



# PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA

CARLOS MIGUEL FERNANDES DIAS

julho de 2024

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM  
VEÍCULO COM PROPULSÃO POR  
VELA RÍGIDA**

**Carlos Miguel Fernandes Dias**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em  
Construções Mecânicas**

**Orientador: Jorge Manuel Costa da Fonseca Justo**

**Co-orientador: Manuel Fernando dos Santos Silva**

**Júri:**

Presidente:

Hernâni Miguel Reis Lopes, Professor Coordenador, ISEP

Vogais:

José Luís Soares Esteves, Professor Auxiliar, FEUP

Jorge Manuel Costa da Fonseca Justo, Professor Adjunto, ISEP



## Agradecimentos

A realização deste projeto não seria possível sem o contributo de várias pessoas que me apoiaram durante a realização do mesmo e durante o meu percurso académico. Quero desde já mostrar a minha gratidão visto que sem estes suportes e incentivos o caminho ultrapassado teria sido mais difícil.

Aos meus orientadores Jorge Justo e Manuel Silva pela oportunidade de desenvolver esta dissertação, por todo o apoio, aprendizagem, disponibilidade e compreensão.

À minha família que durante toda a etapa académica me proporcionou as melhores condições possíveis e me aconselhou de forma a atingir todos os objetivos que procurei alcançar.

Aos meus cães Ollie e Tommy e à minhas gatas Baunilha e Soja que me fizeram companhia durante bastantes horas de estudo.

Ao António por ter sido o companheiro de viagens e diversões ao longo dos últimos cinco anos.

À Daniela pela companhia, compreensão e apoio que me permitiram ter forças para nunca desistir da tarefa de conciliar os estudos com a vida profissional.

Por fim, agradecer aos restantes amigos, que de alguma forma contribuíram não só para todo o processo da dissertação, mas também em toda a vida académica.



## Resumo

Um veículo autónomo com propulsão por vela rígida mostra-se como um substituto fiável à utilização dos combustíveis fósseis, sendo uma forma mais sustentável de alimentar os veículos autónomos e contribuindo para o desenvolvimento de um planeta saudável. Neste trabalho consta uma revisão bibliográfica sobre os temas necessários para o desenvolvimento de um veículo autónomo com propulsão por vela rígida. Inicialmente foi definido o chassis, ou por vezes também denominado quadro, como um elemento cujas principais funções são suportar os diferentes componentes mecânicos e garantir a segurança dos seus ocupantes. Detalhou-se a evolução do chassis, nomeadamente nos diferentes tipos de chassis existentes. Verificaram-se quais as principais considerações a ter no projeto de um chassis, bem como os diferentes testes existentes para a sua análise estrutural e ainda quais os principais requisitos para um sistema de direção adequado. De seguida, realizou-se um estudo sobre o tema navegação à vela, no qual se percebeu qual o contributo do vento para um planeta saudável. Distinguiram-se as velas tradicionais das velas rígidas que, devido à elevada relação sustentação-arrasto (*lift-drag*) se tornam mais eficientes. Apresentou-se o conceito *Land Sailing*, bem como a sua evolução e algumas das diferentes soluções de veículos com propulsão por vela já existentes. Posteriormente, estudou-se o tema dos perfis alares, destacando-se a análise sobre as forças de arrasto e de sustentação e a sua importância para a propulsão de um veículo movido pelo vento. Detalharam-se alguns dos pormenores dimensionais dos perfis alares, cujos principais objetivos são a diminuição da força de arrasto e o aumento da força de sustentação.

Realizou-se o projeto do veículo iniciando pelo estudo do perfil alar a utilizar e pela análise dos esforços transmitidos à vela e ao mastro. Seguiu-se o projeto da vela rígida e da cauda, do chassi e restantes elementos, tais como, constituintes do eixo frontal e traseiro, e todos os elementos de ligação entre estes. Iniciou-se pela modelação, processo iterativo que consistiu numa primeira proposta e sucessivas melhorias até à obtenção da versão final. Por fim, elaboraram-se todos os desenhos de fabrico necessários à sua construção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Chassis, veículos com propulsão por vela, vela rígida, perfis alares.



# Abstract

An autonomous vehicle with rigid sail propulsion is a reliable substitute for fossil fuels, a more sustainable way to power autonomous vehicles and contributing to the development of a healthy planet. This report contains a literature review on the necessary topics for the development of an autonomous vehicle with rigid sail propulsion. Initially, the chassis was defined as an element whose main functions are to support the different mechanical components and ensure the safety of its occupants. The evolution of the chassis was detailed, focusing on the different types of existing chassis. It was verified which are the main considerations to have in the design of a chassis, as well as the different existing tests for its structural analysis. It was also checked the main requirements for an adequate steering system. Next, a study was conducted on the subject of sailing, in which the contribution of wind to a healthy planet was understood. A distinction was made between traditional sails and rigid sails which, due to the high lift-drag ratio, become more efficient. The Land Sailing concept was presented, as well as its evolution and some of the different solutions of vehicles with sailing propulsion already in existence. Afterwards, the subject of wing profiles was studied, highlighting the analysis on drag and lift forces and their importance for the propulsion of a wind-driven vehicle. Some of the dimensional details of the wing profiles were detailed, whose main objectives are to reduce the drag force and increase the lift force.

The vehicle design was carried out starting with the study of the wing profile to be used and the analysis of the efforts transmitted to the sail and mast. This was followed by the design of the rigid sail and tail, the chassis, and remaining elements as constituents of the rear and front axis, and all connecting elements between them. It began with modeling, an iterative process consisting of a preliminary proposal and successive improvements until the final version was obtained. Lastly it was created all necessary manufacturing drawings for its construction.

**KEYWORDS:** Chassis, sail vehicles, rigid sail, wing profiles.



# Índice

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Acrónimos e Símbolos</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização . . . . .	1
1.2 Motivação . . . . .	1
1.3 Objetivos . . . . .	2
1.4 Planeamento de tarefas . . . . .	2
1.5 Estrutura . . . . .	2
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>3</b>
2.1 Chassis automóvel . . . . .	3
2.1.1 Tipos de chassis . . . . .	3
Chassis longarina . . . . .	3
Quadro em X . . . . .	3
Quadro plataforma . . . . .	4
Quadro tubular . . . . .	4
Quadro monobloco . . . . .	5
2.1.2 Requisitos fundamentais no projeto de um chassis . . . . .	6
2.2 Travagem . . . . .	8
2.3 Direção . . . . .	8
2.3.1 Ângulo de camber . . . . .	8
2.3.2 Ângulo de caster . . . . .	9
2.3.3 Ângulo de convergência ou divergência . . . . .	10
2.4 Navegação à vela . . . . .	10
2.4.1 Comparação entre velas tradicionais e velas rígidas . . . . .	11
2.4.2 Veículos terrestres com propulsão por vela . . . . .	13
2.4.3 Diferentes soluções existentes . . . . .	14
Blokart . . . . .	14
Rinox . . . . .	14
Seagull . . . . .	15
Whike . . . . .	15
Green Bird . . . . .	16
Sail Car ISEP . . . . .	16
Nasa Zephyr . . . . .	17
Mad Mads . . . . .	18
Veículo autónomo de quatro rodas com propulsão por vela - Exemplo 1	19
Veículo autónomo com múltiplas velas . . . . .	19
Veículo autónomo de quatro rodas com propulsão por vela - Exemplo 2	19
Quadro resumo das diferentes soluções estudadas . . . . .	20
2.5 Perfis alares . . . . .	21
2.6 Conclusão . . . . .	23

<b>3</b>	<b>Proposta de Modelação do Veículo</b>	<b>25</b>
3.1	Projeto da vela . . . . .	25
3.1.1	Seleção do perfil alar . . . . .	25
3.1.2	Determinação dos coeficientes aerodinâmicos . . . . .	27
3.1.3	Determinação das velocidades instaladas no veículo . . . . .	29
3.1.4	Determinação das forças aerodinâmicas máximas . . . . .	31
3.1.5	Verificação das condições de estabilidade do veículo . . . . .	32
3.1.6	Dimensionamento do mastro . . . . .	37
3.1.7	Modelação da vela . . . . .	39
	Proposta inicial para a vela . . . . .	39
	Proposta final para a vela . . . . .	40
3.1.8	Modelação da cauda . . . . .	42
3.2	Projeto do chassi, eixo frontal e eixo traseiro . . . . .	42
3.3	Elementos de ligação . . . . .	45
3.3.1	Ligação vela-chassis . . . . .	45
	Proposta inicial para a fixação do mastro . . . . .	45
	Segunda proposta para a fixação do mastro . . . . .	46
	Proposta final para a fixação do mastro . . . . .	47
	Fixação ao chassi . . . . .	47
	Verificação da carga estática desejada . . . . .	48
	Verificação à pressão de contacto . . . . .	49
3.3.2	Ligação vela-cauda e princípio de funcionamento . . . . .	51
	Proposta inicial para a fixação da cauda . . . . .	51
	Proposta final para a fixação da cauda . . . . .	52
3.3.3	Ligação da manga de eixo frontal ao servomotor . . . . .	52
3.4	Conclusão . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>57</b>
4.1	Conclusão . . . . .	57
4.2	Trabalhos futuros . . . . .	58
	<b>Referências</b>	<b>59</b>
	<b>Anexos</b>	<b>64</b>
<b>A</b>	<b>POLY LANEMA Tubo alumínio AW 6061 perfil circular</b>	<b>65</b>
<b>B</b>	<b>POLY LANEMA Tubo alumínio AW 6061 perfil quadrado</b>	<b>67</b>
<b>C</b>	<b>MECANARTE - Roda 1/BA-200</b>	<b>69</b>
<b>D</b>	<b>SNR - FC40570S06 Rolamentos de roda</b>	<b>71</b>
<b>E</b>	<b>Desenhos de Fabrico</b>	<b>73</b>
E.1	Lista de desenhos . . . . .	73
E.2	Desenhos . . . . .	74

## Lista de Figuras

2.1	Chassis longarina Fiat de 1905 . . . . .	4
2.2	Exemplo de um quadro em X . . . . .	4
2.3	Quadro plataforma Volkswagen Beetle de 1936 . . . . .	5
2.4	Quadro tubular Formula Student Haceteppe Student Racing Team . . . . .	5
2.5	Quadro de um Smart Fortwo . . . . .	6
2.6	Banco de testes universal preparado para teste à flexão . . . . .	7
2.7	Tipos de geometrias de direção . . . . .	9
2.8	Ângulo de camber . . . . .	9
2.9	Ângulo de caster . . . . .	10
2.10	Ângulo de convergência ou divergência . . . . .	10
2.11	Exemplo de um barco com aplicação de velas tradicionais . . . . .	11
2.12	Exemplo de um barco com aplicação de velas rígidas . . . . .	12
2.13	Exemplo de uma prova de carros à vela organizada pela FISLY . . . . .	13
2.14	Exemplo de um Blokart . . . . .	14
2.15	Exemplo de um Windroller . . . . .	15
2.16	Exemplo de um Rinox . . . . .	15
2.17	Exemplo de um Seagull . . . . .	16
2.18	Exemplo de um Whike . . . . .	16
2.19	Greenbird . . . . .	17
2.20	Sail Car ISEP . . . . .	17
2.21	Protótipo Zephyr . . . . .	18
2.22	Protótipo Mad Mads . . . . .	18
2.23	Protótipo do veículo autónomo de quatro rodas com propulsão por vela - Exemplo 1 . . . . .	19
2.24	Protótipo do carro à vela autónomo com múltiplas velas . . . . .	20
2.25	Protótipo de veículo autónomo de quatro rodas com propulsão por vela - Exemplo 2 . . . . .	20
2.26	Forças aplicadas num perfil alar . . . . .	22
2.27	Dimensões características de um perfil alar . . . . .	22
3.1	Características aerodinâmicas do perfil Eppler E169: coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque . . . . .	26
3.2	Características aerodinâmicas do perfil Eppler E169: coeficiente de susten- tação em função do ângulo de ataque . . . . .	26
3.3	Características aerodinâmicas do perfil Eppler E169: razão entre os coefici- entes de sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque . . . . .	27
3.4	Vórtices numa asa finita . . . . .	27
3.5	Triângulo de velocidades no plano horizontal . . . . .	30
3.6	Triângulo de velocidades para os valores de $V_V = 20$ km/h, $\phi = \frac{\pi}{2}$ e $\beta = 25^\circ$ . . . . .	31
3.7	Representação esquemática de uma situação de possível perda de equilíbrio relativamente ao eixo $s$ - Caso 1 . . . . .	33
3.8	Representação esquemática de uma situação de possível perda de equilíbrio relativamente ao eixo $s$ - Caso 2 . . . . .	33
3.9	Representação esquemática de uma situação de possível perda de equilíbrio relativamente ao eixo $s$ - Caso 3 . . . . .	34
3.10	Representação da força aerodinâmica decomposta nas duas componentes, força de sustentação e arrasto, e segundo as componentes $x$ e $y$ . . . . .	35
3.11	Diagrama de corpo livre do mastro . . . . .	37

3.12	Diagrama de esforços internos . . . . .	38
3.13	Exemplo de uma costela para a vela . . . . .	39
3.14	Sistema de fixação para as costelas . . . . .	40
3.15	Proposta inicial para a vela . . . . .	40
3.16	Proposta final para o mastro . . . . .	41
3.17	Proposta final para a vela, representada à direita em corte . . . . .	41
3.18	As duas opções propostas para a cauda . . . . .	42
3.19	Versão inicial do chassi . . . . .	43
3.20	Versão final do chassi . . . . .	43
3.21	Proposta inicial para a montagem da roda traseira . . . . .	44
3.22	Montagem final da roda traseira . . . . .	44
3.23	Montagem das rodas da frente . . . . .	45
3.24	Proposta inicial para a fixação do mastro . . . . .	45
3.25	Proposta para a fixação do mastro com a tampa aparafusada à caixa de rolamentos . . . . .	46
3.26	Proposta para a fixação do mastro com a tampa colada ao veio. . . . .	46
3.27	Proposta final para a fixação do mastro . . . . .	47
3.28	Ligação do conjunto de fixação do mastro ao chassi . . . . .	48
3.29	Esquema da ligação entre o veio e o mastro . . . . .	50
3.30	Diagrama de corpo livre do mastro para análise da pressão de contacto . . . . .	50
3.31	Forças e momentos existentes no controlo de uma vela . . . . .	51
3.32	Proposta inicial da fixação da cauda . . . . .	52
3.33	Proposta final da fixação da cauda . . . . .	52
3.34	Primeira solução proposta para o sistema de direção . . . . .	53
3.35	Segunda solução proposta para o sistema de direção . . . . .	53
3.36	Esquema representativo da geometria da direção em duas posições diferentes . . . . .	54
3.37	Proposta final para o veículo de propulsão por vela rígida . . . . .	55

## Lista de Tabelas

2.1	Quadro resumo das soluções de veículos à vela estudados . . . . .	21
3.1	Determinação das velocidades $V_C$ e $V_A$ com a variação do ângulo $\beta$ sendo $V_V$ constante e igual a 20 km/h e $\phi = \pi/2$ . . . . .	31
3.2	Determinação da força aerodinâmica máxima com a variação do ângulo $\beta$ . . . . .	32
3.3	Determinação da força aerodinâmica de estabilidade com variação do ângulo $\beta$ . . . . .	36
3.4	Comparação de $F_{ae}$ com $F_a^{\max}$ . . . . .	37
3.5	Análise das possíveis secções circulares para o mastro . . . . .	39
3.6	Dimensões principais e condições de carga do rolamento SKF 6205 . . . . .	48
3.7	Lista de valores representativos de $X_1$ , $Y_1$ , $X_2$ , e $Y_2$ como função de $e$ , que é função de $F_{ax}/C_0$ . . . . .	49



# Acrónimos e Símbolos

## Lista de siglas

<b>FISLY</b>	International Land and Sandyatching Federation
<b>ISEP</b>	Instituto Superior de Engenharia do Porto
<b>LRV</b>	Lunas Racing Vehicle
<b>NACA</b>	National Advisory Committee for Aeronautics
<b>NALSA</b>	National American Land Sailing Association
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration

## Lista de símbolos

$g$	aceleração gravítica	$\text{m/s}^2$
$h_{cp}$	altura do centro de pressão	m
$\alpha$	ângulo de ataque	°
$S$	área da secção do perfil	$\text{m}^2$
$\Lambda$	<i>aspect ratio</i>	adimensional
$C$	carga dinâmica	N
$C_0$	carga estática	N
$C_d$	coeficiente de arrasto	adimensional
$cs$	coeficiente de segurança	adimensional
$C_l$	coeficiente de sustentação	adimensional
$c$	distância ao eixo neutro	mm
$F_a$	força aerodinâmica	N
$F_{ax}$	força axial	N
$F_d$	força de arrasto	N
$F_l$	força de sustentação	N
$F_e$	força equivalente	N
$F_r$	força radial	N
$m$	massa	kg
$\rho$	massa volúmica	$\text{kg/m}^3$
$I$	momento de inércia de área	$\text{m}^4$

$M$	momento fletor	N.m
$Re$	número de Reynolds	adimensional
$P$	peso	N
$x_{cg}$	posição do centro de gravidade segundo o eixo $x$	m
$\sigma_{max}$	tensão axial máxima	Pa
$\sigma_{ced}$	tensão de cedência	Pa
$\sigma_{adm}$	tensão admissível	Pa
$V_A$	velocidade aparente do vento	m/s
$V$	velocidade do escoamento	m/s
$V_C$	velocidade do veículo	m/s
$\mu$	viscosidade dinâmica de um fluido	Pa.s
$V_V$	velocidade real do vento	m/s

# 1 Introdução

Neste capítulo faz-se inicialmente a contextualização do tema no qual se aborda a constante aplicação da utilização da força do vento, bem como a aplicação de velas em veículos autónomos e a vantagem da utilização de velas rígidas quando comparadas com as tradicionais.

Motiva-se a escolha deste tema integrando-o num dos maiores problemas ambientais atuais, a utilização excessiva dos combustíveis fósseis, e a preservação do planeta.

Por fim define-se o principal objetivo desta dissertação, bem como as várias tarefas para o alcançar.

## 1.1 Contextualização

Desde sempre o homem aproveitou o vento para gerar energia. Veleiros e barcos utilizaram o vento como fonte propulsora durante séculos e este contribuiu de forma crucial para a descoberta e exploração de novas terras [1]. Desta forma, o vento provou ser um recurso natural vantajoso para aplicação em investigação, explorações planetárias, oceânicas entre outras [2].

A aplicação de velas em veículos autónomos, alternativa aos combustíveis fósseis ou às baterias, pode ser vista em missões onde não é ideal, ou mesmo possível, recarregar baterias, como por exemplo na Antártida ou em Vénus [3]. Contudo, mesmo que a aplicação de velas seja ideal para estas situações e até para economizar custos, a aplicação de uma vela tradicional torna-se difícil uma vez que esta é controlada através de um sistema de cordas. Assim o controlo aerodinâmico pode tornar-se bastante complexo e pode até ocorrer uma grande perda de eficiência de navegação [4, 5].

Para colmatar esta dificuldade surgiram as velas rígidas, geralmente em forma de aerofólios simétricos, que permitem aumentar relações sustentação-arrasto e, assim, a eficiência. Não necessitam de um sistema de cordas, mas sim de um atuador [4, 5].

## 1.2 Motivação

A principal motivação deste trabalho é explorar uma forma mais sustentável de alimentar veículos autónomos através da utilização da força produzida pelo vento. A construção de um veículo autónomo com esta fonte de propulsão mostra-se como um substituto fiável para os combustíveis fósseis que, ao contrário do vento, são mais caros, poluidores e com limitação de autonomia. Os veículos autónomos movidos pelo vento tornam-se assim bastante úteis para explorações em grandes áreas e em zonas de difícil acesso, uma vez que reduzem o tempo necessário para as manutenções humanas e pelo facto de não exigirem os reabastecimentos necessários pelos veículos autónomos com outras fontes de propulsão.

Este projeto surge para colmatar uma necessidade do Laboratório de Sistemas Autónomos do ISEP, que pretende analisar o comportamento do veículo em diferentes utilizações.

Quanto à motivação do autor, a aplicação de energias renováveis a sistemas autónomos é um tópico bastante importante para diminuir a poluição ambiental e que contribui para um planeta saudável. Desta forma, com o projeto de um veículo de propulsão por vela rígida o autor pretende contribuir para o aumento da utilização deste tipo de alternativas e, em simultâneo, aprofundar conhecimentos na área dos sistemas autónomos aliados ao setor automóvel.

### 1.3 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é o projeto de um veículo com propulsão por vela rígida e que sirva de base à implementação de um veículo autónomo cuja utilização será em espaços livres de obstáculos. Para isso pretende-se projetar um chassi impulsionado pelo vento através de uma vela rígida de rotação livre e controlada por uma cauda, que pode ser controlada de forma autónoma. Em acrescento, deve ainda ser projetado um sistema de direção e montagem da vela. Devem ser desenvolvidos todos os desenhos de fabrico, necessários à construção do veículo para que a mesma possa ser efetuada. Este projeto visa a obtenção de todos os componentes mecânicos para o veículo a projetar, não contemplando a parte autónoma, mas tendo-a sempre em consideração para a solução final.

### 1.4 Planeamento de tarefas

Numa fase inicial da dissertação deve ser feito um levantamento do estado da arte na área da propulsão por vela rígida e no desenvolvimento de veículos autónomos. Para isso deve ser feito uma recolha de informações sobre os temas: chassi para automóveis, navegação à vela e perfis alares.

Segue-se a elaboração do projeto do veículo, no qual se procede ao desenvolvimento do chassi, da vela rígida, do sistema de direção e dos desenhos de fabrico necessários para a construção do veículo.

### 1.5 Estrutura

Este trabalho encontra-se dividido em cinco partes. A primeira parte, Introdução, serve o propósito de introduzir o conteúdo presente no trabalho, bem como enquadrar o mesmo nos objetivos propostos.

A segunda parte, Revisão Bibliográfica, contempla toda a pesquisa realizada sobre os diferentes componentes de um veículo, chassi, direção e travagem, bem como sobre a navegação à vela e os exemplos de carros à vela já existentes e por fim sobre o tema dos perfis alares.

Na terceira parte, Proposta de Modelação do Veículo, apresenta-se o desenvolvimento da solução da vela e da cauda, bem como do chassi, o eixo frontal e traseiro e os diferentes elementos de ligação.

No quarto capítulo são referidas algumas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas e os anexos, onde se encontram a informação dos catálogos e todos os desenhos 2D.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo encontra-se uma revisão bibliográfica dos vários constituintes necessários para o projeto de um veículo com propulsão por vela rígida. Aborda-se o tema propulsão à vela e algumas características sobre o escoamento de fluídos em torno de um perfil alar.

Numa primeira parte realizou-se um estudo sobre as principais funções do chassis, a sua evolução e diferentes tipos existentes, as principais considerações a ter no projeto do mesmo e ainda sobre as principais funções e requisitos dos sistemas de travagem e direção.

De seguida, apresenta-se a pesquisa acerca do tema navegação à vela enunciando-se as suas principais vantagens e desvantagens, uma comparação entre as velas tradicionais e as velas rígidas e por fim sobre a evolução dos veículos com propulsão por vela pelo mundo, bem como algumas das soluções já existentes.

Por último apresentam-se os conceitos força de arrasto e força de sustentação bem como a sua contribuição na propulsão por vela rígida.

### 2.1 Chassis automóvel

O chassis é a principal estrutura de um veículo e a sua importância é tal que é considerado a chave para determinar a segurança, conforto, agilidade e dinâmica de um veículo [6].

O chassis tem a função de suportar os diferentes componentes mecânicos, como motor, sistema de direção e suspensão, aparafusados ao mesmo, e ainda transportar e garantir a segurança dos seus ocupantes [7]. Para isso, deve ser suficientemente rígido para suportar choque, torção, vibração e diferentes tipos de solicitações. A rigidez à torção e à flexão deste componente devem ser adequadas de forma a facilitar a dirigibilidade do veículo [8].

#### 2.1.1 Tipos de chassis

##### Chassis longarina

O chassis longarina é utilizado desde os primórdios do século XX, proveniente da carroça, e eram construídos somente em aço ou em madeira. Atualmente são predominantemente utilizados em veículos industriais [9].

Este tipo de chassis, Figura 2.1, é constituído por duas travessas longitudinais, as longarinas, unidas transversalmente por travessas que ditam o seu afastamento. Na zona frontal o afastamento é menor para garantir espaço suficiente para as rodas direcionais, já na zona traseira é maior para permitir uma melhor instalação da carroçaria. A ligação entre as longarinas e as travessas pode ser feita através de ligações aparafusadas, rebitadas ou até soldadas. Este tipo de chassis não apresenta grande rigidez torsional uma vez que esta é definida pela secção transversal das longarinas que, geralmente, são de secção aberta para facilitar a montagem das travessas e restantes componentes [9, 10].

