a ligação entre a peça e a moldura.

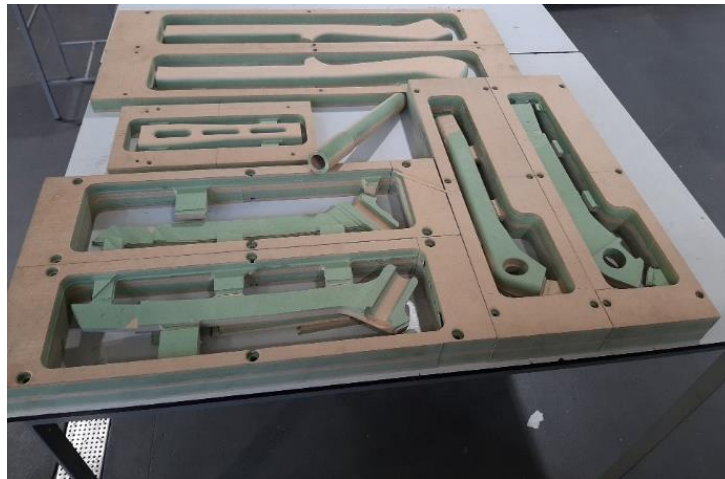


Figura 7.5 - Membros do quadro obtidos por maquinação CNC

7.3 Montagem do protótipo

O processo de montagem do quadro é iniciado com a remoção dos apoios de ligação entre os componentes e a moldura, sendo que para esta tarefa foi utilizada uma serra de fita. Em seguida foram utilizadas ferramentas típicas de carpintaria como o formão, limas e folhas de lixa de vários tipos de grão, com a finalidade de remover as irregularidades que permaneceram e assim, conferir um acabamento superior às peças.

O processo de montagem do conjunto (Figura 7.1) foi segmentado em diversas fases. Inicialmente foram efetuadas as ligações coladas entre: as duas metades da secção frontal, as escoras inferiores e as escoras superiores. Desta forma foi formado o triângulo traseiro do quadro (Figura 7.6-a) através da colocação da secção do tubo do selim e dos apoios metálicos traseiros. Estes componentes em alumínio foram fixados à extremidade das escoras com recurso a componentes normalizados, pois na face metálica foram inseridos parafusos FHC M8 x 30 (ISO 10642), enquanto por outro lado, foram instaladas porcas cegas (DIN 1587) na face exterior em MDF, como ilustrado na Figura 7.6-c.

Por último a secção frontal juntamente com a secção intermédia, foram unidas ao triangulo traseiro através da inserção de cavilhas de madeira D10 x 40 estriadas como pode ser observado na Figura 7.6-b.

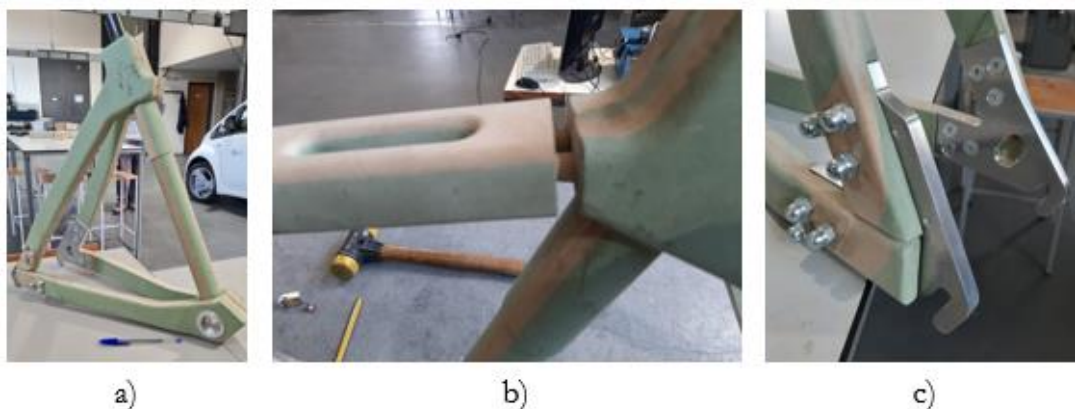


Figura 7.6 - Montagem do protótipo: a) Montagem do triangulo traseiro; b) Inserção de cavilhas de madeira nas juntas do quadro; c) Fixação dos apoios metálicos ao quadro;

A montagem do quadro foi concluída após realizar um polimento superficial com folha de lixa do tipo fino, isto com a finalidade de remover os excessos de adesivo presentes nas diversas ligações que compõem a estrutura. O resultado obtido encontra-se na Figura 7.7.



Figura 7.7 - Protótipo de quadro de velocípede montado

Com o protótipo construído, surgiu a necessidade de avaliar alguns parâmetros, de modo a obter dados com intuito de efetuar uma discussão de resultados, como será efetuado no seguinte capítulo. Posto isto foi realizada a medição da massa do conjunto, contabilizando a massa da estrutura com os elementos metálicos adicionados. A medição foi efetuada numa balança com indicador digital, conforme ilustrado na Figura 7.8. Observa-se que a massa do protótipo desenvolvido é de aproximadamente 5,1 kg.



Figura 7.8 - Medição da massa do protótipo

Outro ponto com relevância, relaciona-se com os tempos de maquinação do protótipo. Neste âmbito foi elaborada a Tabela 7.3, onde é referido o tempo de maquinação necessário para cada componente do conjunto. Com a análise desta tabela, denota-se que foram necessárias 22 h de maquinação para obter as peças em MDF, isto sem contabilizar o tempo de montagem do sistema de fixação e o tempo de configuração das ferramentas. Por outro lado, foram necessárias 7,35 h para maquinar todos os elementos metálicos, assim como para todas as etapas de preparação, acabamento e montagem do protótipo foram necessárias 14,8 h. Do somatório dos tempos anteriormente referidos, resulta que o tempo total de prototipagem foi de 44,15 h.

Tabela 7.3 - Tempos de maquinação dos diversos componentes do conjunto

Componente	Tempo de maquinação [h]	Material	Equipamento utilizado	Total [h]
Reforço traseiro direito	1,70	Alumínio	Centro de maquinação	7,35
Reforço traseiro esquerdo	1,70	Alumínio	Centro de maquinação	
Reforço do espigão do selim	0,42	Alumínio	Torno paralelo	
Reforço da caixa de direção	0,33	Alumínio	Torno paralelo	
Reforço do eixo da pedaleira (2x)	3,20	Alumínio	Torno paralelo	
Escora Inferior direita	2,25	MDF	Centro de maquinação	22,00
Escora Inferior esquerda	2,25	MDF	Centro de maquinação	
Escora superior direita	4,23	MDF	Centro de maquinação	
Escora superior esquerda	4,23	MDF	Centro de maquinação	
Secção frontal direita	2,72	MDF	Centro de maquinação	
Secção frontal esquerda	2,72	MDF	Centro de maquinação	
Secção do tubo do selim	1,50	MDF	Torno paralelo	
Secção Intermédia	1,27	MDF	Centro de maquinação	
Placa de fixação	0,83	MDF	Centro de maquinação	

7.4 Discussão dos Resultados

Neste tópico pretende-se realizar uma discussão, de modo a avaliar o protótipo construído, assim como efetuar uma analogia, não só com os quadros convencionais, mas também com os quadros referidos na secção 2.6. De forma a organizar a discussão, este tópico encontra-se dividido em subtópicos, sendo que cada subtópico é um parâmetro de avaliação.