##### Quadro em X

A partir de 1930, os *designs* dos chassis automóveis passaram a ter um formato mais elaborado e eram constituídos por diferentes partes estampadas e pelas duas longarinas, que neste caso são projetadas para se cruzarem na parte central, Figura 2.2. Surge então o denominado quadro em X, um tipo de quadro caracterizado pelo aumento do controlo sobre o peso da estrutura e pela elevada rigidez torsional provocada pelo formato e posicionamento das duas longarinas, que permitiam colocar o condutor numa posição mais baixa. A grande

desvantagem deste chassis era o investimento demasiado avultado para uma produção em série [9].

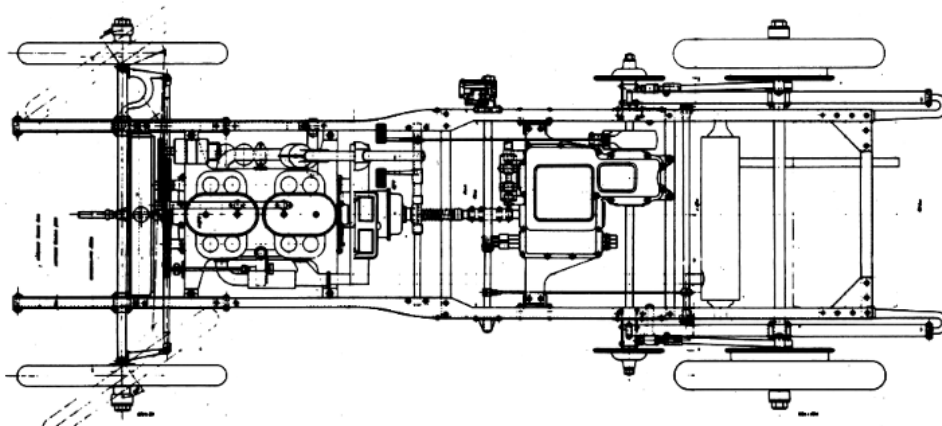


Figura 2.1: Chassis longarina Fiat de 1905 [9]

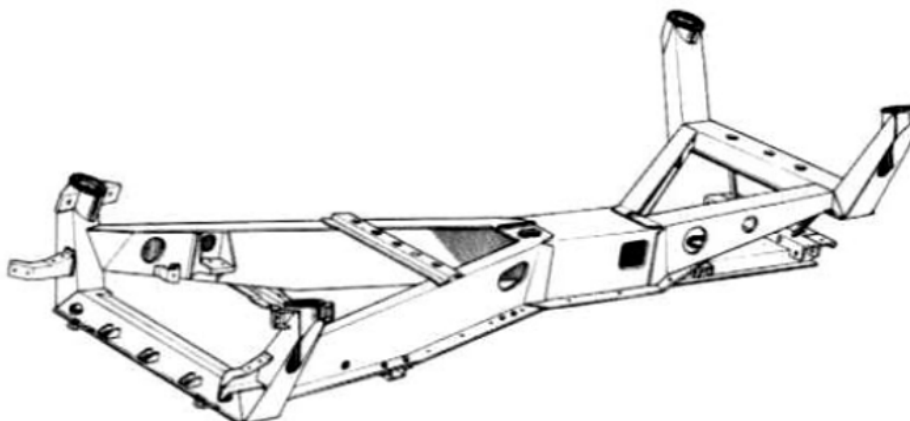


Figura 2.2: Exemplo de um quadro em X [11]

### Quadro plataforma

Este tipo de chassis surgiu em 1936 com o aparecimento do Volkswagen Beetle, Figura 2.3, e ficou conhecido como quadro plataforma. Os componentes que proporcionam a rigidez torsional são aparafusados a um piso de aço estampado que posteriormente é soldado à viga central. A grande vantagem deste tipo de chassis é a facilidade de montagem, contudo apresenta poucas zonas de absorção de energia [9].

### Quadro tubular

A aplicação deste tipo de estruturas é proveniente da 2ª guerra mundial com a aplicação em aeronaves e, posteriormente, começou a ser desenvolvido para veículos desportivos como a Porsche, a Lotus e a Maserati. Hoje em dia é predominante em veículos de competição [12].

Este tipo de chassis é produzido através de tubos de secção circular ou quadrados, de aço ou alumínio, ligados em treliças, sendo que uma das principais vantagens é o aumento da rigidez torsional. Os chassis tubulares possuem geralmente um peso reduzido e permitem uma grande *performance* dos veículos. No entanto, dada a complexidade da estrutura, o seu desenvolvimento é bastante dispendioso e moroso [11, 13]. Na Figura 2.4 vê-se um exemplo de um quadro tubular.

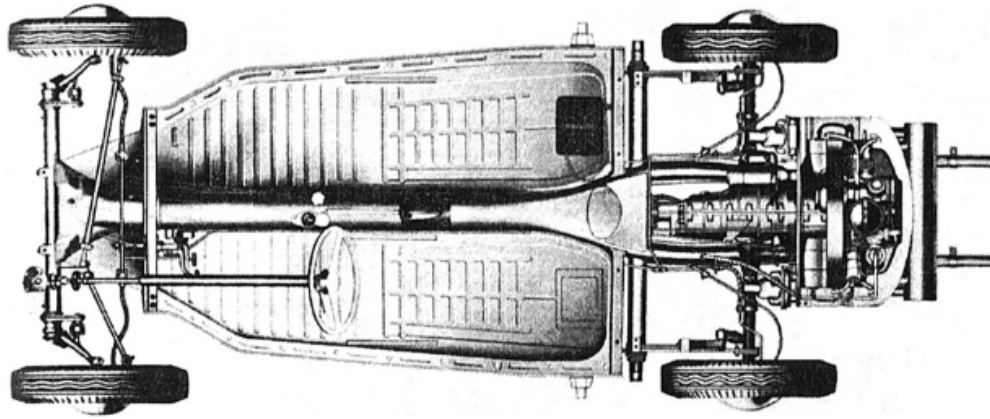


Figura 2.3: Quadro plataforma Volkswagen Beetle de 1936 [9]

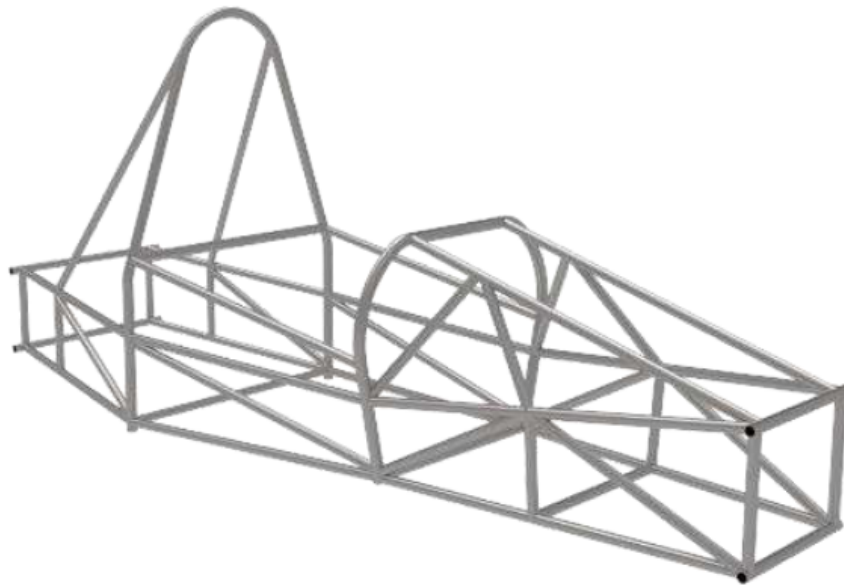


Figura 2.4: Quadro tubular Formula Student Hacettepe Student Racing Team [13]

### Quadro monobloco

Os primórdios deste tipo de chassis surgem em 1922 com o Lancia Lambda, contudo só mais tarde, com os avanços científicos e tecnológicos nomeadamente no que toca ao processo de soldadura, é que começou a ser bastante aplicado. Um dos primeiros exemplos desta aplicação é o modelo Fiat 1400, cujo processo de construção consistia num corpo estampado ao qual os restantes componentes eram posteriormente soldados [9].

Este tipo de chassis é caracterizado por uma estrutura única que define a forma final do automóvel. O processo de construção baseia-se em chapas, geralmente de aço, estampadas que são rebitadas ou soldadas entre si para garantir a forma do chassis. A grande vantagem deste tipo de chassis é a automatização do processo, tornando a sua produção mais rápida e barata, razões pelas quais é o mais utilizado na produção em massa atualmente. Para além destas vantagens, este distingue-se dos restantes pela grande capacidade de absorção de energia e grande resistência ao impacto. Estas vantagens devem-se ao facto do chassis não ser diferenciado da carroçaria e por isso os esforços serem suportados mutuamente, promovendo a segurança dos seus ocupantes [9, 11]. Na Figura 2.5 vê-se um exemplo de um quadro monobloco.

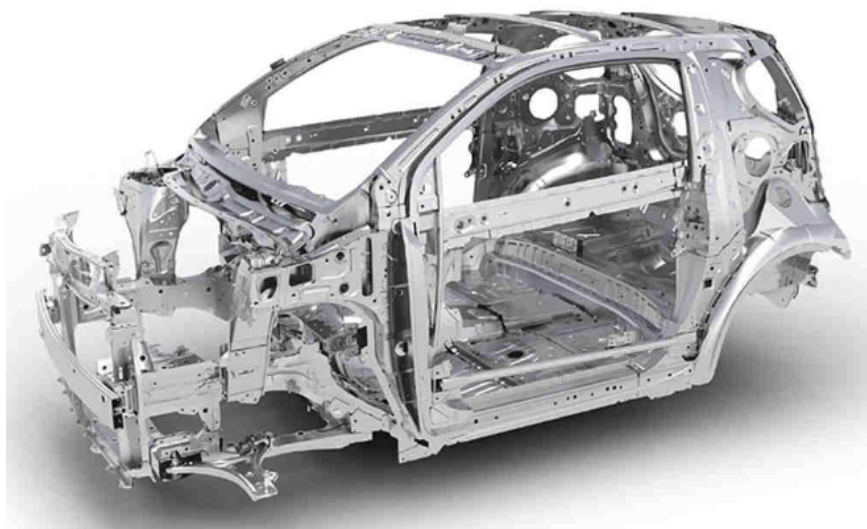


Figura 2.5: Quadro monobloco de um Smart Fortwo [11]

### 2.1.2 Requisitos fundamentais no projeto de um chassis

A fase inicial de um chassis é o seu projeto e esta pode ser considerada a fase fundamental para encontrar a solução ideal para um problema de engenharia [14].

Para atingir a solução ideal é então importante perceber que o projeto de um chassis tem de permitir obter uma boa relação entre os seguintes requisitos fundamentais [15]:

- *performance*: termo associado a características como a aceleração máxima, velocidade de ponta, desgaste dos pneus, consumos, entre outros;
- dirigibilidade: o chassis, tal como já referido anteriormente, tem de permitir uma condução fácil, de modo a garantir um desempenho ideal. Este conceito envolve ainda a relação com outros sistemas como a direção e a suspensão;
- ergonomia e segurança: toda a relação existente entre o homem e a máquina deve contribuir para a melhoria da *performance* do condutor e para a sua segurança;
- estrutura: tal como já referido, a principal função de um chassis é suportar as diferentes solicitações a que está sujeito e consequentemente as deformações por elas provocadas. Assim, torna-se desde logo importante perceber que durante o projeto de um chassis existem quatro principais tipos de esforços a considerar [11, 14]:
  - flexão: carregamento vertical provocado essencialmente pelo peso dos diferentes componentes do veículo e das cargas a transportar;

- torção: correspondente a cargas de sentidos opostos aplicadas nos dois eixos, provocando um momento torsor ao longo do eixo longitudinal do veículo. Este tipo de solicitação ocorre, por exemplo, na execução de uma curva, na qual se vê a roda interior num movimento descendente e a exterior num movimento contrário;
- compressão: este tipo de solicitação ocorre quando o veículo sofre uma travagem brusca, razão pela qual a distribuição de carga é transferida para o eixo da frente;
- corte: ocorre maioritariamente no contacto pneu-solo. Um caso muito específico deste tipo de solicitação é no embate do pneu com um passeio.

Note-se ainda que estes tipos de solicitações podem ocorrer em combinado.

Segundo o *Automotive Chassis* [9], os carregamentos a que um chassis está sujeito podem ser distinguidos em dois tipos: carregamento externo e interno. No que toca ao primeiro, é resultado do contacto entre o solo e as rodas, já o segundo é provocado pela massa e cargas do próprio veículo (motor, diferencial, caixa de velocidades, entre outros). Segundo esta fonte, o carregamento externo pode também ser subdividido em dois casos distintos: carregamento instantâneo, como por exemplo um embate entre veículos, ou carregamento de fadiga, que são todos aqueles que condicionam a vida útil, previamente calculada, de um veículo. Neste último caso encontram-se, por exemplo, as forças de travagem, aceleração, dirigibilidade, entre outras, transmitidas maioritariamente para o chassis através do sistema de suspensão.

Assim, para comprovar a resistência de um chassis torna-se importante que a avaliação estrutural do mesmo seja corretamente efetuada. Para isso, o teste mais importante para esta estrutura é a avaliação da sua rigidez torsional. Este tipo de teste simula o veículo em curva apenas com duas rodas em contacto com chão. Por sua vez o estudo à flexão, Figura 2.6, também é bastante importante, e neste simula-se a aplicação de uma carga vertical sobre o chassis.

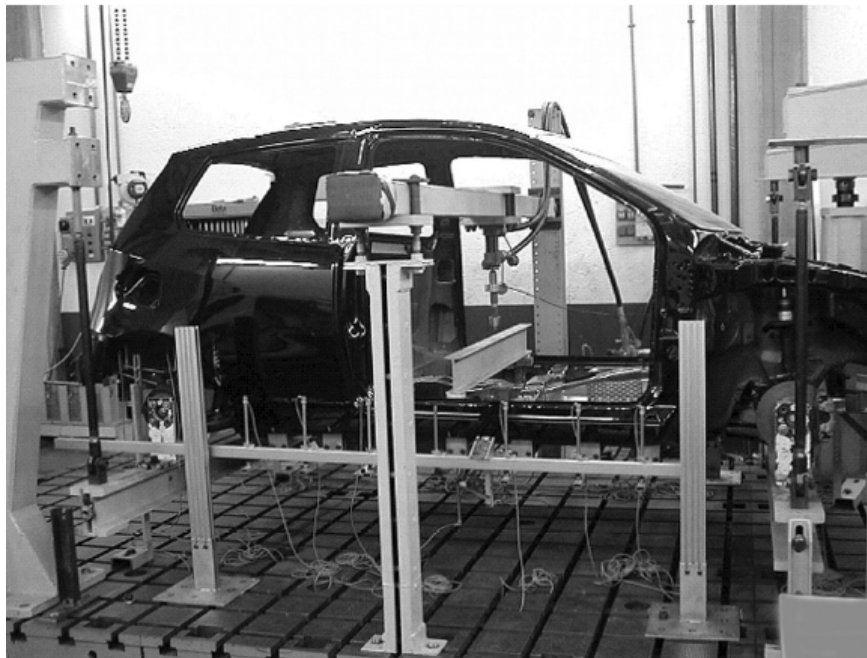


Figura 2.6: Banco de testes universal preparado para teste à flexão [9]

Hoje em dia, com o aparecimento dos estudos em que se recorre ao método dos elementos finitos e com os diferentes *softwares* existentes, torna-se bastante mais simples realizar um estudo prévio sobre o chassis quando sujeito aos diferentes tipos de carregamento, promovendo um método iterativo do projeto, de forma a detetar os pontos sujeitos a maiores tensões e de possível rotura [8, 16].

## 2.2 Travagem

A grande maioria das pessoas apenas pensam no sistema de travagem no trânsito ou em situações de pânico ou possível acidente. Atualmente, este sistema merece cada vez mais atenção porque não se pretende apenas que o veículo se desloque rapidamente, mas também que trave de forma segura [9].

O sistema de travagem é um conjunto de componentes cujas principais funções são a redução de velocidade, prevenção de acelerações não desejadas e a prevenção de movimento indesejados, neste caso imobilizar o veículo em estacionamento [6].

Em alguns veículos, durante a travagem, a energia cinética é convertida em energia elétrica e armazenada em baterias para ser novamente utilizada, contudo este tipo de sistema não é dos mais utilizados por ser bastante dispendioso [17].

Os sistemas de travagem mais comuns são os de fricção, nos quais existe uma conversão de energia cinética em energia térmica dissipada. Caso a energia térmica dissipada seja excessiva, surge uma diminuição do coeficiente de atrito, e por consequência uma redução da eficiência de travagem [17].

Uma outra possível solução é aplicada geralmente em veículos de competição juntamente com os sistemas de fricção. Esta solução consiste em sistemas de travagem aerodinâmicos. Elementos específicos, como por exemplo *spoilers*, permitem utilizar a força de arrasto para provocar grandes desacelerações [18].

## 2.3 Direção

O sistema de direção é uma parte importante no projeto de um veículo de forma a facilitar uma mudança de direção suave e aproveitar ao máximo a capacidade para gerar forças laterais. Dada a simplicidade de construção e de manutenção, são geralmente aplicadas ligações mecânicas nestes sistemas [19].

Aquando do projeto de um sistema de direção existem alguns requisitos e tarefas a ter especial atenção [20]:

- facilidade de movimento, sensibilidade, precisão, estabilidade direcional e esforço reduzido necessário para a sua utilização;
- baixo consumo de energia, bem como ruídos de funcionamento reduzidos;
- baixo desgaste e baixa necessidade de manutenção ao longo do seu ciclo de vida.

A direção dos veículos rodoviários de dois, ou múltiplos eixos, é afetada pela alteração do ângulo entre o eixo longitudinal do veículo e os planos centrais de uma ou todas as rodas. Existem dois tipos de geometria do sistema de direção. No mais antigo a ligação entre as duas rodas direcionais é feita de forma a permitir um ângulo de viragem das rodas igual dos dois lados, girando estas em torno do eixo rígido que faz a sua ligação. Atualmente, nos veículos ligeiros é aplicada a geometria de Ackermann. Com a aplicação deste tipo de geometria a roda interna de uma curva gira com um ângulo inferior ao da roda externa. As linhas de eixo das duas rodas cruzam-se no ponto de contacto com o eixo traseiro [20, 21]. Na Figura 2.7 observam-se uma representação da geometria de direção mais antiga, à esquerda, e à direita uma representação da geometria de Ackermann.

### 2.3.1 Ângulo de camber

O ângulo de camber, Figura 2.8, é o ângulo formado entre o plano perpendicular ao solo com o plano da roda. Este ângulo pode ser positivo, afastamento da parte superior das rodas, ou negativo, aproximação da parte superior das rodas. O seu principal objetivo é compensar as flexões sofridas numa curva, desempenhando um papel importante na aderência e estabilidade de condução, bem como no desgaste dos pneus.

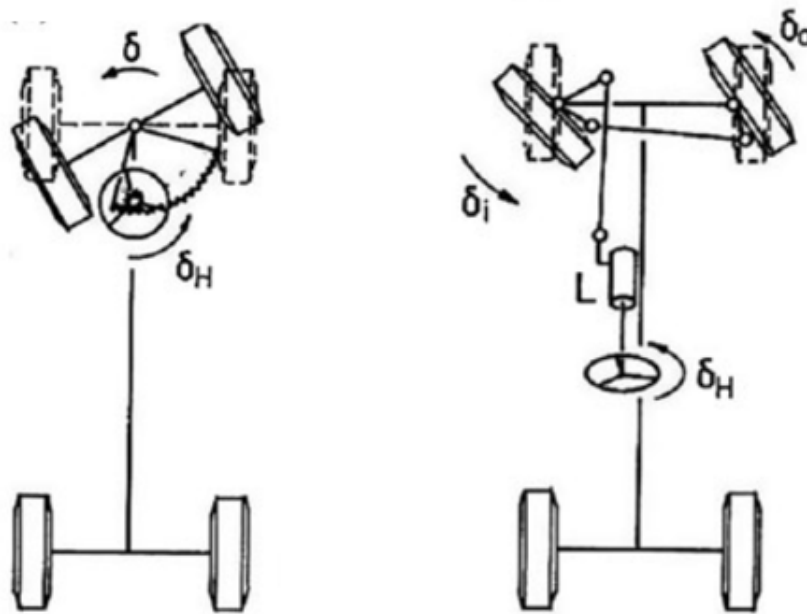


Figura 2.7: Tipos de geometrias de direção [20]

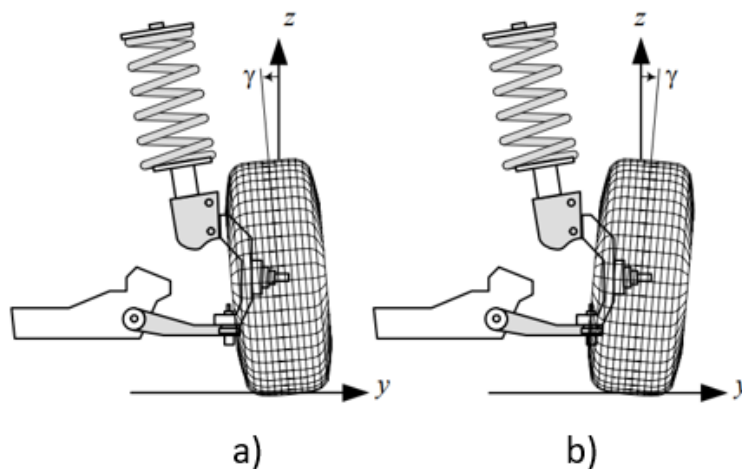


Figura 2.8: Ângulo de camber: a) positivo, b) negativo [22]

### 2.3.2 Ângulo de caster

O ângulo de caster, Figura 2.9, refere-se ao ângulo formado entre a linha vertical da roda, na vista lateral do veículo, e a linha imaginária formada pela inclinação da manga de eixo e o seu contacto com o solo. Quando o ponto de contacto da linha que passa pelos pontos rotacionais da manga de eixo está situado à frente da linha perpendicular ao solo existe um caster positivo. Se esse ponto estiver situado atrás então existe um caster negativo. De forma geral este ângulo é positivo porque permite aumentar a estabilidade em linha reta, pelo contrário um ângulo negativo pode conduzir a perda de estabilidade.

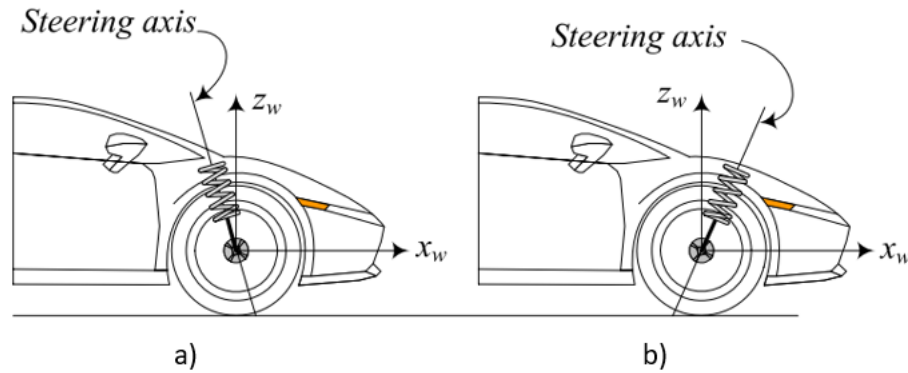


Figura 2.9: Ângulo de caster: a) negativo, b) positivo [22]

### 2.3.3 Ângulo de convergência ou divergência

O ângulo de convergência ou divergência, Figura 2.10, corresponde ao ângulo existente entre a linha de eixo da roda e a linha de eixo do veículo quando vistos de cima. Este ângulo assume valor positivo quando as duas rodas se tendem a aproximar e negativo quando se tendem a afastar. Um ângulo de convergência aumenta a estabilidade do veículo em linha reta mas provoca um aumento da resistência de rolamento e um aumento do desgaste da zona exterior do pneu. Um ângulo divergente provoca uma direção menos estável em linha reta e provoca um aumento do desgaste da zona interior do pneu mas torna a direção mais rápida e direta.

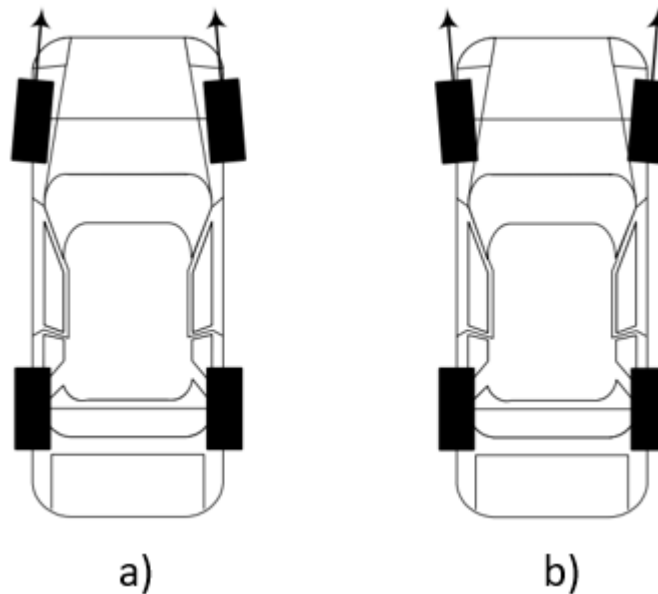


Figura 2.10: Ângulo de a) convergência ou b) divergência [22]

## 2.4 Navegação à vela

Hoje em dia a poluição ambiental é uma das principais preocupações da população mundial e umas das principais causas do seu aumento são os motores de combustão interna devido à emissão de substâncias poluentes como por exemplo o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxidos de nitrogénio ( $NO_x$ ), monóxidos de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e partículas finas

[23]. Assim, vê-se diariamente um esforço para alterar as fontes de propulsão dos diferentes meios de transporte. É neste ponto que entra o vento, considerado uma energia verde, que representa uma alternativa para os combustíveis fósseis, uma vez que para além de ser livre de poluição é também económica [24, 25, 26].

A navegação à vela, nomeadamente marítima, é uma tarefa bastante complexa dada as interações dinâmicas entre o vento, a água e o próprio veleiro. Assim, a construção de um veículo com propulsão por vela resulta da conjugação de diferentes áreas da engenharia e nos seus sucessivos desenvolvimentos para encontrar as formas mais eficientes para utilizar a força produzida pelo vento [27].

Atualmente vê-se uma grande pesquisa sobre a aplicação de sistemas autónomos para a navegação à vela, no entanto, mesmo que esta contribua para a diminuição da poluição é preciso ter em conta que existem algumas desvantagens em comparação com os outros meios de propulsão. Desde logo, a ausência de vento traduz-se na ausência de fonte propulsora e a navegação contra o vento limita a não navegar a mais de  $40^\circ$  a  $45^\circ$  na direção do vento. Assim, a navegação contra o vento consiste em seguir um percurso em "Zig-Zag", que permite a deslocação do veículo [4].

### 2.4.1 Comparação entre velas tradicionais e velas rígidas

Os veículos movidos pelo vento são utilizados para diferentes propósitos como competições, lazer, trabalho e até para investigações. Estes podem ser equipados com velas tradicionais (de pano), velas rígidas ou até com turbinas [28].

A navegação com recurso a velas tradicionais é praticada por todo o mundo desde há muitos séculos atrás, controladas mecanicamente através de cordas que, quando em contacto com a água do mar, se danificam facilmente, razão pela qual exigem cuidados redobrados. Estes mecanismos eram utilizados com o intuito de obter um aumento da relação sustentação-arrasto e dessa forma garantir o percurso desejado do veículo [27, 29]. Na Figura 2.11 observa-se um exemplo de um barco com aplicação de velas tradicionais [30].



Figura 2.11: Exemplo de um barco com aplicação de velas tradicionais [30]

Segundo Colin Sauzé e Mark Neal [5], este tipo de velas, quando controladas por uma tripulação, possui algumas vantagens tais como:

- facilidade de recolha, importante para situações em que o veículo se encontra parado, ou seja, ancorado no porto;
- a sua área de incidência pode ser facilmente reduzida e as velas podem ser até trocadas de acordo com as condições de navegação;
- a sua forma e estrutura podem ser alteradas através da aplicação de tensão nas linhas de controlo, ou seja, nas cordas;

- podem ser facilmente reparadas e modificadas.

No entanto este tipo de velas também possui algumas desvantagens:

- podem sofrer danos facilmente quando ajustadas incorretamente;
- é necessário enrolar as velas quando não estão em uso para evitar danos;
- quando o ângulo de ataque não é suficiente, pode ocorrer perda de forma da vela e, por consequência, perda de eficiência da navegação;
- têm tendência para torcer o que origina diferentes ângulos de ataque na vela traduzindo-se em perda de eficiência. Para que isto não aconteça, têm de ser acompanhadas de longarinas, que aumentam o peso da vela.

Desta forma, são várias as razões para considerar a aplicação de outros tipos de velas, e uma das principais alternativas são as velas rígidas que, tal como o nome indica, são estruturas rígidas que apresentam uma secção transversal, geralmente de aerofólio, e são dispostas verticalmente no veículo. A secção existente permite obter uma relação sustentação-arrasto bastante superior às velas tradicionais e, por consequência, eficiências mais elevadas [4, 31, 32, 33]. Na Figura 2.12 observa-se um exemplo de um barco com aplicação de velas rígidas com o objetivo de economizar cerca de 30% do seu combustível [34].



Figura 2.12: Exemplo de um barco com aplicação de velas rígidas [34]

A aplicação de aerofólios, geralmente simétricos, deve-se ao facto deste tipo de velas serem operadas com o vento a soprar dos dois lados da vela. Note-se que este tipo de velas não tem capacidade para gerar sozinho altos coeficientes de sustentação, razão pela qual em muitas situações são acompanhadas de uma cauda/*flap* para promover essa condição [27]. Para além das razões já descritas, as velas rígidas destacam-se ainda pelas seguintes vantagens [1, 4, 5]:

- em casos de navegação a favor do vento estas velas são mais eficientes, uma vez que ao contrário das velas tradicionais, que só produzem força de arrasto, estas têm contribuição de forças de sustentação e forças de arrasto [35];
- mesmo quando o ângulo de ataque não é o mais adequado, ou até em casos de ausência de vento, não perdem a sua forma;
- não necessitam de mais nenhum elemento estrutural a acompanhar;
- podem ser orientadas na direção do vento para experimentar forças aerodinâmicas mínimas;

- podem ser projetadas de forma a diminuir ao máximo a força de arrasto.

Por fim, mesmo que as velas rígidas sejam mais eficientes que as velas tradicionais, estas também apresentam algumas desvantagens nomeadamente no que toca à relação entre conceitos como o projeto, a resistência, o peso e o custo. Torna-se bastante difícil projetar uma vela rígida resistente o suficiente, com um peso reduzido e a baixos custos. No entanto estas desvantagens não são suficientes para descartar a sua utilização [4].

## 2.4.2 Veículos terrestres com propulsão por vela

*Land Sailing* é a ação de mover um veículo terrestre através da propulsão do vento com recurso a uma vela. Veículos terrestres com propulsão por vela são também conhecidos como carros à vela e os seus princípios de funcionamento são semelhantes aos dos veleiros. Em casos em que a propulsão é constante, tornam-se uma grande vantagem para navegações de grande distância e daqui resulta a aplicação deste tipo de veículos em algumas investigações [25, 36].

O primeiro exemplo desta aplicação surge em 1600 quando o cientista Simon Steven desenvolveu uma carruagem com estes princípios de funcionamento para fins de lazer. Mais tarde, em 1898, os irmãos Dumont construíram um carro à vela tendo por base os veleiros egípcios, no entanto, dada a aplicação de velas tradicionais, não era bastante eficiente. A partir do século XX este tipo de navegação torna-se num desporto popular devido à contribuição de Luis Bleriot. Mais tarde, em 1967 surgem as primeiras competições deste tipo de desporto promovidas pela French Foreign Legion [25, 37]. Hoje em dia estas competições estão presentes em todo o mundo e são promovidas por diferentes organizações tais como:

- International Land and Sandyatching Federation, FISLY [38]. Fundada em 1963, tem como objetivo principal promover este tipo de desporto num ambiente seguro. Organiza eventos todos os anos entre os quais se destacam os campeonatos do mundo de quatro em quatro anos. Na Figura 2.13 observa-se uma das provas promovidas pela FISLY;
- National American Land Sailing Association, NALSA [39]. Esta federação destaca-se por organizar a maior competição de carros à vela dos Estados Unidos da América que ocorre todos os anos.



Figura 2.13: Exemplo de uma prova de carros à vela organizada pela FISLY [38]

### 2.4.3 Diferentes soluções existentes

Dada a dimensão que este desporto atingiu, já são várias as soluções existentes para este tipo de veículos, pelo que se torna importante realizar um estudo sobre as mesmas. Note-se que, na grande maioria, as soluções existentes exigem um piloto, no entanto já existem veículos com propulsão por vela autónomos. De seguida enunciam-se várias soluções existentes.

#### **Blokart**

Este modelo, Figura 2.14, foi desenvolvido por Paul Beckett e a primeira versão foi construída em 1999 apenas para fins de lazer. Atualmente é um dos carros à vela mais utilizado em competições.

É um carro de três rodas, uma das quais com direção controlada manualmente, e uma vela única. O chassis é feito em aço AISI 304. O seu modelo permitiu atingir até agora uma velocidade máxima de aproximadamente 100 km/h. As velas e a matriz são reforçadas com fibra de vidro e o seu tamanho pode variar entre os 2 m e os 5,5 m, o que possibilita ajustes para as diferentes condições de vento e para o peso do condutor. Os mastros são feitos através de peças distintas que, posteriormente, se encaixam umas nas outras, sendo produzidos em fibra de carbono. Este veículo é construído de forma a permitir uma montagem e desmontagem simples e rápida para garantir facilidade de transporte [40].



Figura 2.14: Exemplo de um Blokart [40]

O Windroller, Figura 2.15 [41], produzido em Portugal, é bastante semelhante com a diferença de a direção ser controlada por pedais.

#### **Rinox**

Este é um veículo de três rodas com propulsão por vela com um funcionamento bastante semelhante a uma bicicleta, Figura 2.16. O seu chassis é feito em duralumínio, um conjunto de ligas metálicas de alumínio, cobre e magnésio, e tal como o veículo anterior é de desmontagem simples para facilitar o seu transporte [28].



Figura 2.15: Exemplo de um Windroller [41]



Figura 2.16: Exemplo de um Rinox [28]

## Seagull

Este tipo de carros à vela existe tanto para competições desportivas, como para fins de lazer. Tem três ou quatro rodas, alguns com rodas direcionais controladas através de um volante e outros através de pedais. Como fonte propulsora alguns modelos possuem um sistema semelhante ao das bicicletas, ou seja pedais, acompanhados por uma vela, enquanto outros têm somente uma vela [42]. Na Figura 2.17 observa-se um dos modelos deste tipo de veículos.

## Whike

É um carro à vela de três rodas com funcionamento semelhante a alguns dos veículos já mencionados anteriormente, sendo constituído por dois sistemas propulsores, Figura 2.18. A este veículo podem ser aplicadas duas velas distintas, uma das quais com  $1 \text{ m}^2$  e a outra com  $1,6 \text{ m}^2$ , fixas a um mastro fabricado em material compósito com fibra de carbono. É ainda acompanhado de um sistema de direção, um sistema de relação de transmissão e um sistema de travagem de fricção (discos de travão) [43].



Figura 2.17: Exemplo de um Seagull [42]



Figura 2.18: Exemplo de um White [43]

### Green Bird

Este carro à vela, Figura 2.19, foi projetado para duas vertentes diferentes, uma para deslocação no gelo e outra em terra, e o seu objetivo era bater o recorde mundial de velocidade conhecido para este tipo de veículos. O recorde foi batido em 2009, quando o Green Bird ultrapassou os 203 km/h com ventos com velocidades de 40 km/h, graças ao seu modelo e à sua vela rígida autónoma. Saliente-se que este veículo possui uma cauda, que funciona como *flap*, a acompanhar a vela [44].

### Sail Car ISEP

Este é um carro à vela projetado em 2019 pelos alunos do European Project Semester no ISEP. Embora seja conduzido por um piloto, possui uma vela rígida autónoma. O chassis é feito através de um perfil de secção quadrada de aço S235. Para a vela foi adotado um perfil aerofólio NACA 0015. A vela é controlada por um servo motor que roda a cauda uma vez que esta é mais leve que o resto da vela, razão pela qual o esforço necessário é reduzido. As dimensões do veículo são largura de 1,55 m e um comprimento de 2 m. A vela apresenta uma altura de 1,53 m e 1 m de largura [28, 45]. Na Figura 2.20 vê-se à esquerda o chassis projetado, à direita a vela rígida e em baixo o veículo projetado.



Figura 2.19: Greenbird [44]



Figura 2.20: Sail Car ISEP [28]

### Nasa Zephyr

É um veículo de três rodas com propulsão por vela rígida, Figura 2.21, sendo esta capaz de gerar a força propulsora e em simultâneo produzir energia. As três rodas, derivadas do Lunar Roving Vehicle (LRV), foram desenhadas de forma a diminuir o atrito e em simul-

tâneo o esforço necessário para que o veículo se possa deslocar na superfície de Vênus. A vela apresenta uma secção transversal aerodinâmica constante, correspondente ao aerofólio NACA 0015, e possui uma área de  $12 \text{ m}^2$ . Este veículo é autónomo e tanto a vela como o sistema direcional são controlados por servo motores. A vela foi colocada perpendicularmente ao veículo e pode girar em torno do seu centro, de forma a poder ser orientada perpendicularmente ao vento para o abrandar e imobilizar [3, 46].



Figura 2.21: Protótipo Zephyr [46]

### Mad Mads

É um protótipo de um carro à vela autónomo que difere de todos os outros abordados porque, embora seja autónomo, o sistema de direção é controlado por pedais e a vela, neste caso tradicional, é controlada por um sistema de cordas [47]. Este protótipo observa-se na Figura 2.22.



Figura 2.22: Protótipo Mad Mads [47]

### Veículo autónomo de quatro rodas com propulsão por vela - Exemplo 1

O único meio de propulsão deste veículo é a força do vento ao incidir na vela rígida do mesmo. É constituído por um chassis tubular fabricado em alumínio, um servo motor para controlar o ângulo de ataque da vela, um servo motor para controlar as duas rodas direcionais e ainda por duas rodas não direcionais ligadas por um eixo, Figura 2.23. A relação entre a velocidade máxima, velocidade do vento e ângulo de ataque foi definida através das características do perfil aerofólio NACA 0018. Após a sua construção, este carro à vela obteve um peso total de 22 kgf. A velocidade mínima do vento para colocar o veículo em movimento foi de 3,9 m/s. O autor verificou ainda que os coeficientes de sustentação e arrasto eram nulos para este tipo de aerofólios quando o ângulo de ataque da vela era  $0^\circ$  [2, 37].



Figura 2.23: Protótipo do veículo autónomo de quatro rodas com propulsão por vela - Exemplo 1 [37]

### Veículo autónomo com múltiplas velas

Embora este carro seja bastante semelhante ao abordado anteriormente no que toca à constituição do quadro e ao sistema de direção, apresenta uma grande diferença: é constituído por três velas rígidas que conseguem rodar dos  $0^\circ$  aos  $360^\circ$  e cujas características aerodinâmicas se baseiam no aerofólio NACA 0018, Figura 2.24. Para os autores, a utilização de três velas rígidas permite aumentar a *lift force* pois possui uma maior área. Concluíram que uma velocidade do vento de 3 m/s era suficiente para colocar o carro em movimento, já para velocidades do vento iguais a 13,6 m/s o carro deslocava-se com uma velocidade de 3 m/s [48].

### Veículo autónomo de quatro rodas com propulsão por vela - Exemplo 2

Este protótipo é constituído por um chassis de aço, mas com a particularidade de todas as ligações necessárias terem sido realizados com materiais poliméricos. É constituído por quatro rodas, duas das quais direcionais e com uma variação de ângulo  $-60^\circ$  a  $60^\circ$ . As características aerodinâmicas da vela rígida baseiam-se no aerofólio NACA 0015. É um veículo autónomo no qual tanto a vela rígida, produzida com madeira de balsa revestida com fibra de vidro, como o sistema de direção são controlados por servo motores [24]. Na Figura 2.25 encontra-se o protótipo desenvolvido.



Figura 2.24: Protótipo do carro à vela autônomo com múltiplas velas [48]

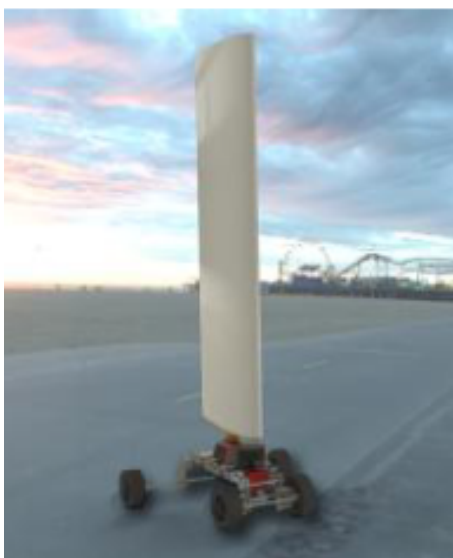


Figura 2.25: Protótipo de veículo autônomo de quatro rodas com propulsão por vela - Exemplo 2 [24]

### **Quadro resumo das diferentes soluções estudadas**

Na Tabela 2.1 apresenta-se o resumo de todos os veículos à vela estudados. Dados os requisitos que se pretendem obter no projeto do veículo com propulsão por vela rígida desta dissertação, enunciados futuramente, as soluções mais semelhantes são o Sail Car ISEP e os veículos autônomos de quatro rodas. Desta forma, estes servirão como base para o trabalho a efetuar.

Tabela 2.1: Quadro resumo das soluções de veículos à vela estudados

Veículo	Fonte Propulsora	Tipo de vela	Sistema de Direção	Sistema de Travagem	Desmontável
<b>Blokart</b>	Vento	Tradicional	Volante	Não	Sim
<b>Rinox</b>	Vento; Pedais	Tradicional	Volante	Discos	Sim
<b>Seagull</b>	Vento; Pedais	Tradicional	Volante ou Pedais	Não	Parcialmente (depende do modelo)
<b>Whike</b>	Vento; Pedais	Tradicional	Volante	Discos	Parcialmente
<b>Green Bird</b>	Vento	Rígida	Volante	Discos	Não
<b>Sail Car ISEP</b>	Vento	Rígida Autônoma/ Manual ( <i>joystick</i> )	Pedais	Não	Parcialmente
<b>NASA Zephyr</b>	Vento	Rígida Autônoma	Autônomo	Não	Não
<b>Mad Mads</b>	Vento	Tradicional	Autônomo	Não	Parcialmente
<b>Autônomo de 4 rodas Ex.1</b>	Vento	Rígida Autônoma	Autônomo	Não	Não
<b>Múltiplas Velas</b>	Vento	Rígidas Autônomas	Autônomo	Não	Não
<b>Autônomo de 4 rodas Ex.2</b>	Vento	Rígida Autônoma	Autônomo	Não	Não

## 2.5 Perfis alares

A passagem de um escoamento através de um corpo provoca o desenvolvimento de um perfil de pressões e tensões viscosas que origina duas forças [49, 50]:

- força de arrasto (*Drag*),  $F_d$ , que ocorre na direção do escoamento e que pode ser determinada a partir da equação (2.1)

$$F_d = 1/2\rho V^2 SC_d \quad (2.1)$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica do meio em que está inserido,  $V$  a velocidade do escoamento,  $S$  a área do perfil e  $C_d$  o coeficiente de arrasto.

- força de sustentação (*Lift*),  $F_l$ , perpendicular à direção do escoamento e que pode ser obtida através da equação (2.2)

$$F_l = 1/2\rho V^2 SC_l \quad (2.2)$$

em que  $C_l$  é o coeficiente de sustentação. Note-se que a principal função de uma asa é impulsionar o veículo através da ação desta força.

Estas duas forças variam de acordo com o ângulo de ataque, definido como o ângulo entre a linha média da asa e a direção do escoamento, a velocidade do escoamento e a área da secção do perfil, como se observa na Figura 2.26.

Note-se que num escoamento pode-se perceber a existência de duas diferentes zonas: uma onde a velocidade aumenta e a pressão diminui e outra onde ocorre o contrário, pelo que o escoamento se dá naturalmente na zona de menor pressão. Define-se camada limite como a região do fluido mais próxima do perfil que, como consequência da viscosidade do fluido, apresenta grandes gradientes de velocidade. Estes geram gradientes de pressão adversos, que se forem superiores ao que a camada limite suporta, provoca separação, isto

é, uma diminuição da velocidade do escoamento mais próximo do perfil ou, dependendo da magnitude, inversão do seu sentido. Este fenómeno tem grande influência na força de arrasto e sustentação desenvolvidas. No projeto de velas rígidas o objetivo principal é diminuir o valor da força de arrasto e aumentar a força de sustentação e para que isto se verifique é imprescindível a ausência do fenómeno de separação [49].

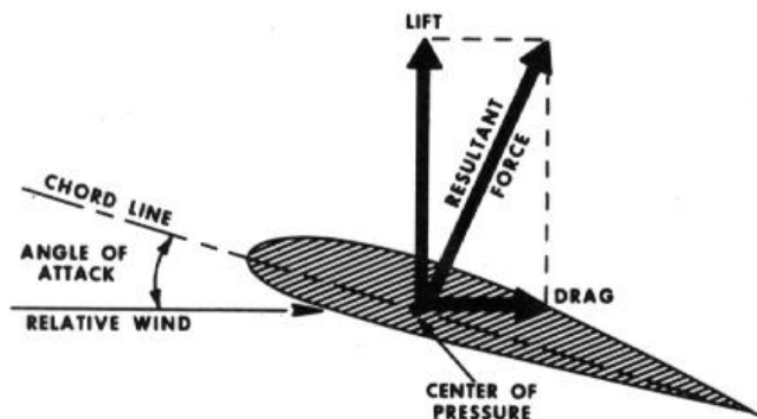


Figura 2.26: Forças aplicadas num perfil alar [36]

O perfil alar é construído de forma a eliminar as arestas e reduzir, de forma suave, a sua espessura ao longo do mesmo. Por um lado a eliminação das arestas permite diminuir a força de arrasto e por outro a diminuição suave da espessura permite diminuir o gradiente de pressões adverso e consequentemente a possibilidade de se verificar o fenómeno de separação. Note-se que na grande maioria os perfis utilizados são simétricos, por isso para um ângulo de ataque nulo, não existe força de sustentação. Desta forma, o perfil alar tem de ser orientado de forma a promover a diferença de pressões entre a parte superior e inferior do mesmo e assim desenvolver a força de sustentação. Uma das famílias de perfis mais aplicadas hoje em dia é a família dos perfis NACA, desenvolvido pela National Advisory Committee for Aeronautics [49]. Na Figura 2.27 observam-se as dimensões características de um perfil alar.

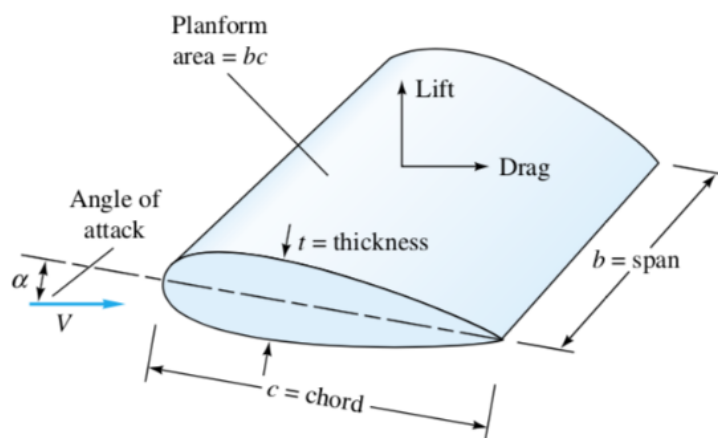


Figura 2.27: Dimensões de um perfil alar [49]

## 2.6 Conclusão

Este capítulo permitiu estudar os diferentes componentes necessários para a construção de um veículo com propulsão por vela rígida.

O estudo sobre as diferentes competições e soluções de veículos já existentes permitiu perceber quais os principais cuidados e considerações a ter para o projeto. A comparação realizada entre as diferentes soluções permitiu restringir os veículos a utilizar como fonte de inspiração, salientando-se assim o Sail Car ISEP e os dois veículos autónomos de quatro rodas.

Este estudo permite concluir que deverá ser projetado um veículo com as seguintes características:

- propulsão por vela rígida com um quadro tubular;
- um sistema de direção baseado na geometria de Ackermann;
- capacidade de montagem e desmontagem simples;
- massa reduzida para facilitar o seu transporte;
- aplicação de um perfil alar simétrico.



## 3 Proposta de Modelação do Veículo

Após o estudo efetuado sobre os diferentes veículos terrestres com propulsão à vela existentes, bem como sobre o tópico de navegação à vela, neste capítulo apresentam-se os detalhes da conceção da solução proposta, assim como toda a metodologia adotada, os diferentes testes realizados para avaliar o seu desempenho e os desafios colocados ao longo do processo de desenvolvimento.