7.4.1 Massa do quadro

Com referido no capítulo anterior (Figura 7.8), o protótipo realizado contém uma massa de 5,1 kg. Como previsto não foi possível obter um valor de massa ao nível dos quadros convencionais de alumínio e de fibra de carbono. O mesmo acontece em comparação com os quadros em material natural apresentados na secção 2.6. Como se observa na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, a massa do protótipo é o dobro em relação ao quadro em bambu. Apesar do valor considerável de massa obtido do protótipo, conclui-se que este resultado não é negativo, uma vez que se trata de um primeiro protótipo, enquanto para comercializar os restantes modelos apresentados na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, foram necessários dezenas de protótipos ao longo de anos de desenvolvimento.

Uma futura alteração de projeto de modo a minimizar a massa, seria o redesign da secção frontal, onde seriam diminuídas as dimensões da caixa de direção, como também seriam incluídas cavidades interiores. Apesar da adoção destas medidas dificilmente seria obtida uma massa de 4 kg.



Figura 7.9-Valores de massa para diferentes quadros com a utilização de materiais naturais: a) quadro de bambu [41]; b) quadro de madeira; c) protótipo em MDF

7.4.2 Processo de prototipagem

Na eventualidade de proceder a qualquer tipo de produção futura do quadro, convém refletir acerca do tempo de prototipagem, sendo que no caso do quadro desenvolvido este tempo foi de 44,15 h. Verificou-se que o tempo de maquinação CNC dos blocos de MDF foi de 20,5 h, no entanto, este valor foi significativamente limitado devido às dimensões da mesa de trabalho do centro de maquinagem. Prevê-se que, caso o processo não fosse limitado o tempo de maquinação seria reduzido na ordem dos 30%.

À semelhança do protótipo construído, o estudo realizado por *Nicholas Brent Taylor* [43] acerca de um quadro em contraplacado também realça o elevado número de horas de trabalho despendidas em tarefas manuais. Embora não sejam referidos os tempos de prototipagem, o estudo refere que um dos principais fatores que influênciam a qualidade do quadro é o tempo de cura das ligações por adesivo, pelo que estas uniões devem permanecer comprimidas durante um período de 72 horas, logo estes períodos limitam consideravelmente o tempo total de prototipagem.

De modo geral, verifica-se que todos os quadros referidos na secção 2.6, requerem um elevado número de horas de trabalho manual principalmente devido aos processos: de montagem, de colagem e de acabamento superficial.

Voltando ao protótipo em estudo e considerando a complexidade geométrica das peças, conclui-se que o método com maior eficácia e qualidade de produção será a maquinação por CNC. No entanto, uma melhoria de eficiência seria a adoção de um método de moldação por compressão de fibras de madeira em junção com adesivo, isto considerando que para cada peça será necessário o respetivo molde.

7.4.3 Geometria obtida

A geometria do protótipo foi modelada, principalmente com base no conceito obtido das simulações de OT (secção 5.2). Desta forma, foi obtida uma geometria, não obstante da geometria convencional (*diamond frame*) e que também permite uma boa acessibilidade ao utilizador, porém, com uma parte frontal com um aspeto diferenciador, o que torna este quadro único.

Relativamente ao aspeto, denota-se uma desproporcionalidade em relação à volumetria da região da caixa de direção em relação às outras partes da estrutura, ora isto deveu-se às considerações de dimensionamento estabelecidas na secção 5.2.1, onde foi definido que a caixa de direção deveria ter uma altura de 100 mm ().



Figura 7.10 - Destaque da volumetria da secção frontal do quadro

7.4.4 Sustentabilidade

Como foi abordado anteriormente, no processo de seleção de material do protótipo (secção 7.1), a decisão recaiu sobre o MDF devido à sua reduzida pegada ecológica, no entanto, a sua composição apresenta uma pequena porção de adesivo sintético (ureia-formaldeído), sendo que este pode ser substituído pela adoção de resinas biológicas [55]. Contudo, o que diferencia este material em relação aos restantes anteriormente mencionados é a inclusão de biomassa no processo produtivo, o que permite reduzir o consumo de fibra de madeira virgem.

Em relação ao processo de prototipagem, verifica-se que 66 % do tempo de prototipagem é referente à utilização de equipamentos elétricos, especificamente o centro de maquinação e o torno paralelo. Portanto, a utilização destes equipamentos, traduz-se num determinado consumo energético, que por sua vez, representa uma porção do impacto ambiental do quadro. porém, uma quantificação do impacto gerado, apenas é permitida através de um estudo de ACV do protótipo em estudo.

Por outro lado, durante o processo de maquinação foram geradas grandes quantidades de serrim de MDF (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**). Ora como não foi utilizado qualquer tipo de fluido lubrificante, existe a possibilidade de reaproveitamento de todo o resíduo gerado na produção de painéis de MDF, promovendo assim o conceito de economia circular.

8. Conclusões e Trabalhos Futuros

8.1 Considerações finais

De um modo geral, com a realização do estado de arte foi possível concluir que das centenas de empresas associadas à indústria europeia do ciclismo, apenas uma minoria se dedica à produção de quadros de bicicletas com materiais naturais. Observou-se que dificilmente é possível construir um quadro apenas em material natural, pois todos os casos identificados contêm elementos metálicos de reforço, assim como são utilizados adesivos sintéticos nas uniões entre os diversos membros da estrutura.

Relativamente ao protótipo construído, conclui-se primeiramente que a adoção de uma metodologia de OT surgiu como uma mais-valia, visto que foi obtida uma estrutura com um aspeto diferenciador adequada aos requisitos e especificações previamente estabelecidos.

À semelhança de outros estudos previamente realizados, comprova-se que a construção de um quadro com a utilização de materiais derivados da madeira, destinado a um velocípede, requer um elevado número de horas de trabalho manual.

Por último, verificou-se que com a utilização do MDF é possível produzir um quadro, no entanto, com o dobro da massa relativamente a quadros de bambu e madeira, isto é justificado pela densidade do MDF. Por outro lado, como o painel de MDF é composto por fibras de madeira com reduzido comprimento, este é facilmente degradável o que conduz a um ciclo de vida bastante reduzido.

8.2 Trabalhos futuros

Ainda que os objetivos traçados tenham sido alcançados, consideramos que este estudo tem outros caminhos a percorrer. Assim sendo, uma primeira sugestão para trabalhos futuros, passa pela continuidade do projeto através da integração de componentes da bicicleta com apoio elétrico, uma vez que ao longo do capítulo 5 foram definidas diversas soluções referentes ao desenvolvimento da BE.

Outra proposta seria a construção de um segundo protótipo, com melhorias relativamente ao design e ao processo de montagem. Isto com intuito de realizar diversos ensaios mecânicos, tal como as simulações de MEF efetuadas neste estudo.

Como esta dissertação se encontra inserida na temática da mobilidade sustentável, seria interessante desenvolver um estudo teórico, através da utilização do método de ACV, com o intuito de quantificar o impacto ambiental do protótipo desenvolvido neste estudo, e, assim, realizar uma comparação com outros dados presentes na literatura para quadros produzidos em alumínio e fibra de carbono.

Por fim, uma última proposta, seria o desenvolvimento de um quadro com a utilização de materiais compósitos de madeira, especificamente o WPC (*Wood Plastic Composite*), devido às boas propriedades mecânicas e à resistência à água em relação aos painéis de derivados da madeira. Contudo, estes compósitos apresentam uma composição com uma elevada porção de polímeros plásticos, o que torna desinteressante, em termos de sustentabilidade.

Bibliografia

- [1] R. Luiz, D. Jugend, M. Antonio, and P. Pinheiro, “ecodesign practices and tools for new,” 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-817382-4.00006-X.
- [2] EC, *A community strategy for ‘sustainable mobility,’* Commission., no. February. Brussels, 1992.
- [3] C. Relvas, *A Bicicleta: um motor de mudança*, vol. 53, no. 9. 2018.
- [4] E. Holden, D. Banister, S. Gössling, G. Gilpin, and K. Linnerud, “Grand Narratives for sustainable mobility: A conceptual review,” *Energy Research and Social Science*, vol. 65. Elsevier Ltd, p. 101454, Jul. 01, 2020, doi: 10.1016/j.erss.2020.101454.
- [5] “PORDATA - Produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis (%).” [https://www.pordata.pt/Portugal/Produção+de+energia+eléctrica+a+partir+de+fontes+renováveis+\(percentagem\)-1232](https://www.pordata.pt/Portugal/Produção+de+energia+eléctrica+a+partir+de+fontes+renováveis+(percentagem)-1232) (accessed Mar. 14, 2021).
- [6] A. Petrillo, S. Mellino, F. De Felice, and I. Scudo, “Design of a Sustainable Electric Pedal-Assisted Bike: A Life Cycle Assessment Application in Italy,” in *New Frontiers on Life Cycle Assessment - Theory and Application*, IntechOpen, 2019.
- [7] K. J. Lee, C. H. Yun, and M. H. Yun, “Contextual risk factors in the use of electric kick scooters: An episode sampling inquiry,” *Saf. Sci.*, vol. 139, p. 105233, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.SSCI.2021.105233.
- [8] S. I. de 2019-03-05 Diário da República n.º 45/2019, “Despacho n.º 2210/2019 Ambiente e Transição Energética,” vol. 2018, pp. 2018–2019, 2019.
- [9] “Segway to End Production of Its Original Personal Transporter - The New York Times.” <https://www.nytimes.com/2020/06/24/business/segway-pt-discontinued.html> (accessed Mar. 15, 2021).
- [10] B. Sawatzky, I. Denison, S. Langrish, S. Richardson, K. Hiller, and B. Slobogean, “The Segway Personal Transporter as an Alternative Mobility Device for People With Disabilities: A Pilot Study,” *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 88, no. 11, pp. 1423–1428, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.apmr.2007.08.005.
- [11] C. McIlvain, G. Hadiza, T. J. Tzavaras, and G. S. Weingart, “Injuries associated with hoverboard use: A review of the National Electronic Injury Surveillance System,” *Am. J. Emerg. Med.*, vol. 37, no. 3, pp. 472–477, 2019, doi: 10.1016/j.ajem.2018.06.022.
- [12] “Mi Global Home.” <https://www.mi.com/global/mi-electric-scooter/> (accessed Sep. 18, 2021).
- [13] “Bolt | Trotinetes.” <https://bolt.eu/pt-pt/scooters/> (accessed Mar. 16, 2021).
- [14] “About Us - Lopifit US.” <https://lopifitus.com/about/> (accessed Mar. 17, 2021).
- [15] N. B. Hung and O. Lim, “A review of history, development, design and research of electric bicycles,” *Applied Energy*, vol. 260. Elsevier Ltd, p. 114323, Feb. 15, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114323.
- [16] “1993 PAS (PA26-A) - Communication Plaza | Yamaha Motor Co., Ltd.” https://global.yamaha-motor.com/showroom/cp/collection/pas_pas_pa26-a/ (accessed Mar. 16, 2021).
- [17] Parlamento Europeu e do conselho, *DIRETIVA 2002/24/CE*. 2002.
- [18] B. J. Robinson and J. Scoon, *Cycle Regulations Review - Final Report*. 2013.
- [19] A. Castro *et al.*, “Physical activity of electric bicycle users compared to conventional bicycle users and non-cyclists: Insights based on health and transport data from an online survey in seven European cities,” *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 1, p. 100017, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.trip.2019.100017.

- [20] “Bicicleta Elétrica de Cidade ELOPS 120 E ELOPS - À venda na decathlon.pt.” https://www.decathlon.pt/bicicleta-eletrica-elops-120-e-id_8560548.html (accessed Mar. 16, 2021).
- [21] “BH Bikes maestro_bici_seo_bicicletas eléctricas | BH Bikes Store PT.” https://www.bhbikes.com/pt_PT/bicicletas/bicicletas-eletricas (accessed Mar. 16, 2021).
- [22] “BH Bikes | Bicicletas BH.” https://www.bhbikes.com/pt_PT/bicicletas-electricas/bicicletas-electricas-carretera (accessed Mar. 16, 2021).
- [23] “Gocycle - The best electric bike in the world.” <https://gocycle.com/#models> (accessed Mar. 27, 2021).
- [24] REGULAMENTO (UE) N. o 168/2013 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, “homologação e fiscalização do mercado dos veículos de duas ou três rodas e dos quadriciclos,” *J. Of. das Comunidades Eur.*, 2013.
- [25] “GOVECS FLEX | GOVECS AG.” <https://www.govecsgroup.com/modelle/govecs-flex/> (accessed Mar. 17, 2021).
- [26] CONEBI, “European Bicycle Market 2017,” p. 81, 2017, [Online]. Available: <http://asociacionambe.es/wp-content/uploads/2014/12/European-Bicycle-Industry-and-Market-Profile-2017-with-2016-data..pdf>.
- [27] “Industry & Market Reports – Conebi.” <https://www.conebi.eu/index.php/industry-market-reports/> (accessed Mar. 10, 2021).
- [28] ACEM, “ACEM Statistical release. Motorcycles Registrations in the European Unions grew by 8% in 2019,” no. February, pp. 2018–2020, 2020.
- [29] F. R. W. David Gordon Wilson, Jim Papadopoulos, *BICYCLING SCIENCE Third edition*. 2004.
- [30] T. Tomaszewski, “Fatigue life analysis of steel bicycle frame according to ISO 4210,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 122, p. 105195, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.105195.
- [31] A. Livesey, *Bicycle Engineering and Technology*. Routledge, 2020.
- [32] N. B. Taylor, D. Bernabé, and H. Ortuño, “The Feasibility of Wood and its Derivatives as a Bicycle Frame Building Material Viabilidade da Madeira e dos seus Derivados na Construção de Quadros de Bicicletas,” no. January, 2016.
- [33] M. F. Ashby, “Material Property Charts,” in *Materials Selection in Mechanical Design*, Elsevier, 2011, pp. 57–96.
- [34] C. J. McMahon, S. Woods, R. Weaver, and M. A. Giorgetti, “Sporting Materials: Bicycle Frames,” *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.*, no. July 2015, pp. 1–5, 2016, doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.02189-5.
- [35] E. Pakdel, S. Kashi, R. Varley, and X. Wang, “Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 166, p. 105340, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105340.
- [36] “Black magic: How carbon fibre bicycle frames are made - CyclingTips.” <https://cyclingtips.com/2018/01/how-carbon-fibre-bicycle-frames-are-made/> (accessed Apr. 01, 2021).
- [37] F. Penava, S. Jakovljevic, and Z. Alar, “Bamboo Bicycle - Past or Future?,” *Interdiscip. Descr. Complex Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 70–79, 2016, doi: 10.7906/indecs.14.1.7.
- [38] T. Nishimura, *Chipboard, oriented strand board (OSB) and structural composite lumber*. Elsevier Ltd., 2015.
- [39] F. Penava, S. Jakovljevic, and Z. Alar, “Bamboo Bicycle - Past or Future?,” *Interdiscip. Descr. Complex Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 70–79, 2016, doi: 10.7906/indecs.14.1.7.
- [40] E. O. Agyekum, K. P. J. K. Fortuin, and E. van der Harst, “Environmental and social life cycle assessment of bamboo bicycle frames made in Ghana,” *J. Clean. Prod.*, vol. 143, pp. 1069–1080,