Inicialmente foi importante perceber quais os principais requisitos existentes para o veículo com propulsão à vela a projetar, que são enunciados de seguida:

- ser constituído por quatro rodas, sendo duas direcionais;
- ter vela rígida com livre rotação e uma área de aproximadamente 1,5 m<sup>2</sup>;
- ter desmontagem/montagem fácil e manual;
- apresentar peso e dimensões reduzidos de forma a facilitar o seu transporte, que idealmente deverá poder ser efetuado no porta bagagens de um veículo ligeiro.

### 3.1 Projeto da vela

Nesta secção abordam-se todas as considerações e cálculos numéricos que levaram ao desenvolvimento da vela, iniciando-se pela seleção do aerofólio a utilizar.

#### 3.1.1 Seleção do perfil alar

Tal como referido anteriormente, a vela deve ser capaz de tirar o máximo aproveitamento da força produzida pelo vento, independentemente da sua direção, pelo que o perfil alar a aplicar na vela deve ser simétrico. Para a escolha do perfil foi importante ter em consideração o número de Reynolds, dado pela equação (3.1):

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3.1)$$

Este representa a razão entre as forças cinemáticas ou inerciais e as forças viscosas de um fluido, sendo aqui  $\rho$  a densidade do meio,  $V$  a velocidade do fluido,  $L$  o comprimento característico e  $\mu$  a viscosidade do meio. Esta grandeza adimensional é utilizada para descrever o comportamento de um fluido em torno de um determinado objeto ou canal [49].

Segundo [50], o intervalo de valores indicado para o número de Reynolds para navegação à vela é entre os  $2 \times 10^5$  e  $1,2 \times 10^6$ . Analisaram-se diferentes perfis alares com o número de Reynolds num intervalo mais reduzido, entre os 200 000 e os 500 000. Para além da simetria, pretendia-se que o perfil alar apresentasse uma razão  $C_i/C_a$ , coeficiente de sustentação máximo  $C_{lmax}$  e espessura máxima bastante elevados, de maneira a promover uma estrutura rígida. Tendo em conta que o veículo a projetar deslocar-se-á maioritariamente em espaços livres de obstáculos na área do Porto, considerou-se ainda que a velocidade média do vento a que este estaria sujeito seria no intervalo de 20 a 30 km/h. Posto isto, foram analisados os perfis NACA 0018, NACA 0015, NACA 0012, Eppler E169 e Eppler 473. De acordo com as características pretendidas, escolheu-se o perfil Eppler E169 (Figuras 3.1, 3.2, e 3.3) que permite obter uma razão  $C_i/C_a \approx 56,1$  para  $\alpha = 8^\circ$  (máximo valor entre os diferentes perfis analisados) e um  $C_{lmax} \approx 1,1$  para  $\alpha = 10^\circ$ . O  $C_d$  mantém-se bastante baixo para o intervalo dos valores de  $\alpha$  até  $10^\circ$ . A espessura máxima do perfil pode variar no intervalo de 14,4 % a 25,5 % da corda.

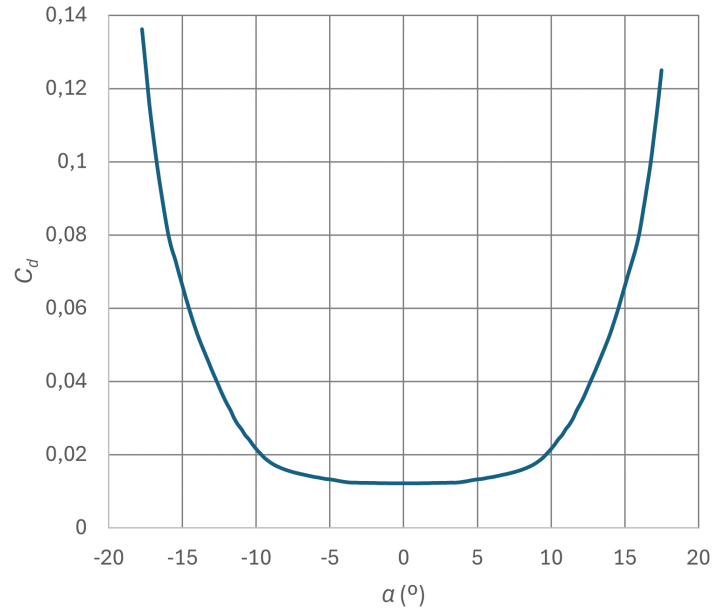


Figura 3.1: Características aerodinâmicas do perfil Eppler E169: coeficiente de arrasto em função do ângulo de ataque [51]

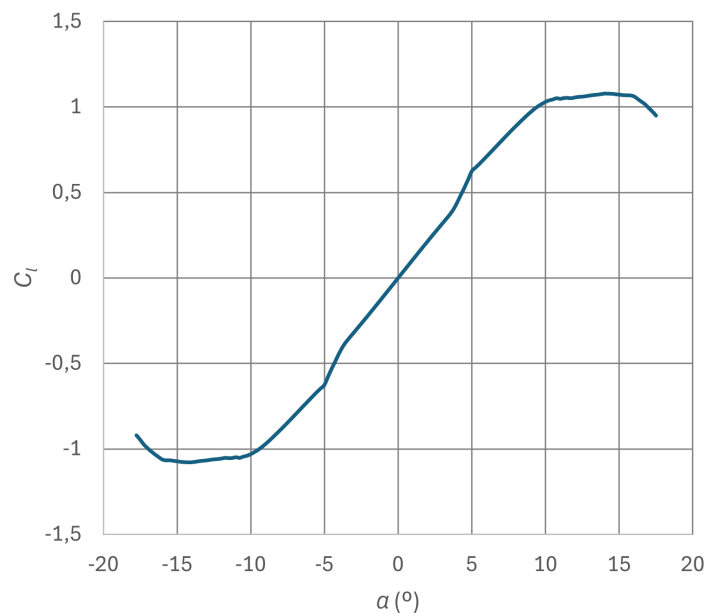


Figura 3.2: Características aerodinâmicas do perfil Eppler E169: coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque [51]

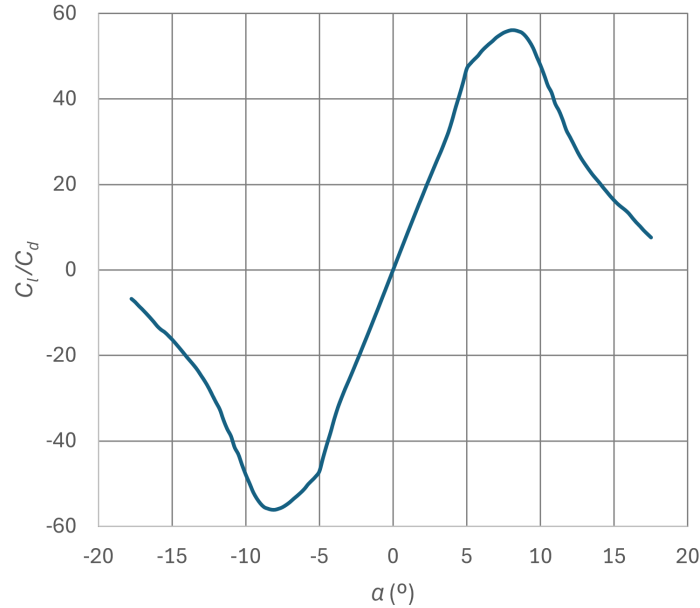


Figura 3.3: Características aerodinâmicas do perfil Eppler E169: razão entre os coeficientes de sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque [51]

### 3.1.2 Determinação dos coeficientes aerodinâmicos

Na Secção 2.5 foram abordados alguns conceitos sobre o escoamento potencial incompressível, ou seja, o escoamento em torno de um troço de largura unitária de uma asa de geometria constante, sem flecha e envergadura infinita. A teoria da linha sustentadora de Lanchester Prandtl [52] mostra que, aliado a uma asa finita, existe um sistema de vórtice (Figura 3.4) que produz um campo de velocidades que altera o comportamento aerodinâmico da asa finita quando comparado com o da asa bidimensional.

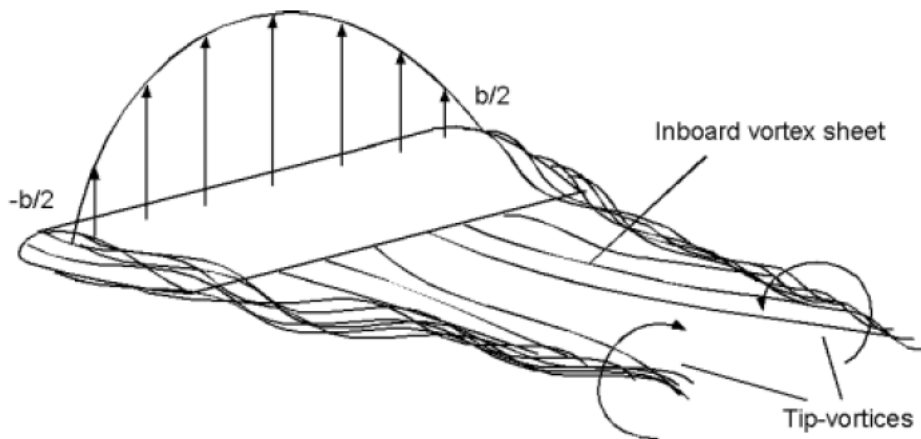


Figura 3.4: Vórtices numa asa finita [53]

Este sistema de vórtice, existente ao longo da envergadura da asa, é provocado pela diferença de pressões entre a superfície do intradorso (alta pressão) e a do extradorso (baixa pressão). A teoria em questão é aplicada em asas planas e sem flecha e defende que a asa finita é modelada por um único filamento de vórtice ligado de intensidade variável, com intensidade máxima no centro e nula nas extremidades. Com a aplicação desta teoria é possível prever e calcular numericamente o funcionamento de uma asa tridimensional. Note-se que a teoria é tipicamente aplicável em asas com *Aspect Ratio*, razão entre a medida

da envergadura e a medida da corda, superiores a 6 dado que, para razões inferiores, a distribuição de pressões pode não ser tão uniforme e conseqüentemente a aplicação da teoria não ser tão precisa. No entanto, permite obter algumas considerações iniciais e importantes sobre o funcionamento de asas tridimensionais, nomeadamente quando estas não são analisadas em simulações computacionais ou em túneis de vento. Assim, aplicando a teoria mencionada seguiu-se a determinação dos coeficientes tridimensionais da asa a projetar.

Começou-se com o cálculo do coeficiente de sustentação,  $C_l$ , assumindo uma aproximação linear da dependência deste com o ângulo de ataque,  $\alpha$  (gráfico da Figura 3.2) da seguinte forma:

$$C_l = \frac{C_{l\max}}{\alpha_{\text{perda}}} \alpha \quad (3.2)$$

onde  $C_{l\max}$  corresponde ao coeficiente de sustentação para o ângulo  $\alpha_{\text{perda}}$ , ângulo que maximiza o coeficiente de sustentação.

Assim, de acordo com a teoria enunciada, os coeficientes de sustentação bidimensional e tridimensional foram obtidos pelas equações (3.3) e (3.4), respetivamente.

$$C_{l,2D} = C'_{l,2D} \alpha \quad (3.3)$$

$$C_{l,3D} = C'_{l,3D} \alpha \quad (3.4)$$

onde  $C'_{l,2D}$  e  $C'_{l,3D}$  são, respetivamente, as taxas de variação de  $C_{l,2D}$  e  $C_{l,3D}$  com  $\alpha$ . Note-se que  $C'_{l,2D}$  corresponde à derivada de  $C_l$  em função de  $\alpha$  na equação (3.2):

$$C'_{l,2D} = \frac{C_{l\max}}{\alpha_{\text{perda}}} \quad (3.5)$$

e  $C'_{l,3D}$  foi obtido a partir da teoria mencionada [52] [53]

$$C'_{l,3D} = \frac{C'_{l,2D}}{1 + \frac{C'_{l,2D}}{\pi\Lambda}} \quad (3.6)$$

onde  $\Lambda \equiv \frac{b}{c}$  é o *Aspect Ratio*,  $b$  é a envergadura da asa e  $c$  é a corda da asa.

Considerando a aproximação em que  $\alpha$  é muito pequeno,  $C'_{l,2D} = 2\pi$  [52], e dividindo (3.6) por  $C'_{l,2D}$  resulta:

$$\frac{C'_{l,3D}}{C'_{l,2D}} = \frac{\Lambda}{\Lambda + 2} \quad (3.7)$$

Substituindo os resultados de (3.5) e (3.7) em (3.4) obteve-se

$$C_{l,3D} = \frac{\Lambda}{\Lambda + 2} \frac{C_{l\max}}{\alpha_{\text{perda}}} \alpha \quad (3.8)$$

Recorrendo novamente aos dados existentes em [51] registaram-se os seguintes valores:

$$\begin{cases} C_{l\max} = 1,0781 \\ \alpha_{\text{perda}} = 14^\circ \end{cases} \quad (3.9)$$

Para além destes,  $\Lambda = 1,5$  uma vez que a envergadura da vela é 1,5 m e a sua corda 1 m. Substituindo estes valores em (3.8) obteve-se:

$$C_{l,3D} = 0,0330\alpha \quad (3.10)$$

De seguida determinou-se o coeficiente de arrasto tridimensional,  $C_{d,3D}$ , equação (3.11). Este corresponde à soma do coeficiente de arrasto bidimensional,  $C_{d,2D}$ , com o coeficiente de resistência induzida  $C_{di}$  definido em (3.12)[52]:

$$C_{d,3D} = C_{d,2D} + C_{di} \quad (3.11)$$

$$C_{di} = \frac{(C_{l,2D})^2}{\pi\Lambda} \quad (3.12)$$

Através de uma aproximação quadrática à curva do gráfico da Figura 3.1 determinou-se o coeficiente de arrasto bidimensional em função de  $\alpha$ . Desta forma, o coeficiente de arrasto bidimensional corresponde à equação:

$$C_{d,2D} = 0,01217 + 2,07 \times 10^{-4}\alpha^2 \quad (3.13)$$

tal que, o coeficiente independente corresponde a  $C_{d,2D}(\alpha = 0^\circ)$  e o coeficiente do termo quadrático a  $C_{d,2D}(\alpha = \alpha_{perda})$ [51].

Substituindo as definições de  $C_{d,2D}$ , equação (3.13), e de  $C_{l,2D}$ , equação (3.3), em (3.11) e (3.12), respetivamente, obteve-se:

$$C_{d,3D} = 0,01217 + 4,38 \times 10^{-4}\alpha^2 \quad (3.14)$$

Desta forma, aplicando os coeficientes tridimensionais calculados nas equações (2.1) e (2.2), foi possível determinar as equações para as forças de sustentação, equação (3.15), e arrasto, equação (3.16), para a situação de uma vela finita:

$$F_l = \frac{1}{2}\rho V^2 S(0,0330\alpha) \quad (3.15)$$

$$F_d = \frac{1}{2}\rho V^2 S(0,01217 + 4,38 \times 10^{-4}\alpha^2) \quad (3.16)$$

Obteve-se ainda a equação para calcular a força aerodinâmica, equação (3.17):

$$F_a = \sqrt{F_l^2 + F_d^2} \quad (3.17)$$

### 3.1.3 Determinação das velocidades instaladas no veículo

Após determinar os coeficientes aerodinâmicos tridimensionais e de forma a analisar o movimento descrito pelo veículo, aplicou-se o princípio enunciado em [53], ou seja, aplicou-se o conceito de triângulo das velocidades, Figura 3.5. Este conceito combina três velocidades que influenciam o movimento do veículo: velocidade real do vento,  $V_V$ , velocidade aparente do vento,  $V_A$ , e velocidade do próprio veículo,  $V_C$ . Numa primeira abordagem, considerando a velocidade real do vento com intensidade fixa e de valor 20 km/h, foi possível, através do triângulo das velocidades, determinar a intensidade da velocidade aparente do vento e da velocidade do veículo.

Começou-se por relacionar as três velocidades referidas com os ângulos  $\beta$  e  $\phi$  representados na Figura 3.5:

$$\beta = \arctg\left(\frac{V_V \sin \phi}{V_V \cos \phi + V_C}\right), \quad \beta \leq \frac{\pi}{2} \quad (3.18)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{V_V \sin\left(\phi - \frac{\pi}{2}\right) - V_C}{V_V \cos\left(\phi - \frac{\pi}{2}\right)}\right) + \frac{\pi}{2}, \quad \beta > \frac{\pi}{2} \quad (3.19)$$

$$V_A = \sqrt{V_V^2 + V_C^2 + 2V_V V_C \cos \phi} \quad (3.20)$$

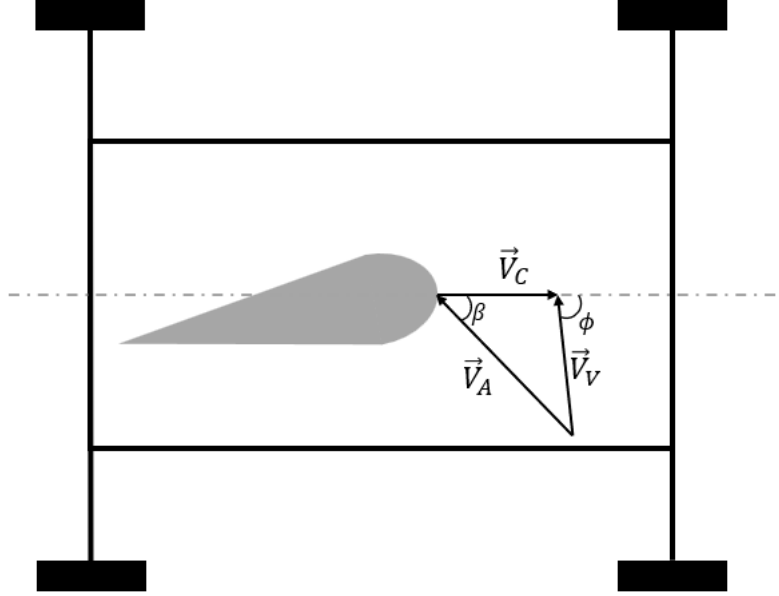


Figura 3.5: Triângulo de velocidades no plano horizontal [54]

Com o objetivo de obter  $V_A$  em função de  $V_V$  começou-se por reescrever a equação (3.18) em ordem a  $V_C$ :

$$V_C = V_V \left( \frac{\sin \phi}{\tan \beta} - \cos \phi \right), \quad \beta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right] \quad (3.21)$$

Substituindo a equação (3.21) na equação (3.20) e simplificando:

$$V_A = V_V \frac{\sin \phi}{\sin \beta}, \quad \phi \in [0, \pi], \beta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right] \quad (3.22)$$

A partir deste resultado foi possível estudar o valor máximo de  $V_A$  para cada valor de  $\beta$ . Para tal, determinou-se o valor de  $\phi$  que maximiza  $V_A$ , através do cálculo dos zeros da sua derivada no domínio  $\phi \in [0, \pi]$  e  $\beta \in [0, \frac{\pi}{2}]$ :

$$\frac{\partial V_A}{\partial \phi} = 0 \Leftrightarrow \frac{V_V}{\sin \beta} \cos \phi = 0 \Leftrightarrow \phi = \frac{\pi}{2} \quad (3.23)$$

Avaliando o sinal da derivada para valores inferiores e superiores ao zero verificou-se que esse valor de  $\phi$  maximiza  $V_A$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial V_A}{\partial \phi} > 0, & \phi < \frac{\pi}{2} \\ \frac{\partial V_A}{\partial \phi} < 0, & \phi > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3.24)$$

Assim, com recurso às equações (3.21) e (3.22) e assumindo como já referido  $V_V = 20$  km/h, obtiveram-se os valores de  $V_C$  e  $V_A$ , para valores de  $\beta$  no intervalo  $[5, 90]^\circ$  com incrementos de  $5^\circ$  e  $\phi = \frac{\pi}{2}$ . Na Tabela 3.1 encontram-se os resultados obtidos. Na Figura 3.6 observa-se a representação do triângulo das velocidades para uma das realizações da Tabela 3.1.

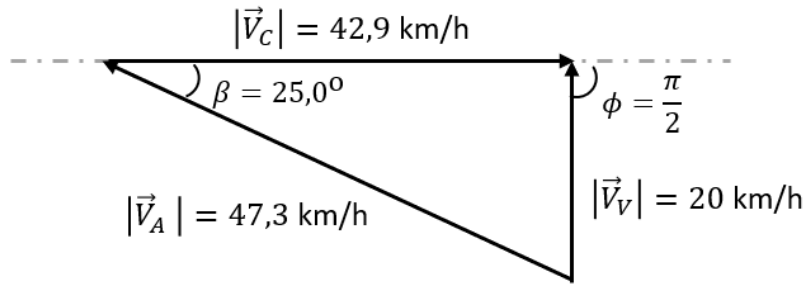


Figura 3.6: Triângulo de velocidades para os valores de  $V_V = 20$  km/h,  $\phi = \frac{\pi}{2}$  e  $\beta = 25^\circ$

Pela análise da Tabela 3.1 entendeu-se que os valores obtidos são apenas resultado do triângulo de velocidades para as condições enunciadas anteriormente, ou seja, as velocidades obtidas não têm necessariamente significado físico. Para proceder ao dimensionamento dos restantes componentes optou-se por utilizar uma intensidade de velocidade do veículo possível de atingir, ou seja, aproximadamente entre os 30 km/h e os 45 km/h. Desta forma, para os dimensionamentos que se seguem utilizaram-se os valores obtidos para  $\beta = 25^\circ$ .

Tabela 3.1: Determinação das velocidades  $V_C$  e  $V_A$  com a variação do ângulo  $\beta$  sendo  $V_V$  constante e igual a 20 km/h e  $\phi = \pi/2$

$\beta$ ( $^\circ$ )	$V_C$ (km/h)	$V_A$ (km/h)
5,00	228	229
10,0	113	115
15,0	74,6	77,3
20,0	54,9	58,5
25,0	42,9	47,3
30,0	34,6	40,0
35,0	28,6	34,9
40,0	23,8	31,1
45,0	20,0	28,3
50,0	16,8	26,1
55,0	14,0	24,4
60,0	11,6	23,1
65,0	9,33	22,1
70,0	7,28	21,3
75,0	5,36	20,7
80,0	3,53	20,3
85,0	1,75	20,1
90,0	0,00	20,0

### 3.1.4 Determinação das forças aerodinâmicas máximas

Substituindo os valores de  $V_A$ , obtidos na Tabela 3.1, nas equações (3.15) e (3.16) determinaram-se as forças aerodinâmicas transmitidas à vela e os valores obtidos foram registados na Tabela 3.2.

Depois desta análise, tal como referido anteriormente, os valores utilizados para os dimensionamentos seguintes correspondem aos valores obtidos para  $\beta = 25^\circ$ .

Tabela 3.2: Determinação da força aerodinâmica máxima com a variação do ângulo  $\beta$ 

$\beta$ (°)	$F_l$ (N)	$F_d$ (N)	$F_a$ (N)
5,00	1720	364	1760
10,0	433	91,8	442
15,0	195	41,3	199
20,0	112	23,7	114
25,0	73,0	15,5	74,7
30,0	52,2	11,1	53,3
35,0	39,7	8,41	40,5
40,0	31,6	6,70	32,3
45,0	26,1	5,54	26,7
50,0	22,3	4,72	22,7
55,0	19,4	4,12	19,9
60,0	17,4	3,69	17,8
65,0	15,9	3,37	16,2
70,0	14,8	3,13	15,1
75,0	13,9	2,97	14,3
80,0	13,5	2,85	13,8
85,0	13,1	2,79	13,4
90,0	13,0	2,77	13,3

### 3.1.5 Verificação das condições de estabilidade do veículo

O primeiro passo para a verificação da estabilidade do veículo foi determinar as forças máximas que permitem garantir a condição de equilíbrio de momentos em relação a um determinado eixo do veículo. A primeira situação, mostrada na Figura 3.7, resulta da condição de equilíbrio de momentos em relação a um eixo lateral,  $s$ . Nesta situação considerou-se a vela disposta numa posição paralela ao eixo pelo que, apenas a componente de sustentação da vela,  $F_l$ , e o peso,  $P$ , têm influência na estabilidade do veículo.

A condição de equilíbrio de momentos em torno do eixo  $s$  é definida através da equação (3.25):

$$\sum M_s = 0 \Leftrightarrow F_l \times h_{CP} - P \times l = 0 \quad (3.25)$$

em que:

- $h_{CP} = 1210$  mm, correspondente à altura do centro de pressão da vela;
- $P = m \times g = 15,7 \times 9,81 = 154$  N;
- $l = 511$  mm.