- 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.012.
- [41] “my Atakora - my Boo | bamboo bike, bikes – Kiel, Germany.” <https://www.my-boo.com/bamboo-bikes/all-models-2020/my-atakora.html> (accessed Mar. 26, 2021).
- [42] “04 Frame Only — twmpa cycles.” <https://www.twmpacycles.co.uk/04-frame-only> (accessed Apr. 09, 2021).
- [43] F. P. Laboratory, “Wood handbook : wood as an engineering material.,” *Gen. Tech. Rep. FPL; GTR-113. Madison, WI U.S. Dep. Agric. For. Serv. For. Prod. Lab. xi, [463] pages ill. ; 28 C.*, vol. 113, no. 3, pp. 8–15, 1999, doi: 10.2737/FPL-GTR-113.
- [44] G. Mao *et al.*, “How can bicycle-sharing have a sustainable future? A research based on life cycle assessment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 282, p. 125081, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125081.
- [45] K. I. Praseeda, V. Reddy, and M. Mani, “Life-Cycle Energy Assessment in Buildings: Framework, Approaches, and Case Studies Introduction Role of Energy in Buildings,” *Encycl. Sustain. Technol.*, pp. 113–136, 2017, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10188-5.
- [46] “ISO - ISO 4210-6:2015 - Cycles — Safety requirements for bicycles — Part 6: Frame and fork test methods.” <https://www.iso.org/standard/68261.html> (accessed Sep. 16, 2021).
- [47] G. Tontini, “Integrating the Kano model and QFD for designing new products,” *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 18, no. 6, pp. 599–612, 2007, doi: 10.1080/14783360701349351.
- [48] T. Jones, L. Harms, and E. Heinen, “Motives, perceptions and experiences of electric bicycle owners and implications for health, wellbeing and mobility,” *J. Transp. Geogr.*, vol. 53, pp. 41–49, 2016, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2016.04.006.
- [49] L. Stilo, D. Segura-Velandia, H. Lugo, P. P. Conway, and A. A. West, “Electric bicycles, next generation low carbon transport systems: A survey,” *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 10, no. December 2020, p. 100347, 2021, doi: 10.1016/j.trip.2021.100347.
- [50] C. Relvas, *ENGENHARIA*.
- [51] D. Vlah, R. Žavbi, and N. Vukašinić, “Evaluation of Topology Optimization and Generative Design Tools As Support for Conceptual Design,” *Proc. Des. Soc. Des. Conf.*, vol. 1, pp. 451–460, 2020, doi: 10.1017/dsd.2020.165.
- [52] “Precede:ON CF 9 ST | CANYON GB.” https://www.canyon.com/en-gb/electric-bikes/electric-city-bike/precede-on/precede-on-cf-9-st/2928.html?dwvar_2928_pv_rahmenfarbe=GY (accessed Mar. 22, 2021).
- [53] C. C. Jones, *BIG BLUE BOOK OF BICYCLE REPAIR A Do-It Yourself Bicycle Repair Guide from Park Tool*. 2013.
- [54] L. Maestrelli and A. Falsini, “BICYCLE FRAME OPTIMIZATION BY MEANS OF AN ADVANCED GRADIENT METHOD ALGORITHM,” 2008.
- [55] G. A. Ormondroyd and B. Stefanowski, “Fibreboards and their applications,” *Wood Compos.*, pp. 91–102, Jan. 2015, doi: 10.1016/B978-1-78242-454-3.00005-6.
- [56] S. C. Subedi, C. S. Verma, and K. Suresh, “A review of methods for the geometric post-processing of topology optimized models,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 20, no. 6, 2020, doi: 10.1115/1.4047429.
- [57] “GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software.” <https://grabcad.com/> (accessed Jul. 27, 2021).
- [58] N. André, H. W. Cho, S. H. Baek, M. K. Jeong, and T. M. Young, “Prediction of internal bond strength in a medium density fiberboard process using multivariate statistical methods and variable selection,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 42, no. 7, pp. 521–534, Oct. 2008, doi: 10.1007/s00226-008-0204-7.
- [59] C. Gerrard, “The equivalent orthotropic elastic properties of plywood,” *Wood Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 335–348, 1987.

- [60] J. Vanwallegem, I. De Baere, M. Loccufier, and W. Van Paepegem, “Development of a test rig and a testing procedure for bicycle frame stiffness measurements,” *Sport. Eng.*, vol. 21, no. 2, pp. 75–84, 2018, doi: 10.1007/s12283-017-0248-8.
- [61] “Home Page - Madeivouga.” <https://www.madeivouga.pt/#> (accessed Sep. 16, 2021).

Anexos

Anexo A - Ferramentas usadas no desenvolvimento conceptual

A.1 - Classificação dos requisitos da metodologia Kano [47]

Classificação dos requisitos		
Obrigatórios	Unidimensionais	Atrativos
Requisitos que o cliente assume previamente, como presentes no produto, porém, não resultam na sua satisfação. Por outro lado, se estes tiverem um desempenho reduzido ou não existirem, o cliente ficará extremamente desagrado.	A satisfação do cliente varia de forma proporcional com o desempenho dos requisitos. Quanto maior o desempenho maior a satisfação, porém, menor desempenho resulta na insatisfação do cliente.	São requisitos inesperados pelo cliente, porém, influenciam positivamente a sua satisfação. A sua ausência ou falta de desempenho não afetam a satisfação do cliente.

A.2 - Diagrama de Mudge

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	Tota	%
A	A 3	A 5	D 3	E 3	A 3	A 1	H 3	I 3	A 3	A 3	L 1	18	10,0
B		C 0	D 3	E 5	F 3	G 3	H 5	I 5	J 1	K 3	L 5	0	0,0
C			D 3	E 5	F 3	G 3	H 5	I 5	J 0	K 3	L 3	0	0,0
D				E 3	D 3	D 1	H 3	I 1	D 3	D 1	D 1	17	9,4
E					E 3	E 3	E 0	I 0	E 5	E 3	E 3	29	16,1
F						G 3	H 5	I 5	F 3	K 3	L 3	9	5,0
G							H 1	I 3	G 3	G 1	L 3	13	7,2
H								I 1	H 5	H 3	H 3	30	16,7
I									I 5	I 3	I 5	32	17,8
J										K 3	L 3	1	0,6
K											L 1	12	6,7
L												19	10,6
												180	100

Requisito	%
I Seguro	17,8
H Sustentável	16,7
E Leve	16,1
L Manobrável	10,6
A Adptabilidade	10,0
D Durável	9,4
G Aerodinâmico	7,2
K Confortável	6,7
F Boa acessibilidade	5,0
J Fácil manutenção	0,6
C Preço acessível	0,0
B Design apelativo	0,0

Critério	
0	Igual importância
1	Ligeiramente superior
3	Superior
5	Muito superior

A.3 - Matriz da Qualidade

requisitos do cliente	Kano	Prioridade Inicial (ID)	Desempenho					Dimensionamento			Outros			(M) Avaliação da concorrência	(E) Avaliação estratégica	(ID*) priorização
			Rigidez da estrutura	Carga máxima admissível	Vida útil	Periodicidade de manutenções	Operações de montagem	Dimensões do quadro	Massa	Nível de Acabamento	Revestimento	Custo	Geometria			
Sustentável	O	12			3	1			3	9	3	1		1,5	0,5	10,39
Leve	U	11	3					1	9	1			3	1,5	0,5	9,53
Seguro	O	10	9	9	3	1	3	1	3				3	0,5	1,0	7,07
Manobrável	O	9	3					9	9				9	1,0	1,0	9,00
Adaptabilidade	O	8		1	3			9	3				3	0,5	1,5	6,93
Durável	U	7	3	3	9	9	3		3	3	9			0,5	1,5	6,06
Aerodinâmico	O	6						9	3	3			9	1,0	1,0	6,00
Confortável	U	5	9					9	3	1		1		1,0	0,5	3,54
Boa acessibilidade	U	4		1		-	3	9	1				3	1,5	0,5	3,46
Fácil manutenção	A	3			3	9	3	3					1	1,0	1,5	3,67
Preço acessível	U	2	3		3	1	1		3	9	3	9	3	1,0	0,5	1,41
Design apelativo	A	1						3	1	9	3		9	1,5	1,5	1,50
Unidades métricas			GPa	kg	anos	meses	m ²	mm	kg	n.d	n.d	€	n.d			
Qj) Importância da característica de qualidade			173	92,2	143	107	125	251	275	169	94,5	26,7	237			
Análise competitiva (Bj)			1	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0			
Dificuldade de atuação			1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1,5	0,5			
Importância corrigida das características de qualidade			212	92,2	175	160	153	307	337	84,5	47,2	40	168			

Avaliação	
A cima da concorrência/ fácil atuação	0,5
Igual à concorrência/ moderada atuação	1,0
A baixo da concorrência/ difícil atuação	1,5
Muito a baixo da concorrência/ muito difícil atuação	2,0

Relações	
Forte	9
Moderada	3
Fraca	1

Anexo B - Especificações de componentes de bicicletas

B.1 - Especificações de tamanhos de rodas ISO 5775 (adaptado de [32])

Large Tire Sizes 28-inch to 26-inch:				Rim Sizes:		Typical Bike Type:
ISO/ETRTO Metric	French Metric	Decimal Inches	Fractional Inches	Bead Circumference	Seat Country Orig. Rim specs:	
32-647	700	-	28x1-1/4	2032	Britain EA2 Holland	roadster
44-642 37-642	700A	-	28x1-3/4 28x1-3/8	2016	Britain F5, EA4, E4	roadster
40-635 28-635	700B	-	28x1-5/8 28x1-1/2	1994	Britain F10, F25.0, EA4	rod-brake roadster
32-631	-	-	27x1-1/4	1982	Sweden	road
32-630 28-630 20-630	-	-	27x1-3/8 27x1-1/4 27x1	1978	Britain K2, K25.0, EA25.0	touring, road
44-623	-	-	28x1-5/8	1958	Sweden	roadster
42-622 38-622 35-622 32-622 30-622	700C	-	28x1-3/4	1955	-	mountain hybrid Russian roadster tandem
28-622 25-622 23-622 20-622 18-622	700C	-	28x1-3/8 28x1	1955	-	touring road time trial track
40-609	650-32	-	27x1-1/2	1913	Germany	roadster
40-607	-	-	26x1-1/2	1906	America	roadster
35-599 32-599	-	26x1.375 26x1.25	-	1880	America	vintage lightweight

B.2 - Especificações consultadas relativas a caixa de direção (adaptado de [53])

TYPE	LEGACY NAME	SHIS NAME	CUP/BEARING OD (mm)	BORE ID (mm)
External cup Beyond headtube	1-inch JIS pressed cup	EC29	30.0	29.80–29.90
	1-inch Pro pressed cup	EC30	30.2	30.00–30.15
	1-inch BMX standard (old)	EC33	32.8	32.60–32.70
	1½-inch pressed cup	EC34	34.0	33.80–33.95
	1¾-inch pressed cup	EC37	37.0	36.80–36.95
	External cup (rare)	EC38	38.0	37.90–37.95
	External cup in the 44 standard	EC44	44.0	43.90–43.95
	1.5-inch pressed cup	EC49	49.7	49.55–49.60
	1.5-inch pressed cup	EC56	56.0	55.90–55.95
Semi-integrated, internal, ZS Bearing level or below headtube	1-inch semi-integrated	ZS41	41.5	41.35–41.40
	1½-inch semi-integrated	ZS44	44.0	43.90–43.95
	1¾-inch semi-integrated	ZS49	49.7	49.55–49.65
	1¾-inch semi-integrated (rare)	ZS55	55.0	54.90–54.95
	1¾-inch semi-integrated	ZS56	56.0	55.90–55.95
Integrated Bearing stop built into frame	1-inch IS (Cane Creek*)	IS38	38.0	38.15–38.25
	1½-inch IS (Cane Creek*)	IS41	41.0	41.10–41.20
	1½-inch Italian (hiddenset)	IS42	41.8	41.95–42.05
	1¾-inch integrated (lower only)	IS47	47.0	47.05–47.10
	1¾-inch IS (lower only)	IS49	49.0	49.10–49.20
	1¾-inch IS (lower only)	IS52	52.0	52.10–52.15

B.3 - Especificações consultadas das dimensões do *botton bvracket* (adaptado de [53])

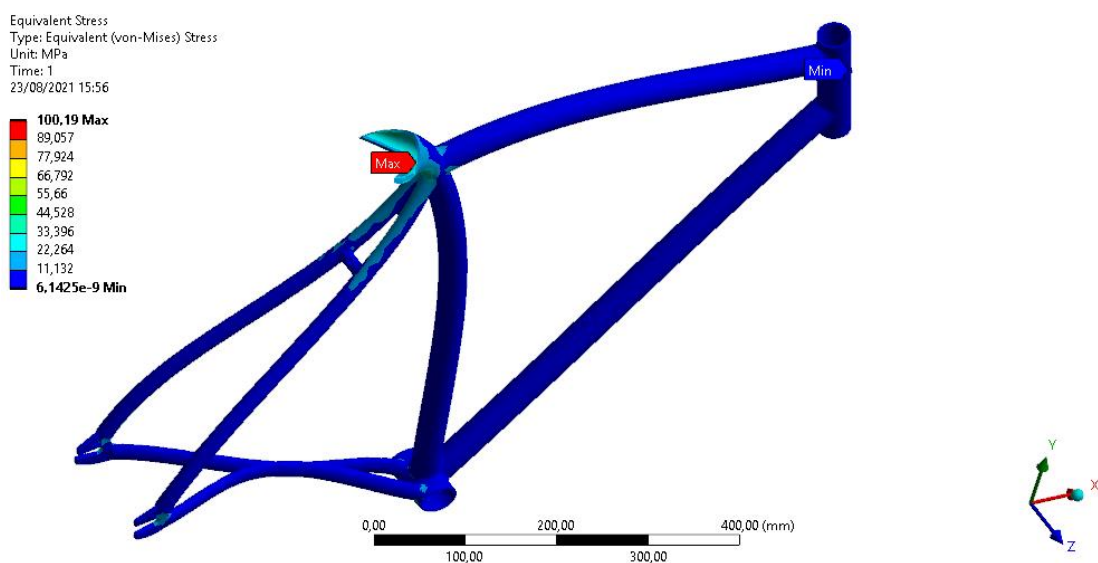
STANDARD NAME	BORE DIAMETER	THREADING STANDARD	BEARING ID	SHELL WIDTH OPTIONS
BSA/BSC/ English	34 mm	1.37 in. x 24 tpi	N/A	68, 73, 83, & 100 mm
Italian	35 mm	36 mm x 24 tpi	N/A	72 mm
BB30	42 mm	No threading	30 mm	68 & 73 mm
BB86	41 mm	No threading	~24 mm	86 mm
BB90	41 mm	No threading	~24 mm	90 mm
BB95	41 mm	No threading	~24 mm	95 mm
PF30	46 mm	No threading	30 mm (adaptors available)	68 & 73 mm
BBright*	46 mm	No threading	30 mm	79 mm
BB386EVO	46 mm	No threading	30 mm	86.5 mm