Note-se que todos estes valores foram obtidos com auxílio do *Solidworks*, um *software* CAD 3D usado para criar modelos paramétricos e facilitar o projeto e simulação virtual de produtos em diversos setores. Substituindo estes valores na equação (3.25) obtém-se:

$$F_l = \frac{154 \times 511}{1210} = 65,0 \text{ N} \quad (3.26)$$

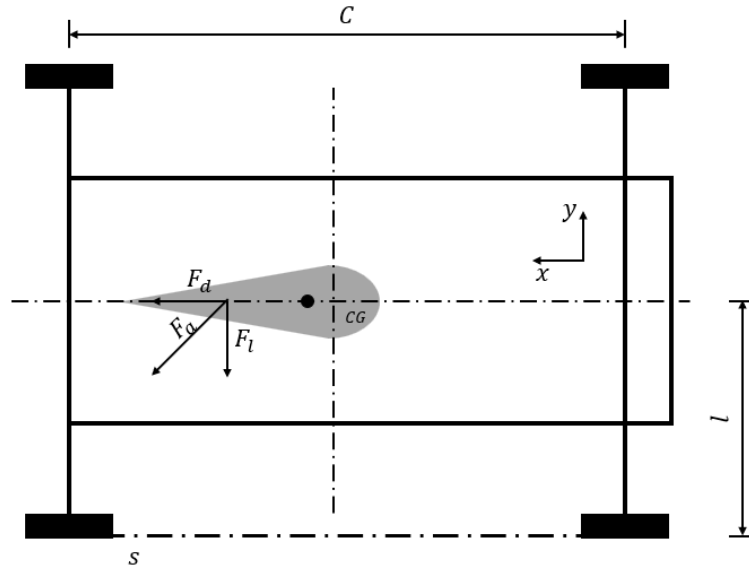


Figura 3.7: Representação esquemática de uma situação de possível perda de equilíbrio relativamente ao eixo  $s$  - Caso 1

O segundo caso, ilustrado na Figura 3.8, resulta da condição de equilíbrio de momentos em relação ao eixo frontal, representado novamente por  $s$ . Tal como na situação anterior, considera-se a vela colocada numa posição paralela a esse eixo, razão pela qual apenas a componente de sustentação e peso têm influência na estabilidade do veículo. Neste caso, a condição de equilíbrio de momentos é definida através da equação (3.27).

$$\sum M_s = 0 \Leftrightarrow F_l \times h_{CP} - P \times x_{CG} = 0 \quad (3.27)$$

Substituindo os valores já conhecidos na equação (3.27) e sabendo que  $x_{CG} = 626$  mm obtém-se:

$$F_l = \frac{154 \times 626}{1210} = 79,7 \text{ N} \quad (3.28)$$

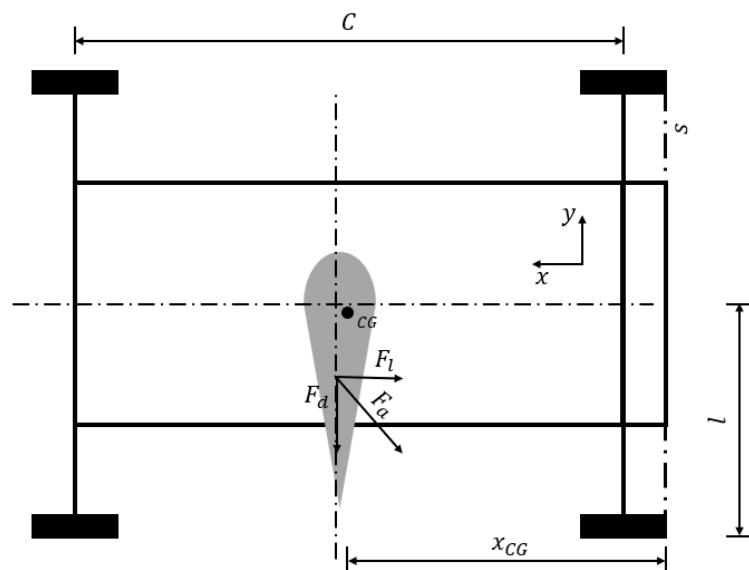


Figura 3.8: Representação esquemática de uma situação de possível perda de equilíbrio relativamente ao eixo  $s$  - Caso 2



$$F_a = \min (F_{ae}, F_a^{\text{máx}}) = \begin{cases} F_a^{\text{máx}}, & F_a^{\text{máx}} < F_{ae} \\ F_{ae}, & F_a^{\text{máx}} > F_{ae} \end{cases} \quad (3.33)$$

em que  $F_a^{\text{máx}}$  corresponde à força aerodinâmica máxima, valor anteriormente apresentado na Tabela 3.1, e  $F_{ae}$  corresponde à força aerodinâmica de estabilidade, ou seja, valor a partir do qual a condição de equilíbrio é ultrapassada. Para uma certa orientação da vela,  $\beta$ , se  $F_a^{\text{máx}} > F_{ae}$  sabe-se que  $F_a^{\text{máx}}$  seria suficiente para provocar perda de estabilidade, razão pela qual seria necessário alterar a orientação da vela, ou aumentar a largura de via traseira para promover o equilíbrio do veículo. No entanto, para certos valores de  $\beta$  em que  $F_{ae} > F_a^{\text{máx}}$  então a força aerodinâmica máxima possível de atingir não provocaria o desequilíbrio do veículo.

Na Figura 3.10 observa-se uma representação esquemática da força aerodinâmica, decomposta nas suas componentes: força de sustentação e força de arrasto; bem como decomposta nas componentes segundo  $x$  e  $y$ . Da sua análise obtêm-se as relações descritas nas equações (3.34), (3.35) e (3.36):

$$F_a = \frac{F_Y}{\cos(\omega - 90^\circ + \beta)} \quad (3.34)$$

$$F_l = F_a \times \sin \omega \quad (3.35)$$

$$\tan \omega = \frac{C_{l,3D}}{C_{d,3D}} \quad (3.36)$$

Substituindo a equação (3.34) na equação (3.35) obtêm-se:

$$F_l = \frac{F_Y \times \sin \omega}{\cos(\omega - 90^\circ + \beta)} \quad (3.37)$$

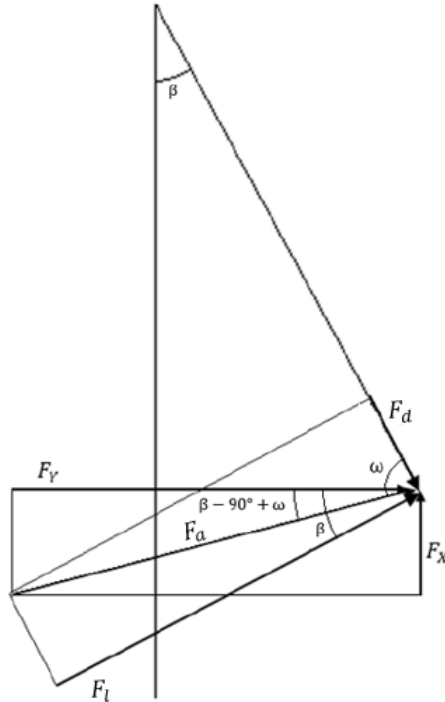


Figura 3.10: Representação da força aerodinâmica decomposta nas duas componentes força de sustentação e arrasto e segundo as componentes  $x$  e  $y$ , adaptado de [53]

## Proposta de Modelação do Veículo

Aplicando as definições de  $C_{l,3D}$ , equação (3.10), e  $C_{d,3D}$ , equação (3.14), na equação (3.36), obtém-se o ângulo  $\omega$  em função do ângulo de ataque  $\alpha$  (equação 3.38):

$$\omega(\alpha) = \arctg \left( \frac{0,330\alpha}{0,01217 + 4,38 \times 10^{-4}\alpha^2} \right) \quad (3.38)$$

Como a força de estabilidade mínima dos três casos analisados corresponde à situação 1, e por sua vez esta corresponde à componente  $y$  da força aerodinâmica, considera-se  $F_Y^{\text{máx}} = 65,0$  N. Assim, substituindo na equação 3.37 obtém-se  $F_{le}$ , equação (3.39), que corresponde à componente de sustentação da força  $F_{ae}$ , equação (3.40).

$$F_{le} = \frac{F_Y^{\text{máx}} \times \sin \omega}{\cos(\omega - 90^\circ + \beta)} \quad (3.39)$$

$$F_{ae} = \frac{F_Y^{\text{máx}}}{\cos(\omega - 90^\circ + \beta)} \quad (3.40)$$

O primeiro passo para a determinação de  $F_{ae}$  é a resolução do sistema de equações (3.41):

$$\begin{cases} F_{le} = F_l \Leftrightarrow \frac{F_Y^{\text{máx}} \sin \omega(\alpha)}{\cos(\omega(\alpha) - 90^\circ + \beta)} = \frac{1}{2} \rho V^2 S(0,0330\alpha) \\ \omega(\alpha) = \arctg \left( \frac{0,330\alpha}{0,01217 + 4,38 \times 10^{-4}\alpha^2} \right) \end{cases} \quad (3.41)$$

Deste sistema obtém-se os valores de  $\alpha$  e  $\omega$ . Substituindo os valores obtidos na equação (3.40) obtém-se o valor da força aerodinâmica de estabilidade,  $F_{ae}$ , presentes na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Determinação da força aerodinâmica de estabilidade com variação do ângulo  $\beta$

$\beta$ (°)	$\omega$ (°)	$\alpha$ (°)	$C_{l,3D}$	$C_{d,3D}$	$F_{ae}$ (N)
5	53,3	0,5	0,0165	0,0123	76,4
10	78,3	2,06	0,0681	0,014	65,1
15	82	4,66	0,154	0,0217	65,5
20	81,2	8,23	0,272	0,0418	66,3
25	78,9	12,6	0,416	0,0817	67
30	75,7	17,6	0,580	0,147	67,6
35	72,3	22,9	0,756	0,242	68,1

Da análise da tabela verificou-se que para  $\beta \geq 30^\circ$ , obteve-se  $\alpha \geq 17,6^\circ$ . No entanto, sabe-se que para o perfil escolhido  $\alpha_{\text{perda}} = 14^\circ$ , razão pela qual se pode concluir que, para estas condições de análise, a vela perderia a sua capacidade de sustentação. Desta forma, valores de  $\alpha \geq 17,6^\circ$  não são considerados para garantir que o rendimento obtido da fonte de propulsão é sempre elevado.

Na Tabela 3.4 comparam-se os valores da força aerodinâmica de estabilidade com a força aerodinâmica máxima, apresentada anteriormente na Tabela 3.2, para valores de  $\beta < 30^\circ$ .

Pela análise da Tabela 3.4 conclui-se que para esta gama de valores de orientação da vela  $F_{ae} < F_a^{\text{máx}}$ , pelo que, considerando a condição presente na equação (3.33), o veículo não conseguiria suportar as forças aerodinâmicas máximas calculadas teoricamente a partir das condições enunciadas na Figura 3.6. Por exemplo, para  $\beta = 25^\circ$  o veículo perderia a estabilidade a partir de forças de intensidade igual a 67,0 N, não conseguindo suportar a força aerodinâmica máxima de 74,7 N.

Tabela 3.4: Comparação de  $F_{ae}$  com  $F_a^{\max}$ 

$\beta$ (°)	$F_{ae}$ (N)	$F_{amax}$ (N)
5,00	76,4	1760
10,0	65,1	442
15,0	65,5	199
20,0	66,3	114
25,0	67,0	74,7

### 3.1.6 Dimensionamento do mastro

Previamente à modelação da vela determinaram-se quais as dimensões da secção transversal do mastro a utilizar. Para isso recorreu-se ao diagrama de corpo livre presente na Figura 3.11.

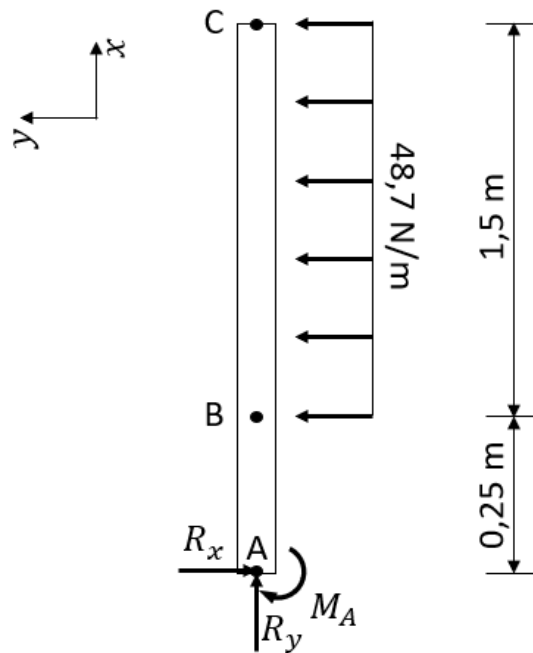


Figura 3.11: Diagrama de corpo livre do mastro: onde a força distribuída na secção [BC] foi calculada a partir da componente de sustentação máxima, 73,0 N, para  $\beta = 25^\circ$

Note-se que, para o estudo da secção em questão, a única componente da força aerodinâmica que contribui é a componente de sustentação. Desta forma utilizaram-se os resultados da Tabela 3.2 para  $\beta = 25^\circ$ . Concluiu-se anteriormente que para estas condições o veículo perde a condição de equilíbrio, Tabela 3.4. Contudo, garantindo que o mastro suporta a força de sustentação máxima, 73,0 N então garante-se que suporta as forças que mantêm o veículo em equilíbrio. Através das condições de equilíbrio escritas na equação (3.42) calcularam-se as reações  $R_x$ ,  $R_y$  e  $M_A$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum M_A = 0 \Leftrightarrow M_A = 73,0 \text{ N} \cdot \text{m} \\ \sum F_x = 0 \Leftrightarrow R_x = 73,0 \text{ N} \\ \sum F_y = 0 \Leftrightarrow R_y = 0 \text{ N} \end{array} \right. \quad (3.42)$$

De seguida determinaram-se os diagramas de esforços e momento fletor, através da abordagem do método da integração [55], equação (3.43). Seccionou-se o corpo antes do ponto B e analisaram-se os dois segmentos obtidos.

$$\text{(Secção à direita)} \begin{cases} dV/dx = -w \\ dM/dx = +V \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} V = \int -w dx \\ M = \int V dx \end{cases} \quad (3.43)$$

Desta forma obtiveram-se os diagramas de esforços e momentos fletores presentes na Figura 3.12.

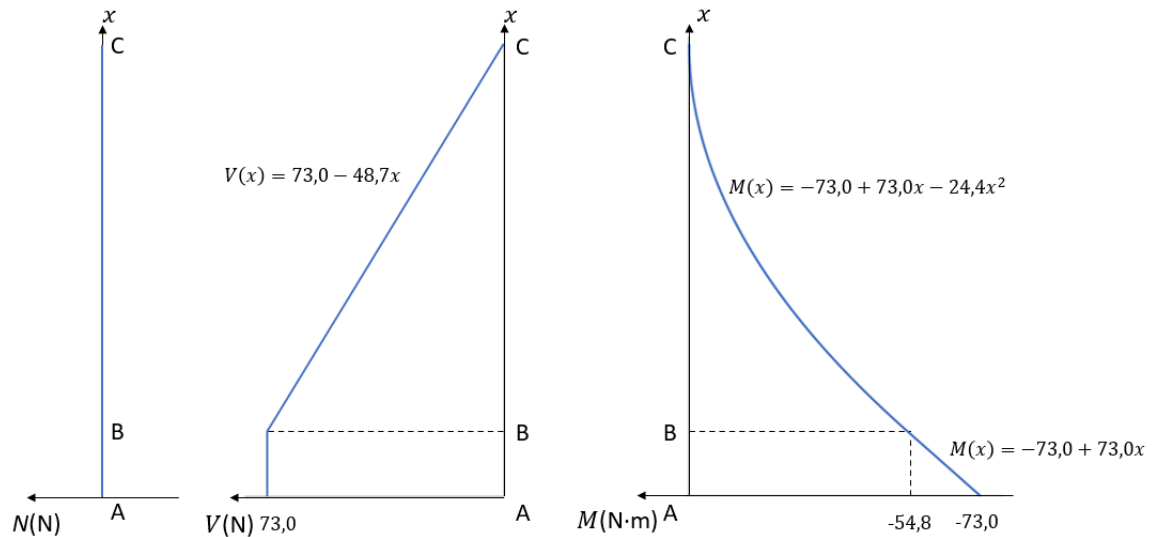


Figura 3.12: Diagramas de esforços internos: em cima o diagrama do esforço axial ( $N$ ), ao centro o diagrama de esforço transversal ( $V$ ) e em baixo o diagrama de momento fletor ( $M$ )

Por fim, calculou-se a tensão axial máxima instalada pelo momento fletor,  $\sigma_{max}$ , para diferentes secções de tubo circular através da equação:

$$\sigma_{max} = \frac{M \times c}{I} \quad (3.44)$$

em que  $M$  corresponde ao momento fletor,  $c$  à distância ao eixo neutro e  $I$  ao momento inércia da secção em relação ao eixo neutro. Pela condição de resistência [56]  $\sigma_{max} \leq \sigma_{adm}$  comparou-se, respetivamente, a tensão axial instalada com a tensão admissível, obtida pela equação (3.45), de forma a obter os diferentes valores de  $cs$ .

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{ced}}{cs} \quad (3.45)$$

em que  $\sigma_{ced}$  corresponde à tensão de cedência do material a utilizar, liga de alumínio AW 6063, ou seja, 275 MPa.

Após a análise de diferentes perfis existentes no mercado [57], Anexo A, alguns presentes na Tabela 3.5, optou-se por utilizar o perfil  $\varnothing 35$  e espessura de 2 mm.

Note-se que qualquer um dos perfis analisados permitia suportar os esforços impostos, no entanto, a escolha deste perfil não é unicamente pelo coeficiente de segurança obtido, mas também por parâmetros construtivos que serão explicados posteriormente. A utilização deste perfil está dependente do stock disponível no mercado, assim como das condições de encomenda impostas pelo fornecedor. A aplicação de outros perfis deverá ser capaz de suportar os esforços anteriormente referidos.

Tabela 3.5: Análise das possíveis secções circulares para o mastro

$\varnothing_{ext}$ (mm)	$\varnothing_{int}$ (mm)	$I$ (cm <sup>4</sup> )	$\sigma_{max}$ (MPa)	$cs$
30	27	1,4	160	1,7
32	27	2,5	92	3,0
32	29	1,7	140	2,0
33	28	2,8	86	3,2
35	30	3,4	75	3,6
35	31	2,8	90	3,0
40	34	6,0	49	5,7

### 3.1.7 Modelação da vela

Terminado o dimensionamento do mastro iniciou-se a modelação da vela pelas suas costelas. Com recurso ao *software airfoil tools* [51], uma plataforma *web* especializada que disponibiliza informações e ferramentas para análise e seleção de perfis aerodinâmicos, exportou-se a forma do perfil Eppler E169, com 1000 mm de corda, para o *software* de modelação *Solidworks* 2022 e modelaram-se as costelas da vela arbitrando uma espessura de 15 mm. As costelas serão produzidas em contraplacado de madeira, como por exemplo o disponível no mercado em [58]. O furo coincidente com o ajuste no mastro localiza-se a uma distância de 250 mm do início do perfil, Figura 3.13. Note-se que esta posição foi definida tendo em consideração que este afastamento é, geralmente, entre os 23 % e os 25 % do comprimento da corda [59]. Colocar o mastro nesta faixa de posições permite simultaneamente garantir o equilíbrio e a estabilidade da vela, bem como aumentar a eficácia no controlo da mesma.

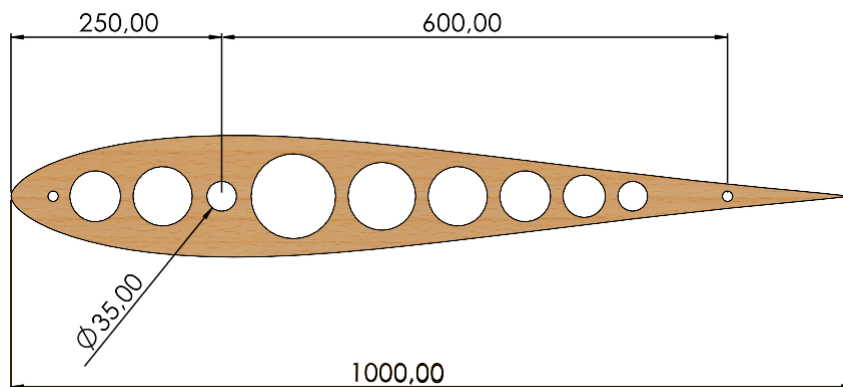


Figura 3.13: Exemplo de uma costela para a vela (medidas em mm)

Nas extremidades do perfil existem dois furos que permitem a entrada, de forma guiada, de dois tubos de comprimento igual à envergadura da vela. O seu objetivo é, simultaneamente, aumentar a rigidez da vela projetada e garantir o alinhamento necessário entre todas as costelas da vela. De forma a reduzir a sua massa, as costelas apresentam cortes circulares de material.

### Proposta inicial para a vela

Numa primeira abordagem da modelação, no mastro apenas existiam dez furos de diâmetro 6 mm, espaçados entre si 165 mm, que permitiam a fixação, através de uma ligação parafuso ISO 4017 - porca ISO 10511 [60], de duas chapas, Figura 3.14, que, simultaneamente, serviam de apoio e garantiam o posicionamento vertical das costelas.

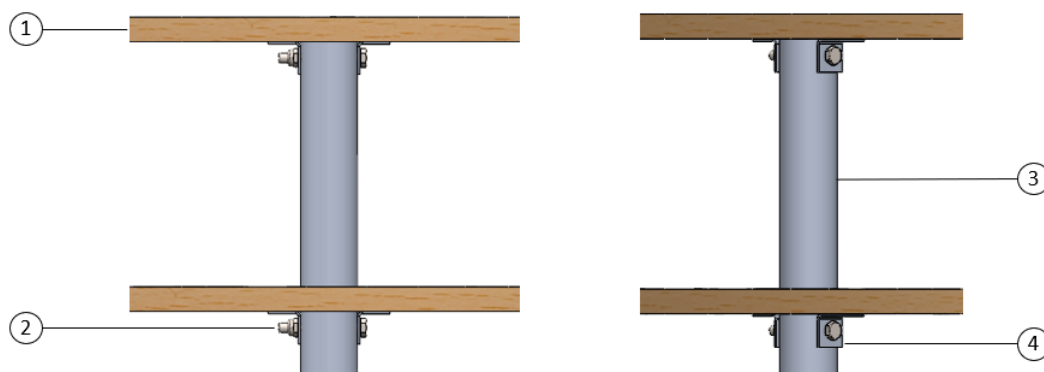


Figura 3.14: Sistema de fixação para as costelas: 1 - Costela; 2 - Ligação aparafusada; 3 - Mastro; 4 - Chapas de fixação

Na parte inferior existia ainda um furo de 10 mm que permitia a fixação do mastro. Note-se que duas das costelas apresentam uma ligeira alteração da forma para a fixação da cauda, explicado posteriormente. Assim, as dimensões finais da vela eram 1000 mm de corda e 1500 mm de envergadura, obtendo-se uma área de  $1,5 \text{ m}^2$ , tal como definido inicialmente. Na Figura 3.15 observa-se a proposta inicial para a vela.

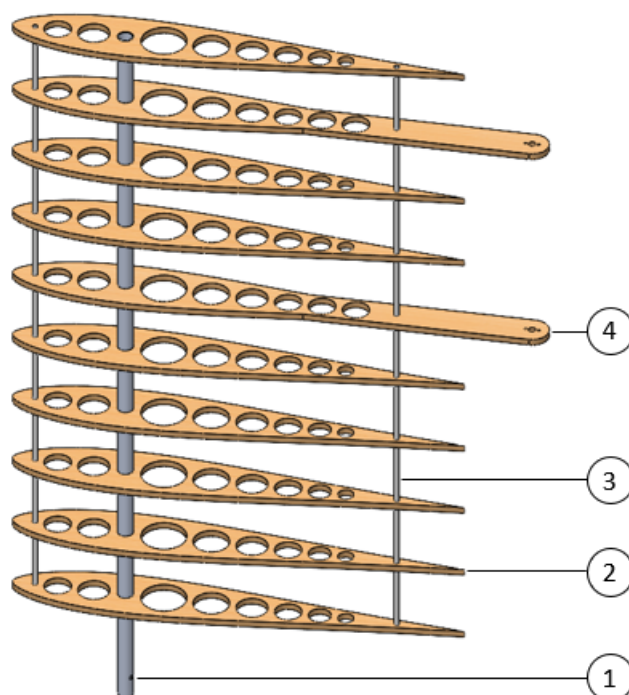


Figura 3.15: Proposta inicial para a vela: 1 - Mastro; 2 - Costela; 3 - Tubo lateral; 4 - Costela para fixação da cauda

Esta solução não foi adotada uma vez que as duas costelas alteradas para a fixação da cauda dificultam a obtenção, com precisão, da forma do perfil escolhido para vela.

### Proposta final para a vela

Surge então uma segunda abordagem, em que o mastro passa a ser composto por um tubo principal igual ao da primeira abordagem e nele são fixos outros três tubos de diâmetro inferior que servem para fixação da cauda. Para a fixação destes tubos recorre-se a uma

peça obtida por fabricação aditiva em PETG, Figura 3.16. A aplicação desta peça será feita numa primeira versão deste veículo, por facilidade na obtenção de recursos para o seu fabrico. Depois de analisado o seu comportamento, caso se verifique necessário, poderão ser aplicadas outras soluções já existentes no mercado.

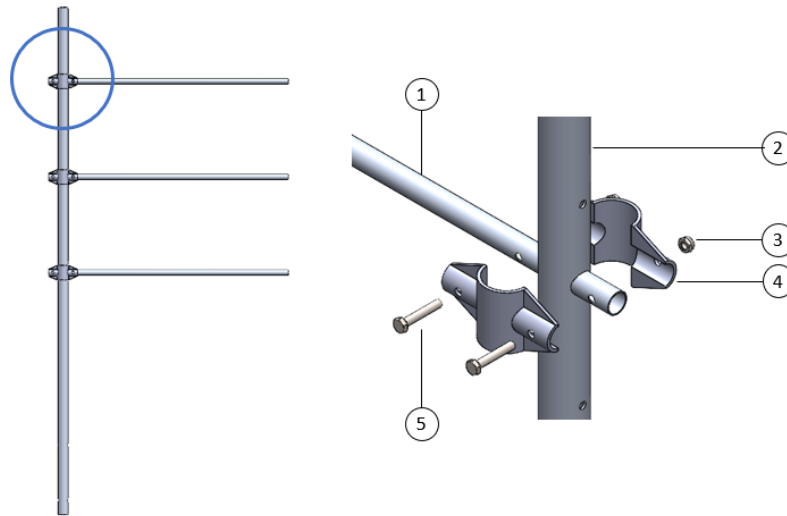


Figura 3.16: Proposta final para o mastro: à esquerda observa-se o mastro devidamente montado e à direita o detalhe da fixação entre o tubo principal e os três de diâmetro inferior: 1 - Tubo secundário; 2 - Tubo principal; 3 - Porca M6; 4 - Peça para fixação dos tubos; 5 - Parafuso M6 x 35

A montagem da vela é feita de baixo para cima e, tal como na primeira abordagem, através das chapas de fixação garante-se a posição vertical das costelas. Por fim, através de um molde, a espuma de poliuretano [58] é expandida entre estas. A estrutura será envolvida por fibra de vidro, com o objetivo de preservar e aumentar a durabilidade da vela. Note-se que a primeira e a última costela não apresentam cortes de material de forma a garantir maior rigidez e proteção da estrutura. Na Figura 3.17 vê-se a proposta final para a vela.

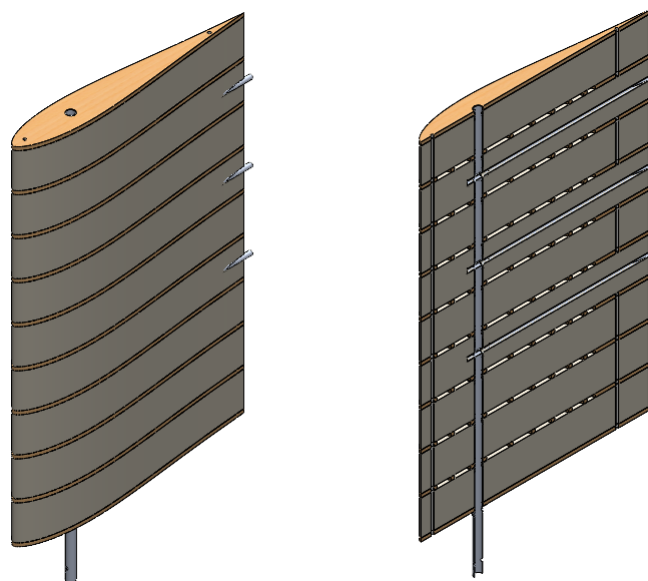


Figura 3.17: Proposta final para a vela, representada à direita em corte

### 3.1.8 Modelação da cauda

Para a cauda, foi adotado o mesmo perfil utilizado na vela e procurou-se obter um *aspect ratio* semelhante. Com base noutros veículos de propulsão à vela já produzidos, sabe-se que os valores da área da cauda adotados costumam variar entre os 10 % e os 30 % da área da vela principal [59]. Uma área da cauda muito reduzida pode não promover um momento de rotação necessário para o movimento da vela e uma área muito elevada pode provocar desequilíbrios no veículo. Desta forma, a cauda modelada apresenta uma corda de 319 mm e uma envergadura de 470 mm permitindo obter uma área de 0,150 m<sup>2</sup>, ou seja 10% da área da vela principal. Note-se que a cauda pode ser considerada como uma vela mais pequena, pelo que a sua constituição inicial era igual à da vela principal, no entanto, para facilitar a sua fixação, utilizou-se uma abordagem diferente, como se pode ver na Figura 3.18. Neste caso, a posição vertical das costelas deixou de ser feita através das chapas de fixação do mastro e passou a ser feita apenas pelos tubos laterais.

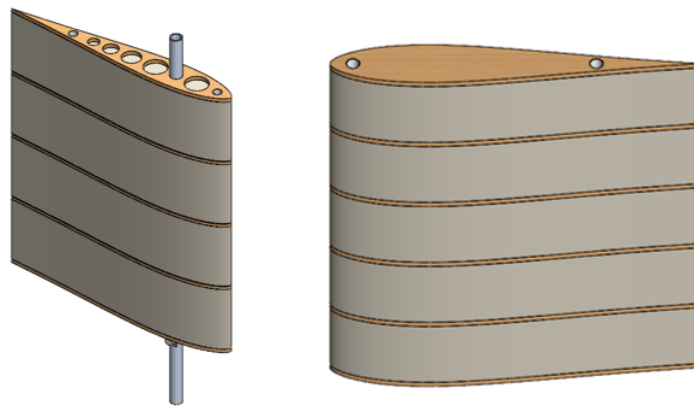


Figura 3.18: As duas opções propostas para a cauda: proposta inicial (esquerda) e proposta final (direita)

## 3.2 Projeto do chassi, eixo frontal e eixo traseiro

Terminado o projeto da vela procedeu-se à modelação do chassi bem como os diferentes elementos constituintes do eixo frontal e do eixo traseiro.

Optou-se por modelar um chassi tubular porque permite combinar uma elevada resistência mecânica com uma massa reduzida. Utilizou-se um tubo com perfil quadrado, de forma a facilitar a construção do chassi, com 30 mm de dimensão exterior e 2 mm de espessura, presente no Anexo B. O material utilizado é o mesmo que o utilizado no mastro, ou seja a liga de alumínio AW 6063 [57]. De acordo com o referido aquando da seleção do perfil para o mastro, a disponibilidade de stock e condições de encomenda para o perfil a aplicar no chassis serão um fator a ter em conta aquando da construção. Na Figura 3.19 vê-se a primeira versão do chassi modelado. Os dois tubos transversais, afastados entre si 1000 mm, permitem a fixação das rodas traseiras e dianteiras. A largura máxima do chassi é 800 mm e o seu comprimento é 1286 mm, cumprindo assim as medidas definidas inicialmente nos requisitos do projeto. Existem ainda mais duas travessas que permitem, em simultâneo, aumentar a estabilidade do chassis, aparafusar uma chapa para a fixação do sistema da vela ao chassi e ainda a chapa de fixação da bateria. O material a utilizar para estas chapas seria a liga de alumínio AW 6061 [57]. Na travessa frontal é fixada uma segunda chapa que permite a fixação do servomotor, responsável pelo controlo do sistema de direção.

No entanto, percebeu-se que com esta solução, a parte frontal do chassi apresentava arestas vivas, pelo que se tornava perigoso num possível embate. Procedeu-se a uma alteração da mesma de forma a reduzir esse risco, ilustrada na Figura 3.20, alterando-se o comprimento para 1160 mm.

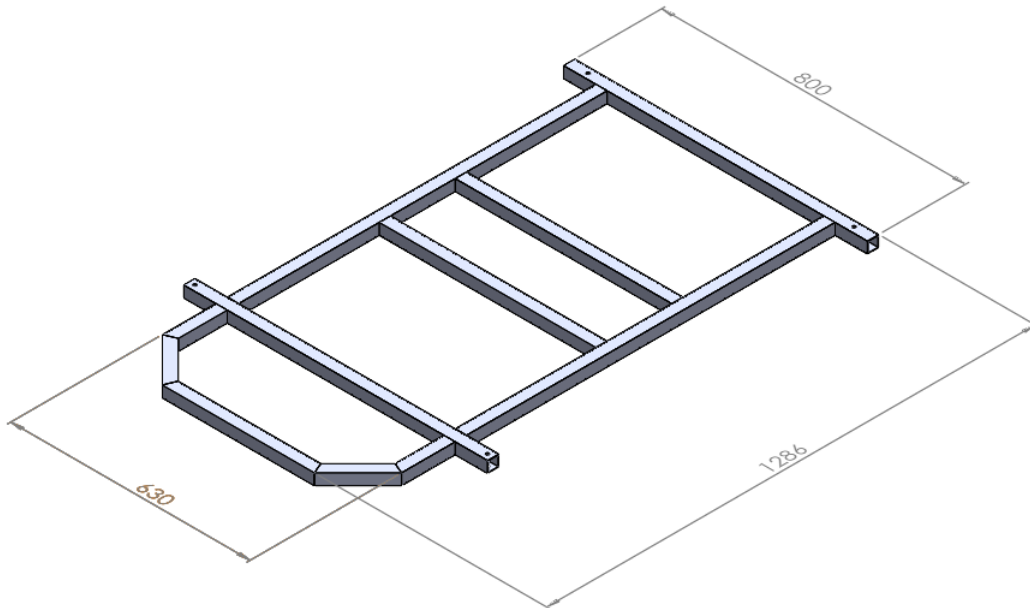


Figura 3.19: Versão inicial do chassi (medidas em mm)

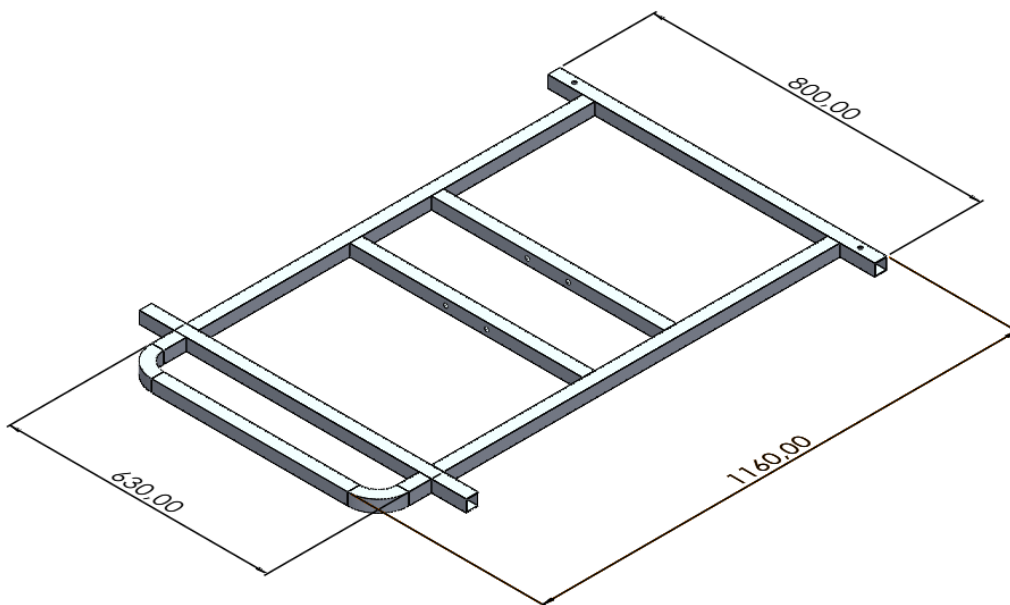


Figura 3.20: Versão final do chassi (medidas em mm)

As duas rodas traseiras são montadas individualmente no chassi e o afastamento entre ambas pode ser ajustável. Inicialmente, tal como se vê na Figura 3.21, a roda ligava-se a um primeiro veio roscado na parte frontal e incorporava um casquilho para diminuir o atrito e o desgaste. A ligação ao chassi era feita através de um tubo extensor num dos cinco furos existentes, afastados entre si 25 mm. As ligações aparafusadas de todos estes componentes são feitas através de uma ligação parafuso ISO 4017 - porca ISO 10511. Desta forma o afastamento das rodas traseiras podia variar, de forma simples, de 1022 mm para os 1222 mm.

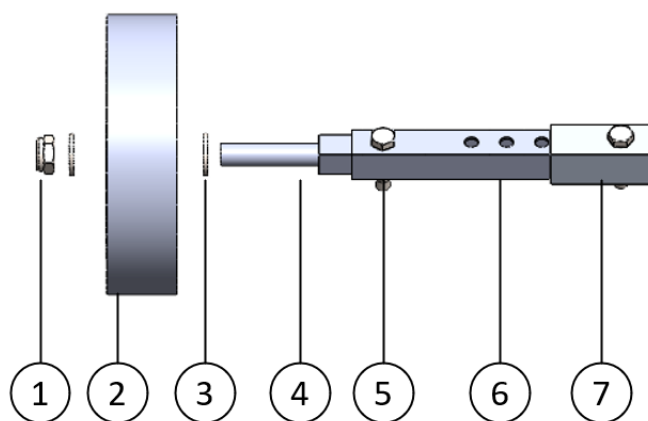


Figura 3.21: Proposta inicial para montagem da roda traseira: 1 - Porca M16; 2 - Roda; 3 - Anilha; 4 - Veio; 5 - Ligação aparafusada; 6 - Tubo extensor; 7 - Chassi

Pretendia-se adquirir uma roda que incorporasse um casquilho ou um rolamento. Desta forma, as dimensões dos componentes desenvolvidos seriam limitadas pelas dimensões das rodas disponíveis no mercado. Como a solução descrita não se adaptava a nenhuma, optou-se por alterar os componentes que fazem a ligação roda-chassi. Desta forma, a montagem passou a ter menos um componente, no caso o tubo extensor. A alteração da largura de via passa a ser feita diretamente pelo veio de ligação à roda, como se pode ver na Figura 3.22. A roda escolhida tem 200 mm de diâmetro e o furo central tem 20 mm de diâmetro [61], tal como se pode ver no Anexo C. Como se pretende que o veio seja um componente com alta resistência aos esforços, optou-se pelo fabrico de um veio de aço de construção ao carbono da liga AISI 1045, disponível no mercado por exemplo em [62]. Este tipo de material é tipicamente utilizado para componentes de órgãos de máquinas, veios e peças para automóveis.

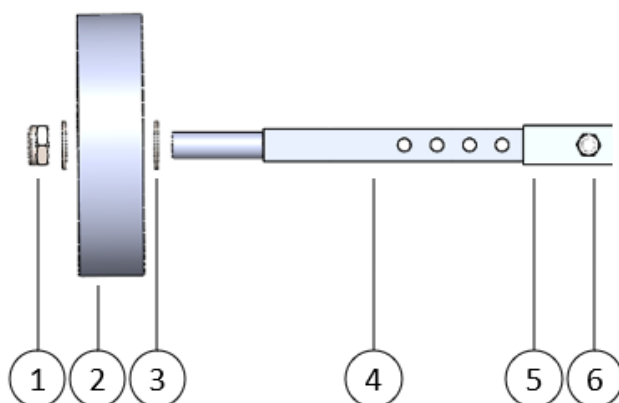


Figura 3.22: Montagem final da roda traseira: 1 - Porca M16; 2 - Roda; 3 - Anilha; 4 - Veio; 5 - Chassi ; 6 - Ligação aparafusada

Tal como as as rodas traseiras, também as frontais são montadas individualmente no chassi. Na Figura 3.23 vê-se como é feita a montagem das rodas frontais. Uma chapa, em formato de U (2), é soldada diretamente no chassi. A essa chapa é aparafusada, com recurso a um parafuso de corpo cilíndrico, uma manga de eixo (4) constituída por um veio, de aço AISI 1045, ao qual é soldado outro roscado que faz a ligação à roda.

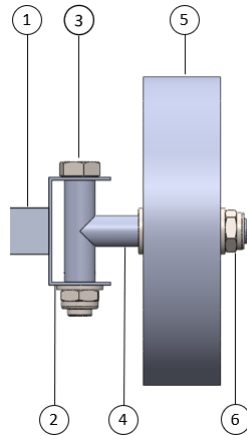


Figura 3.23: Montagem das rodas da frente: 1 - Chassi; 2 - Chapa em U; 3 - Ligação aparafusada; 4 - Manga de eixo ; 5 - Roda ; 6 - Ligação aparafusada

### 3.3 Elementos de ligação

Nesta secção são abordados os diferentes meios de ligação entre os vários componentes do veículo com propulsão à vela a desenvolver.

#### 3.3.1 Ligação vela-chassis

De forma a facilitar a montagem e desmontagem do conjunto mastro-vela, foi pensada uma solução que incorpora um sistema de rolamentos e permite, com uma só operação, montar e desmontar o mastro, proporcionando uma ligação robusta e estável entre o mastro e o chassi. A aplicação de rolamentos permite minimizar o atrito entre os componentes móveis e, conseqüentemente, beneficiar a longevidade da solução, exigindo pouca manutenção.

#### Proposta inicial para a fixação do mastro

De notar que a primeira modelação desta fixação foi realizada para uma dimensão do mastro superior aquela que viria a ser utilizada. Na Figura 3.24 observa-se a proposta inicial para a fixação do mastro.

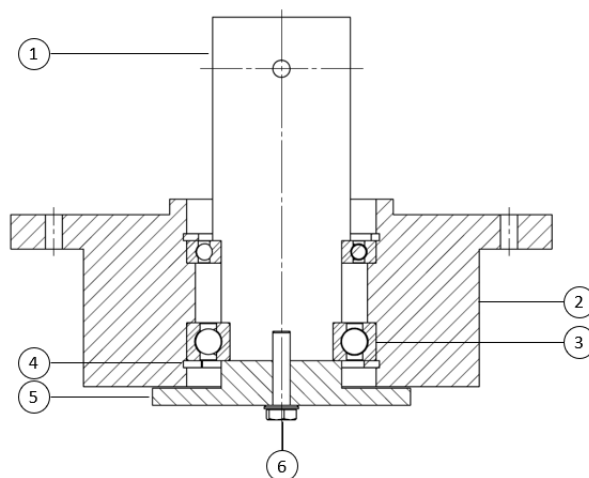


Figura 3.24: Proposta inicial para a fixação do mastro: 1 - Veio; 2 - Caixa de rolamentos; 3 - Rolamento; 4 - Anel elástico; 5 - Tampa; 6 - Ligação aparafusada

Foi modelada uma caixa para um sistema de dois rolamentos rígidos de esfera, SKF 6212. Estes dois rolamentos eram montados na caixa de rolamentos na posição desejada. Para garantir a exata fixação dos rolamentos recorria-se a dois anéis elásticos DIN 472. O veio (1), peça de ligação ao mastro, ajustava-se nos rolamentos e, por fim, era aparafusada uma tampa inferior para impedir a entrada de poeiras na caixa de rolamentos. O material a utilizar nestes componentes é o mesmo tipo de aço usado nos componentes anteriores, ou seja, o AISI 1045. A folga existente entre a caixa e a tampa permitia o movimento de rotação sem atrito.

### Segunda proposta para a fixação do mastro

Uma vez que a precisão necessária para o fabrico da caixa dos rolamentos é elevada e que a mesma pode ser colocada em causa pela complexidade da peça, surgiu uma segunda hipótese, com duas variantes, cuja grande diferença era aplicação de apenas um rolamento SKF 3212. Esta solução pode observar-se na Figura 3.25 e na Figura 3.26.

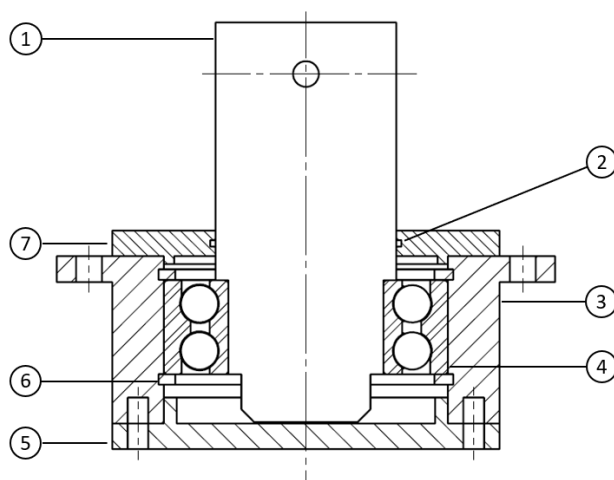


Figura 3.25: Proposta para a fixação do mastro com a tampa aparafusada à caixa de rolamentos: 1 - Veio; 2 - Vedante; 3 - Caixa de rolamentos; 4 - Rolamento; 5 - Tampa inferior; 6 - Anel elástico; 7 - Tampa superior

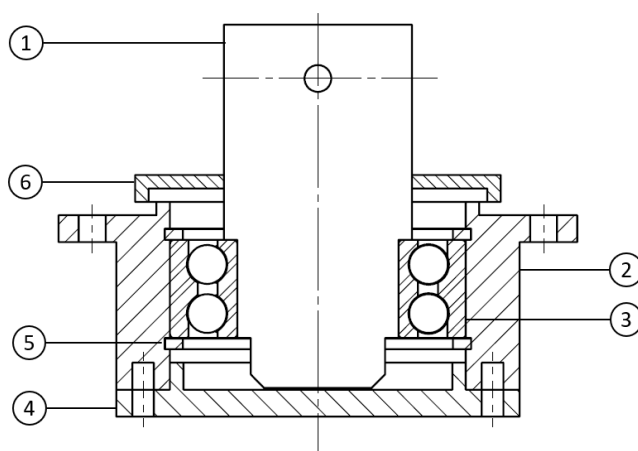


Figura 3.26: Proposta para a fixação do mastro com a tampa soldada ou colada ao veio: 1 - Veio; 2 - Caixa de rolamentos; 3 - Rolamento; 4 - Tampa inferior; 5 - Anel elástico; 6 - Tampa superior

A posição do rolamento era controlada pela montagem de dois anéis elásticos DIN 472. Colocavam-se duas tampas, uma superior que conta com a presença de um vedante, e uma inferior. Estas tampas, tal como na primeira modelação, impediam a entrada de partículas para o interior da caixa e, neste caso, eram aparafusadas diretamente na mesma. Note-se que, para a tampa superior foi ainda colocada a possibilidade de não ser aparafusada na caixa, Figura 3.25, mas sim, através de uma ligação soldada ou adesiva, ser colocada diretamente no veio, Figura 3.26,

### Proposta final para a fixação do mastro

Na solução adotada o rolamento a aplicar é um rolamento SNR FC40570 (Anexo D), tipicamente utilizado em cubos de roda de automóveis. Na Figura 3.27 observa-se a proposta final para a ligação da vela ao chassi.

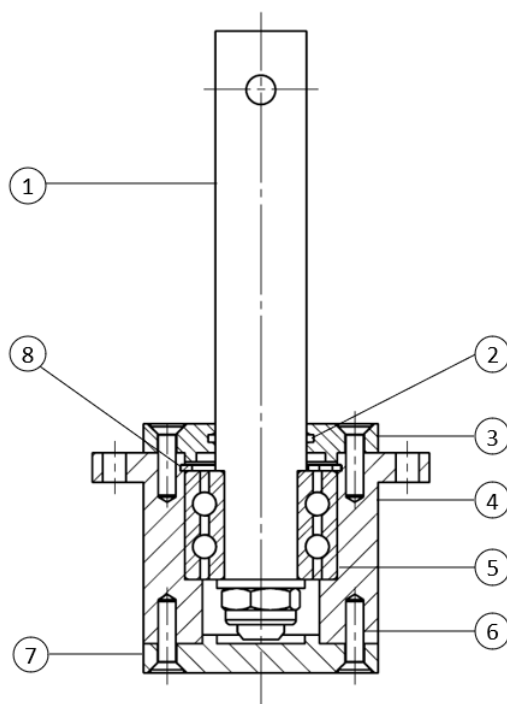


Figura 3.27: Proposta final para a fixação do mastro: 1 - Veio; 2 - Vedante; 3 - Tampa Superior; 4 - Caixa de rolamentos; 5 - Rolamento; 6 - Ligação aparafusada; 7 - Tampa inferior; 8 - Anel elástico

A posição do rolamento é controlada pela própria caixa uma vez que esta tem um ressalto para encosto do anel exterior do rolamento. Esta é produzida no mesmo tipo de aço utilizado anteriormente para os veios. Superiormente o anel exterior é travado por um anel elástico DIN 472. O anel interior encosta superiormente no veio e inferiormente numa ligação anilha ISO 7089 - porca M16 ISO 10511, que aperta diretamente no veio na zona roscada. As duas tampas são montadas, de forma guiada, na caixa e são aparafusadas diretamente à mesma com recurso a parafusos ISO 10642. A tampa superior, tal como referido anteriormente, incorpora um vedante para impossibilitar a entrada de impurezas.