Anexo C – Análise estrutural do quadro convencional em alumínio 6061-T6

C.1 - Configuração do caso de impacto vertical no software *ANSYS R21*



C.2 - Resultados obtidos da tensão *Von Mises* no caso de impacto vertical



C.3 - Configuração do caso de início de pedalada no software *ANSYS R21*

caso 2 início de pedalada
Time: 1, s
23/08/2021 16:03

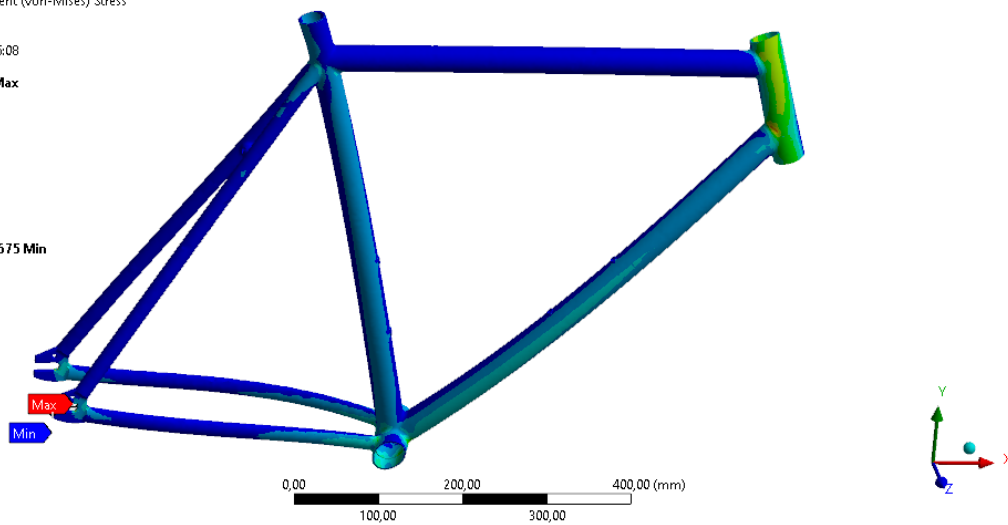
- A** Remote Force4: 115, N
- B** Remote Force3: 150, N
- C** Frictionless1
- D** Remote Force1: 685,92 N
- E** Cylindrical Support: 0, mm
- F** Force: 700, N



C.4 - Resultados obtidos da tensão *Von Mises* no caso de início de pedalada

Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
23/08/2021 16:08

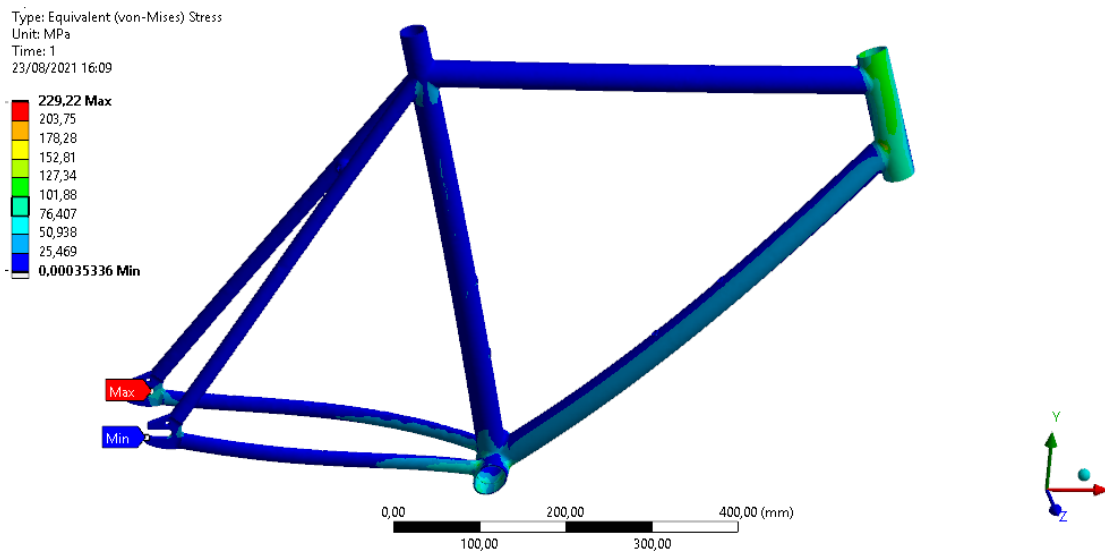
- 63,093 Max**
- 56,082
- 49,072
- 42,062
- 35,051
- 28,041
- 21,031
- 14,021
- 7,0105
- 0,00020675 Min**



C.5 - Configuração do caso de pedalada em pé no software ANSYS R21



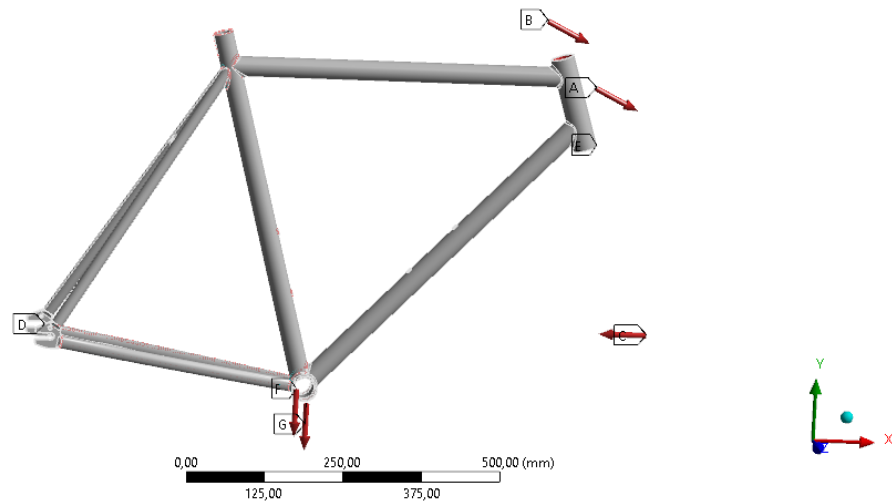
C.6 - Resultados obtidos da tensão *Von Mises* no caso de pedalada em pé



C.7 - Configuração do caso de travagem dianteira no software *ANSYS R21*

Caso 4-Travagem
Time: 1, s
23/08/2021 16:05

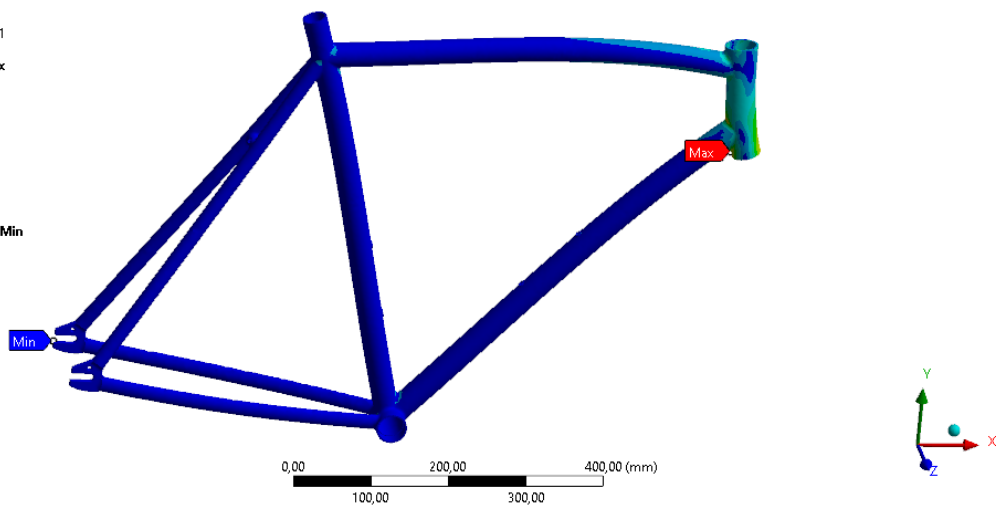
- A** Remote Force3: 447,21 N
- B** Remote Force4: 447,21 N
- C** Remote Force5: 800, N
- D** Cylindrical Support: 0, mm
- E** Frictionless1
- F** Remote Force2: 200, N
- G** Remote Force1: 200, N