### Fixação ao chassi

O conjunto de fixação do mastro ajusta-se e fixa-se, de forma guiada, numa chapa aparafusada no chassi, tal como observado na Figura 3.28.

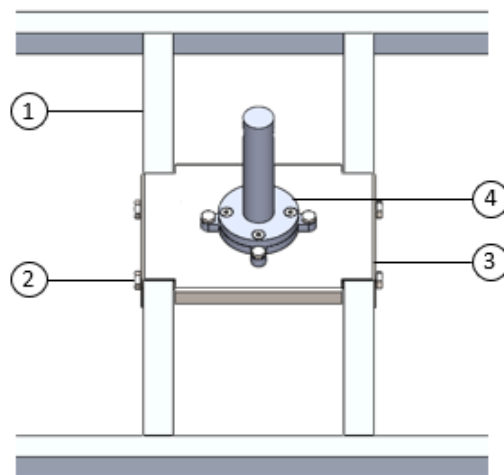


Figura 3.28: Ligação do conjunto de fixação do mastro ao chassi: 1 - Chassi; 2 - Ligação aparafusada; 3 - Chapa de fixação; 4 - Conjunto de fixação do mastro

### Verificação da carga estática desejada

Era importante perceber se o rolamento selecionado permitia suportar os esforços a que iria estar sujeito. Note-se que o rolamento selecionado não apresenta grandes informações catalogadas pelo que a verificação foi feita para um rolamento SKF 6205, uma vez que apresenta os mesmos diâmetros interior e exterior mas uma largura inferior (ver Tabela 3.6), pelo que garantir segurança para estas dimensões implica garantir segurança para o rolamento escolhido. Para a verificação das cargas suportadas adotou-se o processo descrito pelo fabricante de rolamentos SKF [63, 64].

Tabela 3.6: Dimensões principais e condições de carga do rolamento SKF 6205 [63]

Dimensões principais			Classificações de carga básica	
$d$	$D$	$B$	Dinâmica, $C$	Estática, $C_0$
(mm)	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)
25	52	15	14,8	7,8

A primeira verificação a ser efetuada foi a da carga estática desejada. O rolamento pode estar sujeito a forças radiais ou forças axiais e ainda às duas combinadas. Assim, considere-se  $F_{ax}$  e  $F_r$  como os módulos da forças axial e radial, respetivamente, e  $F_e$  como o módulo da força equivalente, resultado das duas anteriores combinadas [64]. Na equação (3.46) observam-se as duas relações existentes entre as três forças consideradas, tal como explicado em [64],

$$\begin{cases} F_e/(VF_r) = 1 & , \text{ quando } F_{ax}/(VF_r) \leq e \\ F_e/(VF_r) = X + Y F_{ax}/VF_r & , \text{ quando } F_{ax}/(VF_r) > e \end{cases} \quad (3.46)$$

em que  $V$  é o fator de rotação e é definido tal que  $V = 1$  quando o anel interior roda ou  $V = 1,2$  quando o anel exterior roda,  $e$  é o valor de  $F_{ax}/(VF_r)$  a partir do qual  $F_e/(VF_r)$  e  $F_{ax}/VF_r$  tem um ajuste linear, e  $X$  e  $Y$  são os parâmetros desse ajuste. Para aplicar as considerações anteriores recorre-se à Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Lista de valores representativos de  $X_1$ ,  $Y_1$ ,  $X_2$ , e  $Y_2$  como função de  $e$ , que é função de  $F_{ax}/C_0$  (Tabela retirada do subcapítulo 11 de [64]); \* usar o valor 0,014 se  $F_{ax}/C_0 < 0,014$

$F_{ax}/C_0$	$e$	$F_{ax}/(VF_r) \leq e$		$F_{ax}/(VF_r) > e$	
		$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
0,014*	0,19	1,00	0	0,56	2,3
0,021	0,21	1,00	0	0,56	2,15
0,028	0,22	1,00	0	0,56	1,99
0,042	0,24	1,00	0	0,56	1,85
0,056	0,26	1,00	0	0,56	1,71
0,070	0,27	1,00	0	0,56	1,63
0,084	0,28	1,00	0	0,56	1,55
0,110	0,30	1,00	0	0,56	1,45
0,17	0,34	1,00	0	0,56	1,31
0,28	0,38	1,00	0	0,56	1,15
0,42	0,42	1,00	0	0,56	1,04
0,56	0,44	1,00	0	0,56	1,00

Desta forma, o primeiro passo era determinar a razão entre  $F_{ax}$  e  $C_0$ , equação (3.47). Considerando que a força axial corresponde ao peso do conjunto vela mastro, cuja massa é aproximadamente igual a 5,0 kg, obteve-se:

$$\frac{F_{ax}}{C_0} = \frac{49}{7,8 \times 10^3} = 6,3 \times 10^{-3} \quad (3.47)$$

como o valor obtido é inferior a 0,014 então considera-se o valor 0,014 e, desta forma,  $e = 0,19$ .

O próximo passo foi determinar a razão presente na equação (3.48), considerando-se o  $F_{ax}$  determinado anteriormente,  $F_r$  igual à força de sustentação utilizada para o dimensionamento do mastro e  $V = 1$ .

$$\frac{F_{ax}}{VF_r} = \frac{49}{73,0} = 0,67 > e \quad (3.48)$$

Desta forma, é possível determinar a força equivalente, através da segunda expressão da equação (3.46).

$$\frac{F_e}{73,0} = 0,56 + 2,30 \frac{49}{73,0} \Leftrightarrow F_e = 154 \text{ N} < 7,8 \text{ kN}$$

Confirmado que o rolamento selecionado permite suportar as cargas estáticas impostas faltava verificar o comportamento do mesmo quanto às cargas dinâmicas. Contudo, uma vez que a velocidade de rotação esperada para o mastro é muito reduzida, considera-se que o comportamento real é próximo de um comportamento estático, pelo que se considera não ser necessária essa verificação.

### Verificação à pressão de contacto

O mastro ajusta no veio de forma guiada e é aparafusado ao mesmo para garantir a sua posição, rodando solidário com este. Assim, é também importante perceber se esta ligação é fiável para a solução desenvolvida. Para isso, tomando algumas considerações, optou-se por realizar uma verificação à pressão de contacto existente entre o mastro e o veio. Na Figura 3.29 encontra-se o esquema desta ligação, evidenciando a azul a zona a analisar.

Note-se que para simplificar o estudo assumiu-se que a área de contacto a analisar seria metade do perímetro do mastro com diâmetro igual a 35 mm e uma altura de 1 mm. Desta análise resulta o diagrama de corpo livre presente na Figura 3.30.

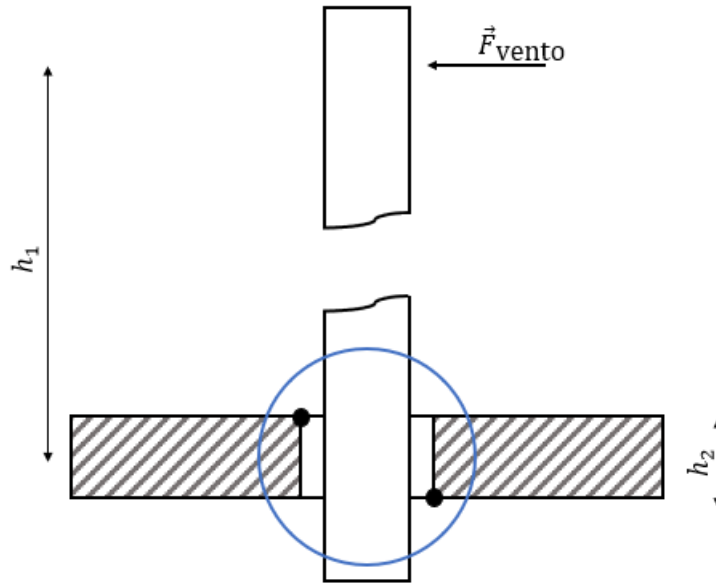


Figura 3.29: Esquema da ligação entre o veio e o mastro

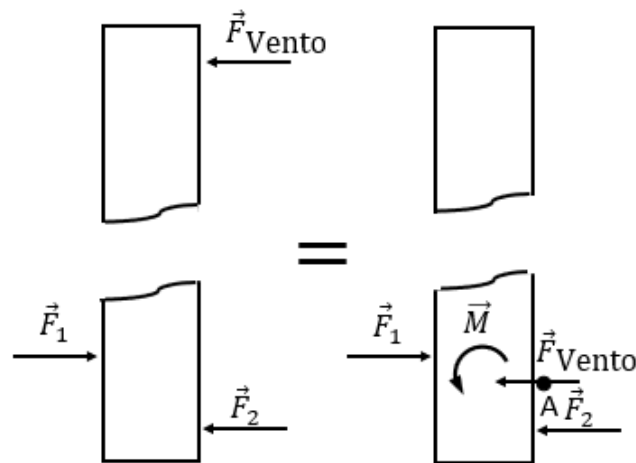


Figura 3.30: Diagrama de corpo livre do mastro para análise da pressão de contacto

Desta forma pode-se obter as relações presentes no sistema de equações (3.49):

$$\begin{cases} F_{\text{vento}} = F_1 - F_2 \\ \sum M_A = 0 \Leftrightarrow M = (F_1 + F_2) \times \frac{h_2}{2} \end{cases} \quad (3.49)$$

Em que  $M = F_{\text{vento}} \times h_1$  representa o momento produzido pela força do vento,  $F_1$  e  $F_2$  as forças de contacto e  $F_{\text{vento}} = 73,0 \text{ N}$  (Subsecção 3.1.6) a força produzida pelo vento na vela.

Sabendo a altura do centro de pressão de vela, 1000 mm, e arbitrando, aquando da modelação,  $h_2 = 70 \text{ mm}$  obteve-se  $h_1 = 965 \text{ mm}$ ,  $F_1 = 1043 \text{ N}$  e  $F_2 = 970 \text{ N}$ .

Utilizando a força de maior amplitude, neste caso  $F_1$ , determinou-se a pressão média de contacto:

$$P = \frac{F_1}{A} = \frac{F_1}{\pi r \times 1} = 18,9 \text{ MPa} \quad (3.50)$$

Por fim, comparou-se a tensão admissível com a pressão média de contacto:

$$P \leq \sigma_{adm} \Leftrightarrow P \leq \frac{\sigma_{ced}}{cs} \quad (3.51)$$

Desta forma, sabendo que  $\sigma_{ced} = 275$  MPa, conclui-se que a solução adotada permite suportar os esforços instalados com um coeficiente de segurança de 14,6.

### 3.3.2 Ligação vela-cauda e princípio de funcionamento

Nos veículos à vela autónomos a estratégia de navegação é controlada principalmente pelo ângulo de ataque da vela. Este controlo depende da instalação da vela no veículo, geralmente feita de duas formas: fixada diretamente ao mastro, movendo-se com a rotação do mesmo, ou girando livremente em torno deste.

Para facilitar o controlo da vela e reduzir o consumo de energia, uma das soluções mais utilizada é a aplicação de uma cauda na traseira da vela, ligada à mesma por via de articulações. Esta superfície auxiliar tem o objetivo de, simultaneamente, criar uma sustentação adicional e auxiliar a vela principal na obtenção da sustentação máxima. Para que o veículo se desloque a cauda tem de ser rodada de forma a fazer um ângulo de ataque e consequentemente promover uma força de sustentação. Este movimento gera um momento em torno do mastro, promovendo o movimento de rotação do conjunto mastro-vela, no sentido contrário até que se atinja o equilíbrio entre a vela e a cauda. Assim, origina-se um ângulo de ataque positivo em relação ao vento aparente, promovendo o efeito de sustentação e consequentemente propulsão do veículo. Quando o vento muda de direção a cauda e a vela mudam também até atingirem nova posição de equilíbrio [50] [59], processo ilustrado na Figura 3.31. Neste caso, foi definido que a vela fica “presa” ao mastro e o controlo do ângulo de ataque é garantido com a rotação do mastro, que é feita de forma livre.

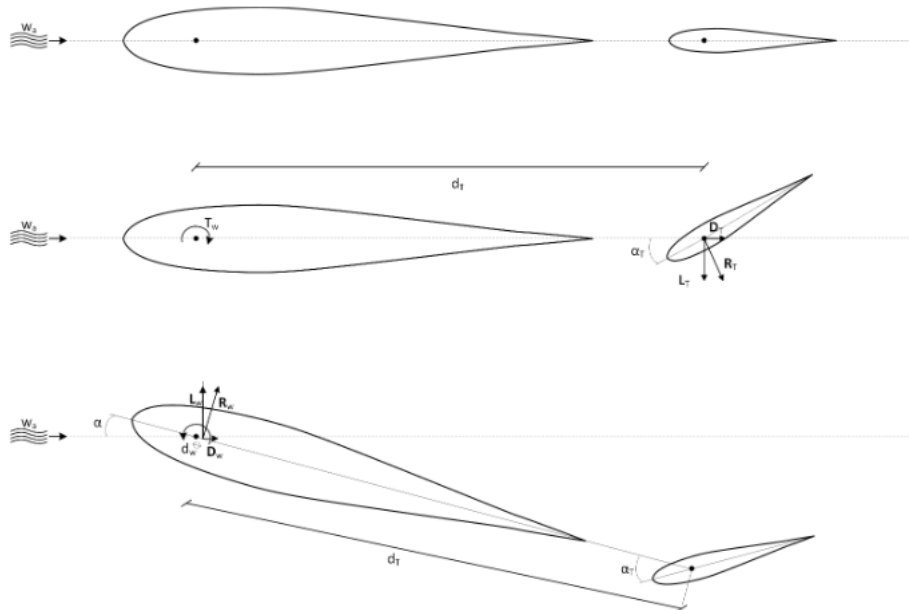


Figura 3.31: Forças e momentos existentes no controlo de uma vela [50]

#### Proposta inicial para a fixação da cauda

Para a fixação da cauda à vela foram pensadas duas soluções distintas. Na primeira, duas das costelas da vela eram diferentes das restantes, nas extremidades, e permitiam a ligação ao mastro da cauda. No entanto estas costelas não impediam o seu movimento vertical. Para impedir esse movimento recorreu-se então a uma chapa de fixação que era aparafusada diretamente nas costelas, apresentada na Figura 3.32.

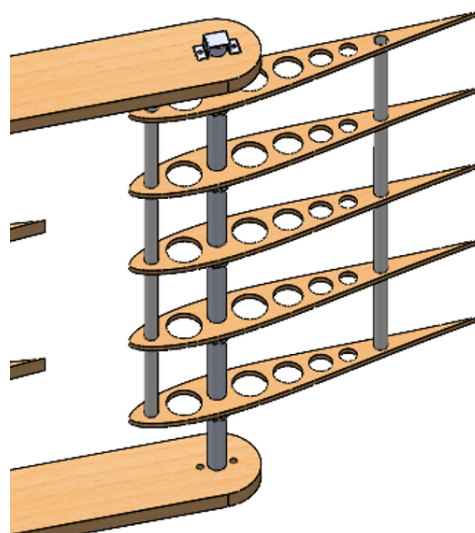


Figura 3.32: Proposta inicial da fixação da cauda

### Proposta final para a fixação da cauda

Na segunda abordagem, que se mostra na Figura 3.33, esta fixação passou a ser feita através de um conjunto de duas peças, obtidas por fabricação aditiva, em que uma está colada diretamente à cauda e a outra faz a ligação com um tubo que fixa, com recurso a abraçadeiras, ao mastro. Quando comparada com a primeira solução, esta última apresenta a grande vantagem de permitir uma construção mais cuidada da vela principal, obtendo uma maior precisão do perfil escolhido e, em simultâneo, alterar o afastamento da cauda à vela. Nesta solução a posição vertical da cauda pode ser alterada, uma vez que os três tubos horizontais do mastro (Figura 3.16) permitem duas posições diferentes para a cauda. Desta forma será possível realizar diferentes estudos para verificar o efeito que essa posição terá no movimento do veículo.

Com a aplicação da cauda espera-se obter uma redução da energia necessária para provocar a rotação da vela e, conseqüentemente, mover o veículo.

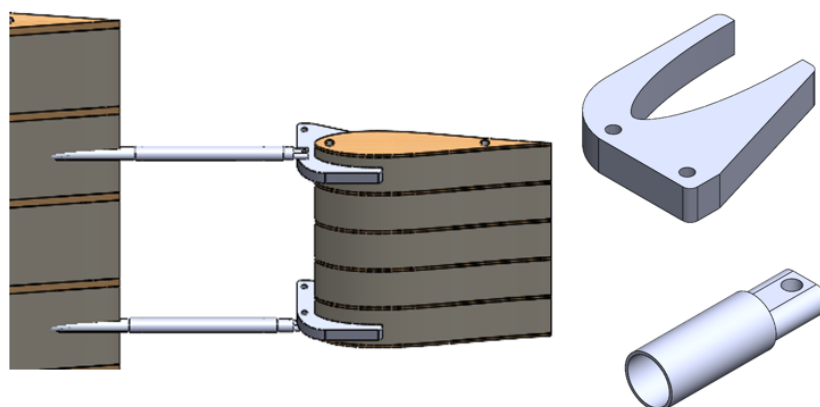


Figura 3.33: Proposta final da fixação da cauda (à esquerda); à direita, em cima, a peça que é colada à cauda e em baixo a peça de ligação com o tubo

### 3.3.3 Ligação da manga de eixo frontal ao servomotor

O controlo da direção do veículo é feito com recurso a um servomotor. Para a ligação da manga de eixo ao servomotor foram pensadas duas soluções.

Na primeira solução, observada na Figura 3.34, são necessárias duas chapas de comprimentos diferentes. A chapa de menor comprimento é soldada à manga de eixo, já a de maior é aparafusada num lado à primeira chapa referida e no outro ao servomotor. Desta forma, o movimento de rotação do servomotor é transmitido para as duas rodas.

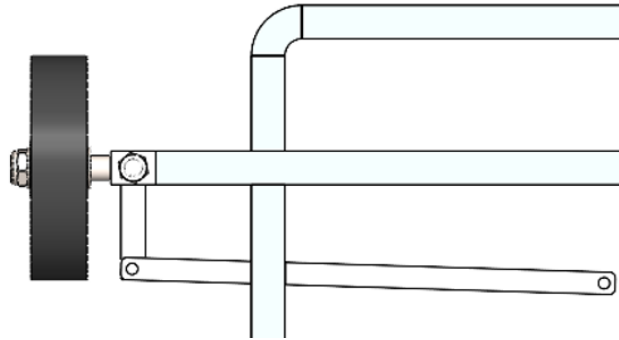


Figura 3.34: Primeira solução proposta para o sistema de direção

Na segunda solução, presente na Figura 3.35, a chapa de maior comprimento é substituída por um tirante, roscado nas extremidades e duas rótulas. Esta solução permite alterar a convergência ou divergência bem como colmatar possíveis imperfeições aliadas ao processo de construção.

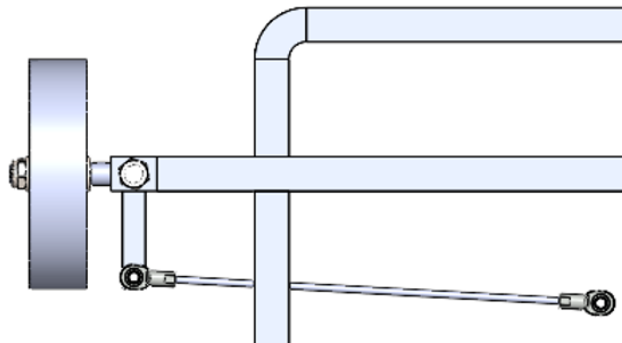


Figura 3.35: Segunda solução proposta para o sistema de direção

A primeira solução será a aplicada no veículo pela simplicidade de fabrico. Contudo, caso haja necessidade a segunda solução poderá ser aplicada posteriormente. Por simplicidade de construção todos os ângulos da direção são nulos.

Se aplicada a segunda opção será importante perceber qual a influência que esta poderá ter nos ângulos da direção. Desta forma, determinou-se previamente qual o número de voltas necessário realizar numa rótula para que o ângulo de convergência ou divergência sofra uma variação de  $1^\circ$ . Na Figura 3.36 vê-se um esquema representativo da montagem de uma das rodas do veículo. A azul observa-se a roda numa posição em que o ângulo entre a linha de eixo da roda e a linha de eixo do veículo é nula, a preto observa-se a alteração desse mesmo ângulo, neste caso de forma convergente.

Iniciou-se pela determinação da hipotenusa do triângulo retângulo, Equação (3.52):

$$h = \sqrt{421^2 + 140^2} = 443,67 \text{ mm} \quad (3.52)$$

Assumiu-se que, para variações angulares pequenas, a medida  $y$  manter-se-ia igual a 90 mm. Sendo  $x$  a medida que representa o ganho/volta e sabendo que este corresponde ao passo da rosca então, no caso do passo ser 1 mm, o ganho/volta seria também 1 mm. Assumindo  $\alpha = 1^\circ$  determinou-se o valor de  $x$  através de relações trigonométricas, Equação (3.53):

$$\sin \alpha = \frac{x}{140} \Leftrightarrow x = 2,44 \text{ mm} \quad (3.53)$$

Desta forma, o número de voltas,  $N$ , a realizar para que esta situação se verifique é calculado a partir da Equação (3.54)

$$N = \frac{x}{\text{ganho/volta}} = \frac{2,44}{1} = 2,44 \text{ voltas} \quad (3.54)$$

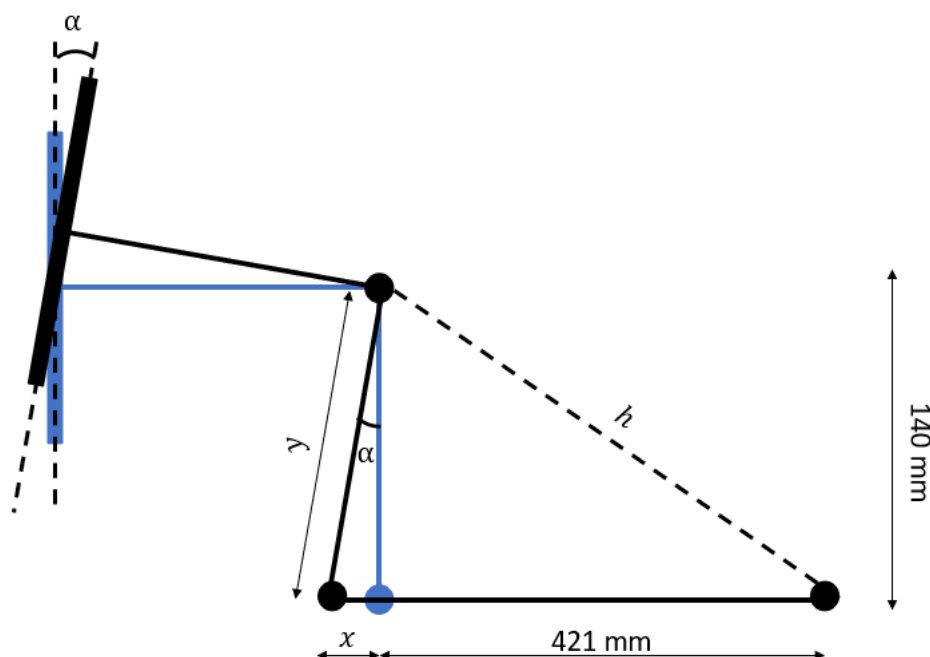


Figura 3.36: Esquema representativo da geometria da direção em duas posições diferentes

### 3.4 Conclusão

Como se pretende projetar um veículo movido com a força do vento com alguma eficiência energética aliado a uma simplicidade de fabrico propõe-se um veículo semelhante ao *Sail Car* [28]. Na Figura 3.37 observa-se a proposta final para o veículo com propulsão por vela rígida.

A solução proposta para o veículo recorre uma vela rígida, de movimento rotacional livre, com um perfil alar simétrico, Eppler E169, e incorpora uma cauda que permite reduzir a energia necessária para o seu movimento. É constituída por um mastro de alumínio, costelas de contraplacado preenchidas entre si com espuma de poliuretano, garantindo assim uma estrutura leve e estável com 1 m de corda, 1,5 m de envergadura e uma massa de aproximadamente 5,0 kg.

De forma a promover um chassi com massa reduzida e robusto, propõe-se uma estrutura de alumínio de tubos de secção quadrada que permite assim a simplicidade de fabrico. Este tem uma largura máxima de 800 mm, e um comprimento de 1160 mm, esperando-se uma massa total de aproximadamente 4,2 kg.

O veículo possui quatro rodas de borracha, incorporadas com rolamento. As traseiras são ligadas ao chassi com recurso a um tubo extensor que permite variar a largura de via desde 1022 mm até 1222 mm. As frontais possuem um mecanismo de direção formado por dois tirantes e controlado por um servomotor.