C.8 - Resultados obtidos da tensão *Von Mises* no caso de travagem dianteira

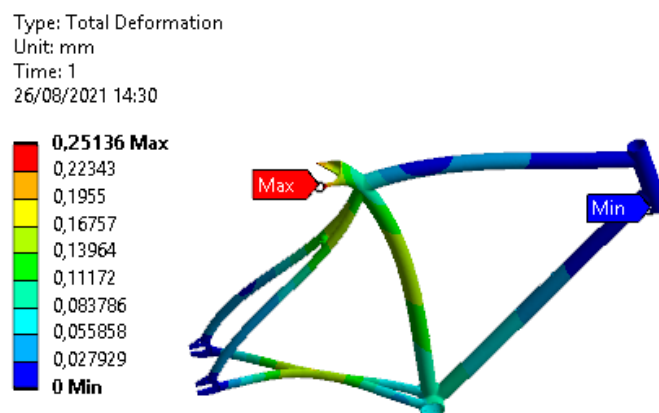
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
23/08/2021 16:11

- 148,52 Max**
- 132,02
- 115,52
- 99,013
- 82,511
- 66,009
- 49,507
- 33,004
- 16,502
- 3,1172e-5 Min**

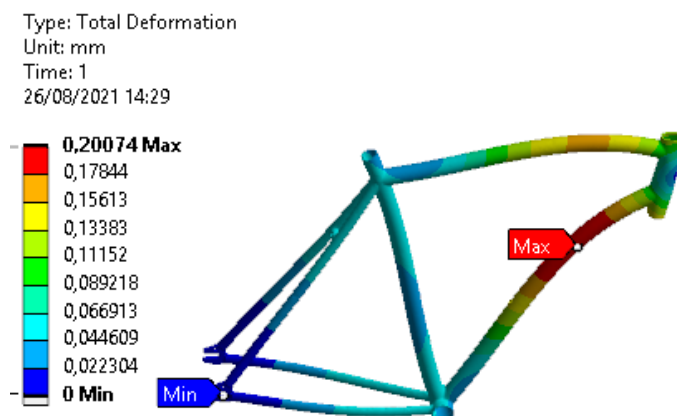


Anexo D - Deformações obtidas dos testes de rigidez realizados

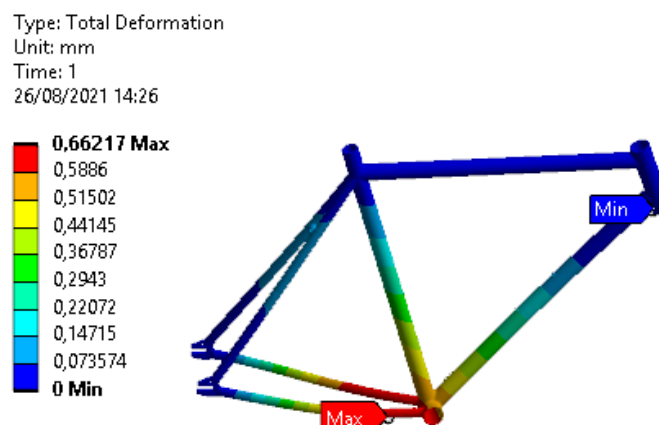
D.1 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em alumínio 6061-T6



D.2 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em alumínio 6061-T6

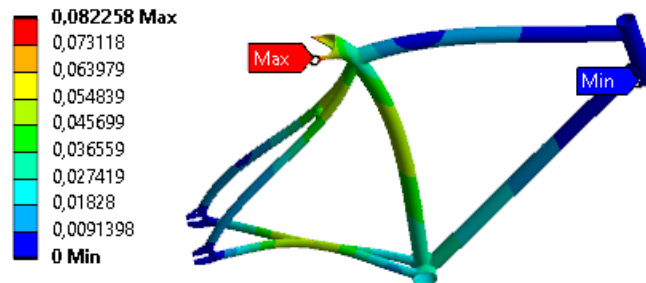


D.3 - Resultado do ensaio de rigidez lateral para o quadro em alumínio 6061-T6



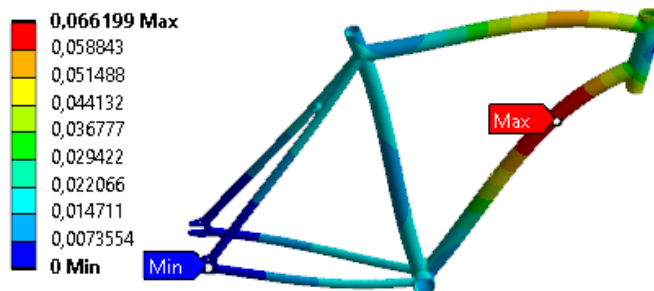
D.4 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em aço AISI 4130

Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
26/08/2021 14:36



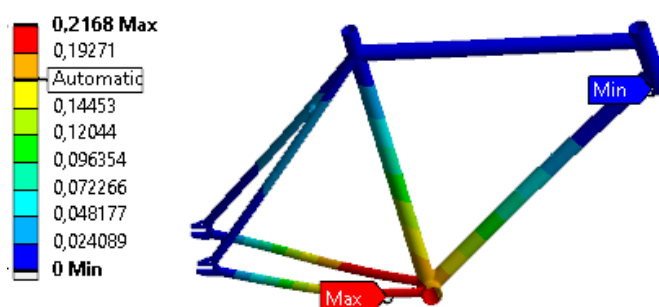
D.5 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em aço AISI 4130

Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
26/08/2021 14:36

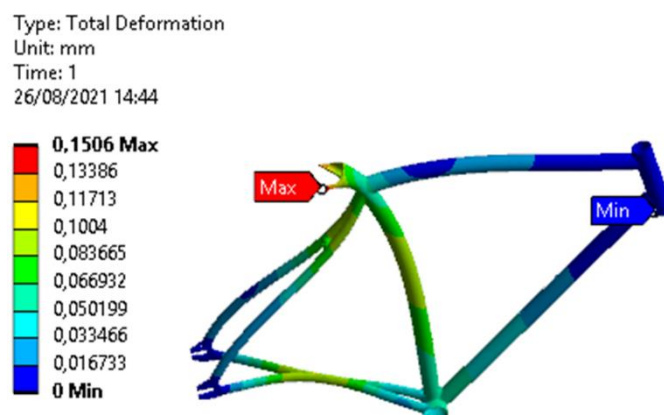


D.6 - Resultado do ensaio de rigidez lateral para o quadro em aço AISI 4130

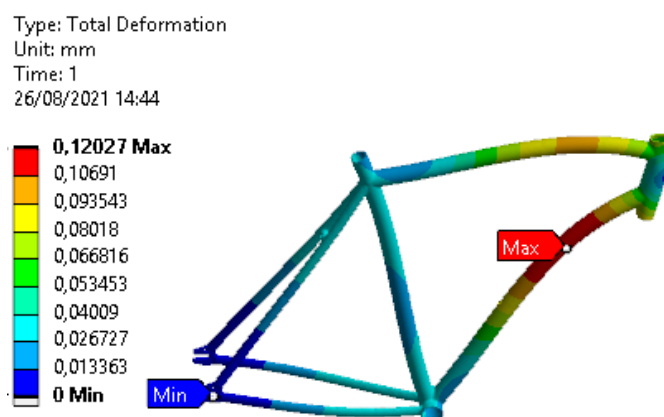
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
26/08/2021 14:37



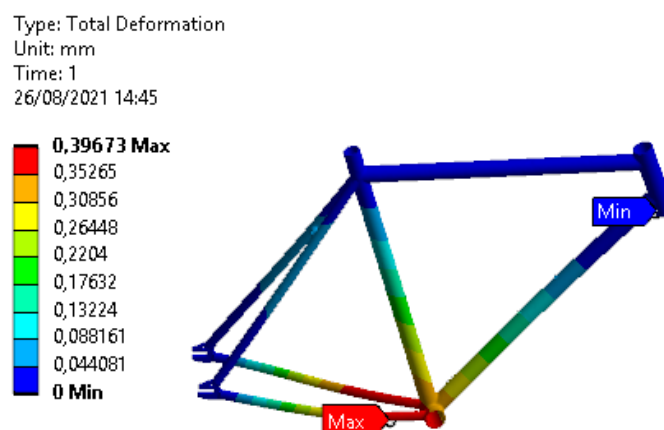
D.7 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em titânio-6Al-4V



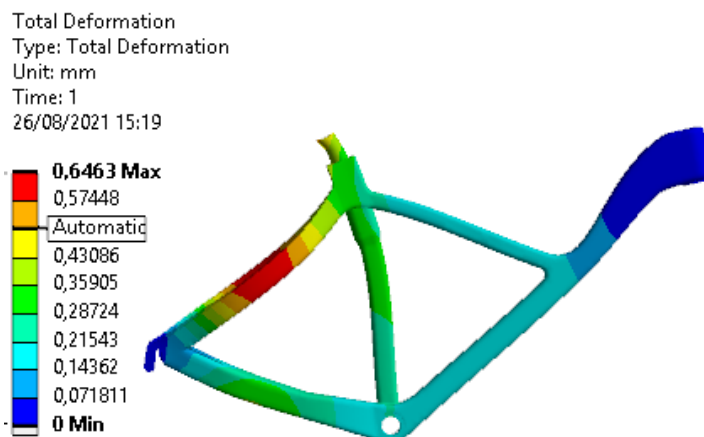
D.8 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em titânio-6Al-4V



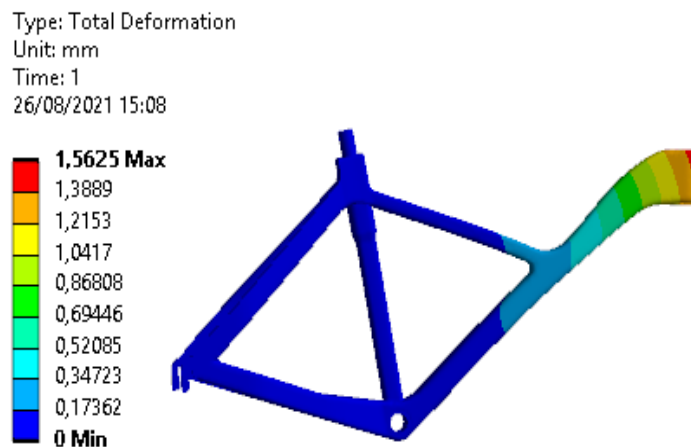
D.9 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em titânio-6Al-4V



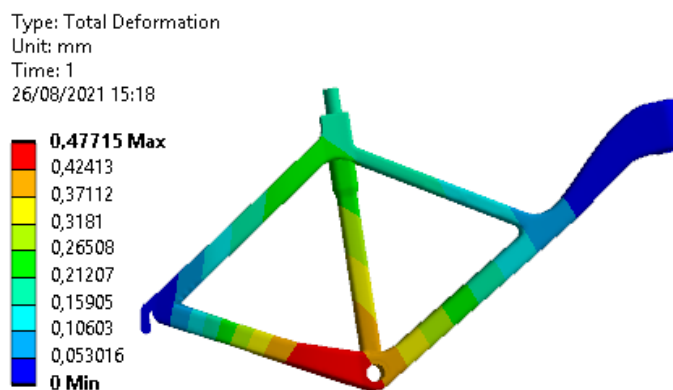
D.10 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em contraplacado



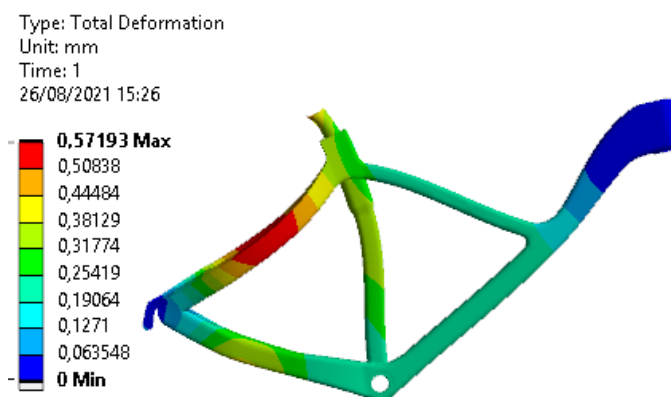
D.11 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em contraplacado



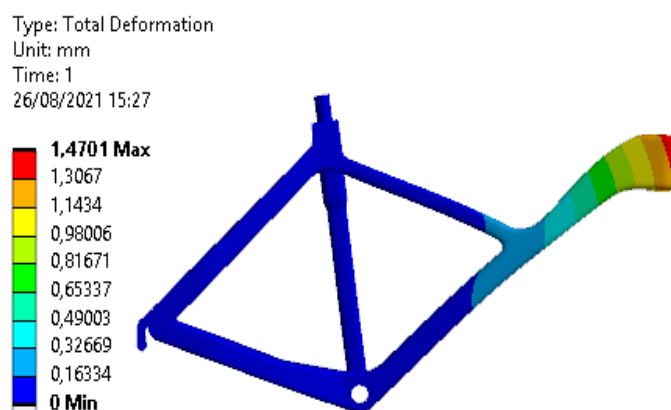
D.12 - Resultado do ensaio de rigidez lateral para o quadro em contraplacado



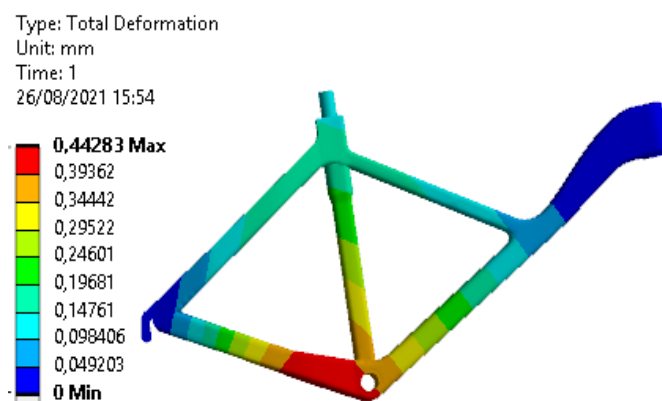
D.13 - Resultado do ensaio de rigidez vertical para o quadro em MDF



D.14 - Resultado do ensaio de rigidez longitudinal para o quadro em MDF



D.15 - Resultado do ensaio de rigidez lateral para o quadro em MDF



Anexo E – Protótipo com integração dos restantes componentes da bicicleta