Por fim, a ligação entre a vela e o chassi recorre a um sistema de rolamentos, tipicamente utilizado em automóveis, garantindo uma montagem simples e robusta, beneficiando do

baixo atrito entre componentes para uma maior durabilidade da solução. Todos os desenhos de fabrico necessários para a sua construção podem ser consultados no Anexo E.

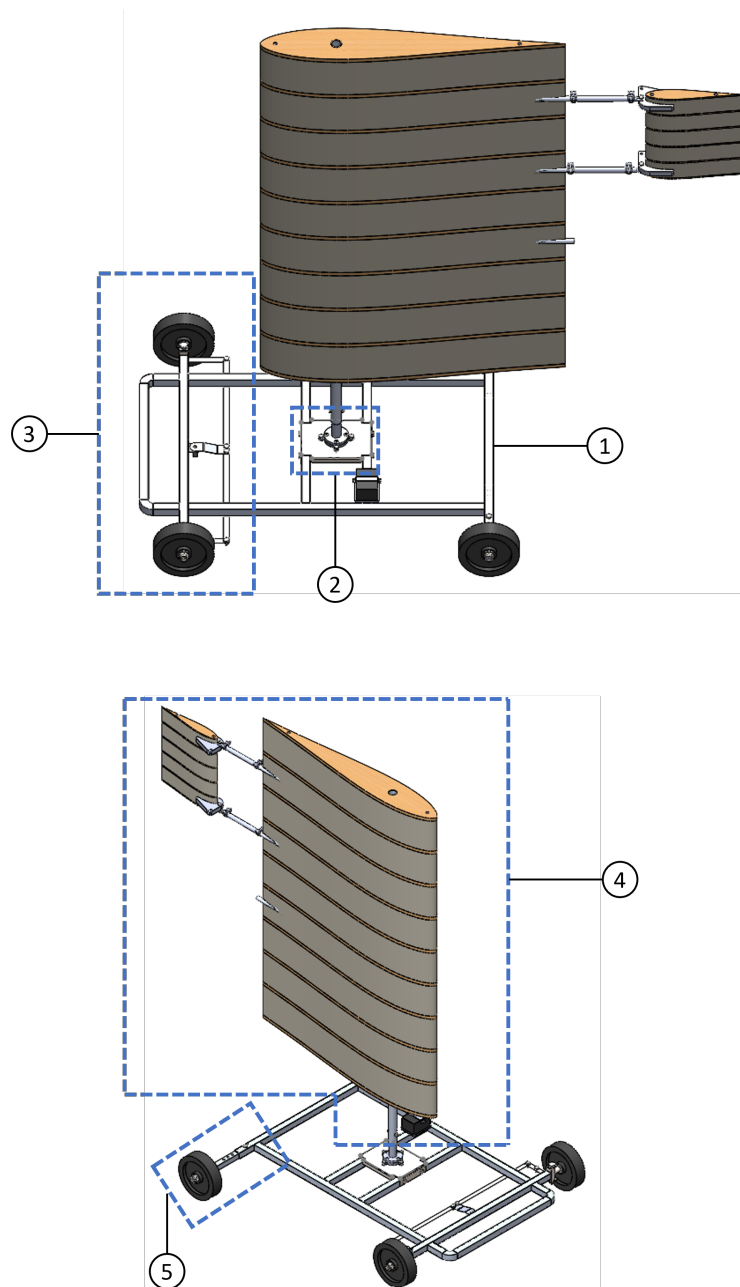


Figura 3.37: Proposta final para o veículo de propulsão por vela rígida: 1 - Chassi; 2 - Subconjunto de fixação do mastro; 3 - Sistema de direção; 4 - Conjunto da vela e cauda; 5 - Subconjunto do eixo traseiro



## 4 Conclusão

Neste capítulo apresentam-se as conclusões retiradas ao longo do trabalho efetuado bem como possíveis melhorias e futuros trabalhos a implementar.

### 4.1 Conclusão

Este trabalho aborda o projeto de um veículo com propulsão por vela rígida. Para isso, deu-se particular importância aos diferentes tipos de soluções existentes, aos perfis alares mais utilizados e aos diferentes materiais e processo de fabrico para a obtenção de uma vela rígida, um chassi e os diferentes componentes do sistema de direção.

Impondo as condições de velocidade real do vento e recorrendo aos coeficientes aerodinâmicos tridimensionais e ao conceito de triângulo das velocidades, estimaram-se as intensidades da velocidades do veículo e aparente. Determinaram-se ainda as forças aerodinâmicas máximas e de estabilidade, concluindo-se que uma força de sustentação de 73,0 N seria utilizada para proceder ao dimensionamento do mastro e restantes componentes.

Analisadas as possíveis soluções para o mastro, verificou-se que o tubo de alumínio AW 6063, com  $\varnothing_{ext}$  35 mm e parede de 2 mm, permite suportar a tensão axial máxima instalada, 75 MPa, com um coeficiente de segurança igual a 3.

Desenvolveu-se uma vela composta por costelas de contraplacado de madeira, intercaladas por espuma de poliuretano, com uma corda de 1 m e uma envergadura de 1,5 m, garantindo uma vela com 1.5 m<sup>2</sup> de área. O perfil alar escolhido, Eppler E169, permite, em simultâneo, obter uma relação  $C_L/C_D$  e um  $C_{l,max}$  elevados, bem como garantir uma espessura das costelas suficiente para promover a segurança e estabilidade da vela. As costelas interiores apresentam cortes de material de forma a produzir uma redução da massa da vela. Por fim, foi aplicada uma cauda que permite, em simultâneo, facilitar o controlo da vela e reduzir o consumo de energia.

O chassi é composto por tubos quadrados, do mesmo material que o mastro, com 30 mm de dimensão exterior e 2 mm de espessura. As suas dimensões máximas, 1160 mm de comprimento e 800 mm de largura, garantem facilidade de transporte. São utilizadas ligações aparafusadas para a montagem das quatro rodas, de 200 mm de diâmetro, possibilitando uma montagem simples e ainda o aumento da largura de via das rodas tra-seiras. Este aumento pode ser interpretado como um aumento de estabilidade do veículo e ainda como uma forma de estudar ou analisar diferentes tipos de condições de operação do mesmo.

Projetou-se a ligação entre a vela e o mastro baseada num sistema de rolamentos, o que permite a conexão entre estes dois sistemas somente através de uma ligação aparafusada, garantindo uma montagem e desmontagem fácil. Verificou-se que a força equivalente,  $F_e = 154$  N, é bastante inferior às condições de carga estática do rolamento a utilizar. Verificou-se ainda que a solução para a ligação entre o veio e o mastro permitia suportar a pressão média de contacto com um coeficiente de segurança de 14,6.

O sistema de direção projetado tem por base uma ligação por tirantes, facilitando a sua construção. Se necessário, foi ainda pensada a utilização de rótulas de forma a corrigir possíveis imperfeições de fabrico ou a alterar o ângulo de convergência ou divergência.

O desenvolvimento desta dissertação contribuiu para a elaboração do projeto de um veículo com propulsão por vela rígida de rotação livre e com auxílio de uma cauda, com quatro rodas, duas das quais direcionais. As dimensões apresentadas bem como as formas de montagem dos diferentes componentes garantem um modelo com facilidade de transporte e peso reduzido, aproximadamente igual a 9,2 kg, respeitando os objetivos propostos no Capítulo 1 e os pressupostos iniciais do Capítulo 3.

## 4.2 Trabalhos futuros

Numa perspectiva de evolução deste projeto com vista à sua otimização, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Realizar uma análise mais detalhada sobre o perfil alar e as medidas aplicadas na vela rígida e na cauda, ou seja, submeter o conjunto vela-cauda a análises computacionais ou a túneis de vento o que permitirá concluir com maior precisão se é uma escolha adequada para o veículo projetado;
- Incluir o efeito das forças instaladas na cauda e considerar a existência de rajadas de vento na análise da estabilidade do veículo.
- Efetuar uma análise de custos sobre os materiais definidos no projeto o que permitirá comparar com outras soluções existentes no mercado de forma a otimizar os custos para a construção do veículo;
- Sujeitar o veículo projetado, nomeadamente o chassis e componentes como por exemplo a chapa de fixação do conjunto de fixação do mastro, a análises computacionais com base no método dos elementos finitos, o que permitirá obter uma otimização do peso antes da construção e verificar o comportamento estrutural;
- Projetar a parte autónoma do veículo e com isso analisar quais as alterações que serão necessárias efetuar na parte mecânica do mesmo;
- Efetuar a construção e a avaliação da versão real do veículo com propulsão por vela rígida projetado.

## Referências

- [1] A. Friebe and F. Haug, “Robotic sailing 2015,” in *Proceedings of the 8th International Robotic Sailing Conference*. Springer International Publishing, 2016, pp. 1–12.
- [2] S. Xie, J. Chen, H. Li, J. Luo, H. Pu, and Y. Peng, “The research on wing sail of a land-yacht robot,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, pp. 1–19, novembro 2015.
- [3] L. Balkanyi, M. Bur, L. Burke, K. Bury, C. Anthony, and J. Dankanich, “Niac phase 1 final report: Venus landsailer zephyr,” NASA Innovative Advanced Concepts, Tech. Rep., 2014.
- [4] M. F. Silva, A. Friebe, B. Malheiro, P. Guedes, P. Ferreira, and M. Waller, “Rigid wing sailboats: A state of the art survey,” *Ocean Engineering*, vol. 187, setembro 2019.
- [5] M. Neal, C. Sauzé, and B. Thomas, “Technologies for autonomous sailing: Wings and wind sensors,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Tech. Rep., 2009.
- [6] B. Heibing and E. Metin, *Chassis Handbook*, 1st ed., E. Schmitt and E. Lange, Eds. Vieweg + Teubner Verlag, 2011.
- [7] A. Kumar and V. Deepanjali, “Design and analysis of automobile chassis,” *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, vol. 5, pp. 187–196, 2016.
- [8] R. Patel, K. Gawande, and D. Morabiya, “Design and analysis of chassis frame of tata 2516tc,” *International Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 2, pp. 115–119, 2014.
- [9] G. Genta and L. Morello, *The Automotive Chassis*, 1st ed. Springer, 2009, vol. 1.
- [10] M. Chandra, S. Sreenivasulu, and S. Hussain, “Modeling and structural analysis of heavy vehicle chassis made of polymeric composite material by three different cross sections,” *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 2, pp. 2594–2600, 2012.
- [11] P. Silva, “Mecânica de Veículos 1 - Engenharia Mecânica Automóvel,” 2019, Instituto Superior Engenharia Porto.
- [12] C. S. Baker, “FoEs Formula SAE-A Space Frame Chassis Design,” University of Southern Queensland Faculty of Engineering & Surveying, Tech. Rep., outubro 2004.
- [13] A. Kale, “Design of formula student race car chassis,” Hacettepe University, Tech. Rep., junho 2016.
- [14] G. Szcześniak, P. Nogowczyk, and R. Burdzik, “Some basic tips in vehicle chassis and frame design,” *Journal of Measurements in Engineering*, vol. 2, pp. 208–214, 2014.
- [15] W. F. Milliken and D. L. Milliken, *Race Car Vehicle Dynamics*, 1st ed. Society of Automotive Engineers, 1995.
- [16] V. Patel and R. Patel, “Structural analysis of a ladder chassis frame,” in *A National Conference on Advances in Mechanical Engineering*, vol. 2012, 2012.

## Referências

- [17] Z. Chi, “Thermal performance analysis and geometrical optimization of automotive brake rotors,” Master’s thesis, University of Ontario Institute of Technology, julho 2008.
- [18] V. Muralidharan, A. Balakrishnan, V. Vardhan, N. Meena, and Y. Kumar, “Design of mechanically actuated aerodynamic braking system on a formula student race car,” *Journal of The Institution of Engineers India: Series C*, vol. 99, pp. 247–253, abril 2018.
- [19] M. Anwar, A. Shalk, and M. Sohail, “Steering system of go-kart,” *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, vol. 4, pp. 21–24, maio 2017.
- [20] M. Harrer and P. Pfeffer, *Steering handbook*, 1st ed., M. Harrer and P. Pfeffer, Eds. Springer International Publishing, 2016.
- [21] D. Bastos, “Introdução à engenharia automóvel - 4<sup>o</sup> módulo Parte 2 Direção,” 2018, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [22] R. N. Jazar, *Vehicle Dynamics: Theory and Application*, 1st ed. Springer Science+Business Media, 2008.
- [23] L. Ribeiro, “Motores de combustão interna,” 2017, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [24] Y. Dong, X. Ding, Z. Li, L. Zhang, H. Liu, N. Ding, Z. Sun, and H. Qian, “Wing sail land-yacht modeling and system verification,” in *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. IEEE, 2019, pp. 1350–1355.
- [25] G. Reina and M. Foglia, “Modelling and handling dynamics of a wind-driven vehicle,” *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 57, pp. 697–720, maio 2019.
- [26] P. A. Mirzaei and M. Rad, “Toward design and fabrication of wind-driven vehicles: Procedure to optimize the threshold of driving forces,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, pp. 50–61, novembro 2013.
- [27] J. C. Alves and N. A. Cruz, “Robotic sailing 2016,” in *Proceedings of the 9th International Robotic Sailing Conference*. Springer International Publishing, 2017.
- [28] A. Zhu, C. Beer, K. Juhandi, M. Orlov, N.-L. Bacau, and L. Kádár, “Sail car aka team infinity -european project semester,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Tech. Rep., junho 2019.
- [29] C. Sauzé and M. Neal, “An autonomous sailing robot for ocean observation,” in *TAROS-06*, setembro 2006, pp. 190–197.
- [30] M. Denny, *Float your boat!: the evolution and science of sailing*. JHU Press, 2008.
- [31] A. Blakeley, R. Flay, and P. Richards, “Design and optimisation of multi-element wing sails for multihull yachts,” in *18th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston*, 2012.
- [32] A. Schlaefer and Blaurock, “Robotic sailing 2011,” in *Proceedings of the 4th International Robotic Sailing Conference*. Springer International Publishing, 2011.
- [33] R. Eriksson and A. Friebe, “Challenges for autonomous sailing robots,” Aland University of Applied Sciences.
- [34] “European comission,” junho 2024, Access: 13/06/2024. [Online]. Available: [\protect\@normalcr\relaxhttps://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/new-wind-powered-cargo-ship-sets-sail-2023-08-22\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/news-events/news/new-wind-powered-cargo-ship-sets-sail-2023-08-22_en)

- [35] A. Domínguez-Brito, B. Valle-Fernández, J. Cabrera-Gamez, A. R. de Miguel, and J. C. Garcia, “A-tirma g2: An oceanic autonomous sailboat,” in *Robotic Sailing 2015*. Springer International Publishing, 2016, pp. 3–13.
- [36] V. Tinoco, “Modelling and simulation of a wing sail land yacht,” Master’s thesis, Instituto Superior Engenharia do Porto, outubro 2020.
- [37] S. Xie, K. Feng, Y. Peng, J. Luo, and J. Chen, “Design and analysis of an autonomous controlled four wheeled land yacht,” in *International Conference on Information and Automation*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., outubro 2014, pp. 773–778.
- [38] “Fisly,” 2023, Access: 07/01/2023. [Online]. Available: <https://www.fisly.org/>
- [39] “Nalsa,” 2023, Access: 07/01/2023. [Online]. Available: <https://www.nalsa.org/>
- [40] “Blokart - fun, fast, compact,” 2023, Access: 07/01/2023. [Online]. Available: <https://www.blokart.com/>
- [41] “Windroller,” 2023, Access: 07/01/2023. [Online]. Available: <http://www.windroller.pt/>
- [42] “Seagull - chars à voile,” 2023, Access: 07/01/2023. [Online]. Available: <https://seagull.fr/>
- [43] “Whike,” 2023, Access: 07/01/2023. [Online]. Available: <http://whike.com/en/>
- [44] “Ecotricity,” 2023, Access: 07/01/2023. [Online]. Available: <https://www.ecotricity.co.uk/our-news/2009/the-greenbird-comes-home>
- [45] A. Zhu, C. Beer, K. Juhandi, M. Orlov, N.-L. Bacau, L. Kádár, A. J. Duarte, B. Malheiro, J. Justo, M. F. Silva, M. C. Ribeiro, P. D. Ferreira, and P. Guedes, “Sail car - an eps@isep 2019 project,” in *2020 IEEE Global Engineering Education Conference*, 2020, pp. 487–492.
- [46] G. A. Landis, S. R. Oleson, and D. Grantier, “Zephyr: A landsailing rover for venus,” *65th International Astronautical Congress*, pp. 1009–1023, 2014.
- [47] J. Jouffroy, “A control strategy for steering an autonomous surface sailing vehicle in a tacking maneuver,” in *Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, outubro 2009, pp. 2391–2396.
- [48] J. Chen, Z. Ye, R. Yang, G. Cai, and J. Li, “Design and control of multiple wing-sail land yacht robot,” in *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2018, pp. 1800–1805.
- [49] C. Santos and F. Castro, “Sebenta de mecânica dos fluidos,” fevereiro 2020, Instituto Superior Engenharia Porto.
- [50] M. Silva, B. Malheiro, P. Guedes, and F. Paulo, “Airfoil selection and wingsail design for an autonomous sailboat,” in *Fourth Iberian Robotics Conference*, 2019, pp. 305–316.
- [51] “Airfoil tools,” 2023, Access: 08/02/2024. [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/>
- [52] V. de Brederode, *AERODINÂMICA INCOMPRESSÍVEL FUNDAMENTOS*, 1st ed. IST Press, setembro 2014.
- [53] L. Monteiro, “Projeto e fabrico de um protótipo à escala real de um kart à vela,” Master’s thesis, Instituto Superior Técnico, junho 2016.
- [54] J. Kimball, *Physics of Sailing*, 1st ed. CRC Press, 2009.

## Referências

- [55] L. Macedo, “Mecânica de materiais - flexão aula t16, tp17, tp18 e tp19,” março 2020, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [56] J. Belinha, “Mecânica de materiais - sebenta,” 2020, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- [57] “Poly lanema - plásticos de engenharia e alumínio técnicos,” maio 2024, Access: 04/04/2024. [Online]. Available: <https://www.polylanema.pt/pt/aluminios-tecnicos/>
- [58] “Leroy merlin,” maio 2024, Access: 04/04/2024. [Online]. Available: <https://www.leroymerlin.pt/produtos/madeiras-e-acrilicos/paineis-para-construcao/contraplacado/placa-de-contraplacado-1200x600x15mm-11034282.html>
- [59] C. Tretow, “Design of a free-rotating wing sail for an autonomous sailboat,” Master’s thesis, KTH Vetenskap Och Konst, 2017.
- [60] “Fabory fastener catalog,” 2023, Access: 04/04/2024. [Online]. Available: <https://www.fabory.com/>
- [61] “Mecanarte,” 2023, Access: 04/04/2024. [Online]. Available: <http://www.mecanarte.pt/index.php>
- [62] “Ramada aços special steelsolutions,” maio 2024, Access: 04/04/2024. [Online]. Available: [https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/f-10-n\\_.html](https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-de-construa-ao-ao-carbono/f-10-n_.html)
- [63] “SKF,” 2023, Access: 17/08/2023. [Online]. Available: <https://www.skf.com/pt>
- [64] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, and J. E. Shigley, *Shigley’s mechanical engineering design*, 9th ed. McGraw-Hill, 2011.

# Declaração de Integridade

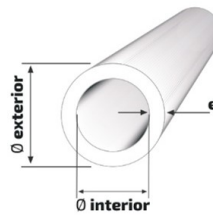
Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP),

Carlos Miguel Fernandes Dias

Porto, 14 de junho de 2024

## Declaração de Integridade

# A POLY LANEMA Tubo alumínio AW 6061 perfil circular

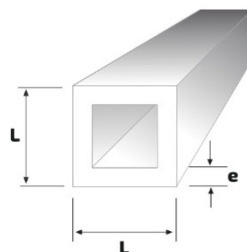


## TUBOS REDONDOS

Ø exterior x e (mm)	PESO (kg/m)	STOCK T6	D x e (mm)	PESO (kg/m)	STOCK T6
Comprimento Standard 6500 mm					
10 x 1.5	0.080	●	60 x 2.5	1.219	○
12 x 1	0.098	○	60 x 3	1.522	○
16 x 1.5	0.184	○	60 x 5	2.333	●
18 x 1	0.151	○	60 x 10	4.241	●
18 x 1.5	0.210	●	70 x 2	1.210	○
20 x 1	1.161	○	70 x 2.5	1.431	●
20 x 1.5	0.235	○	70 x 3	1.789	○
20 x 2	0.305	●	70 x 5	2.757	●
22 x 1	0.178	○	70 x 10	5.339	○
22 x 1.5	0.261	○	80 x 2.5	1.643	○
25 x 1.5	0.299	○	80 x 3	1.959	●
25 x 2	0.390	●	80 x 5	3.181	●
25 x 2.5	0.477	○	80 x 8	4.889	●
30 x 1.5	0.363	○	80 x 10	5.938	●
30 x 2	0.475	●	85 x 2	1.436	○
30 x 2.5	0.583	●	85 x 2.5	1.749	○
30 x 3	0.687	○	90 x 3	2.214	○
30 x 4	0.882	○	90 x 5	3.605	○
30 x 5	1.060	○	90 x 10	6.786	○
32 x 1.5	0.388	○	100 x 2	1.663	○
32 x 2.5	0.626	○	100 x 3	2.468	●
33 x 2.5	0.647	○	100 x 5	4.029	●
33 x 4	0.984	○	100 x 10	7.634	●
35 x 2	0.560	●	106 x 3	2.621	○
35 x 2.5	0.689	○	110 x 5	4.453	○
38 x 1.5	0.464	○	110 x 10	8.482	○
40 x 1.5	0.490	○	120 x 3	2.977	○
40 x 2	0.645	●	120 x 4	3.935	○
40 x 3	0.988	○	120 x 5	4.877	●
40 x 5	1.484	○	120 x 8	7.600	○
40 x 10	2.670	○	120 x 10	9.331	●
45 x 4	1.391	○	120 x 15	13.360	○
50 x 1.5	0.617	○	125 x 5	5.089	○
50 x 2	0.854	●	130 x 2.5	2.704	○
50 x 2.5	1.007	○	130 x 15	14.632	○
50 x 3	1.196	○	135 x 5	5.514	○
50 x 5	1.909	●	200 x 5	8.270	●
50 x 10	3.393	○	200 x 8	13.029	○
60 x 2	0.984	●	200 x 10	16.116	●



## B POLY LANEMA Tubo alumínio AW 6061 perfil quadrado



### TUBOS QUADRADOS

L x L x e (mm)	PESO (kg/m)	STOCK T6
Comp. Standard 6500 mm		
15 x 15 x 2	0.295	☉
20 x 20 x 2	0.408	●
25 x 25 x 2	0.522	☉
30 x 30 x 1.5	0.485	☉
30 x 30 x 2	0.635	●
30 x 30 x 3	0.919	☉
40 x 40 x 1.5	0.655	☉
40 x 40 x 2	0.862	●
40 x 40 x 3	1.259	☉
40 x 40 x 4	1.633	●
50 x 50 x 2	1.089	●
50 x 50 x 4	2.087	●
50 x 50 x 5	2.549	☉
60 x 60 x 2	1.089	●
60 x 60 x 4	2.540	●
70 x 70 x 4	2.994	☉
80 x 80 x 2	1.769	☉
80 x 80 x 3	2.617	☉
80 x 80 x 4	3.447	●
80 x 80 x 5	4.269	☉
80 x 80 x 8	6.532	☉
100 x 100 x 2	2.223	☉
100 x 100 x 2.5	2.764	☉
100 x 100 x 3	3.297	☉
100 x 100 x 4	4.355	☉
100 x 100 x 10	10.197	☉
120 x 120 x 2	2.676	☉
120 x 120 x 5	6.521	☉
200 x 200 x 5	11.047	☉



## C MECANARTE - Roda 1/BA-200



### ITEMS RELACIONADOS

251318	251218	251247

### INFORMAÇÃO DO PRODUTO

102060

RODA 1/BA-200

EAN: 5604758009572

Roda em borracha preta, núcleo em polipropileno com rolamento de rolos.

#### DADOS TÉCNICOS

Diâmetro roda	200 mm
Largura roda	50 mm
Dureza do rasto	80 Shore A
Diâmetro furo central	20 mm
Largura canhão	57 mm
Peso total	1,08 kg
Capacidade carga	200 kg



## D SNR - FC40570S06 Rolamentos de roda

CARACTERÍSTICOS	
Diâmetro externo 1	52 mm
Diâmetro interno 1	25 mm
Largura 1	37 mm
Peso	0,375 kg

EQUIVALÊNCIAS	
Fabricante	Referência
CHEVROLET	96471775   96471776
DAEWOO	96471775   96471776
RENAULT	82 00 489 610

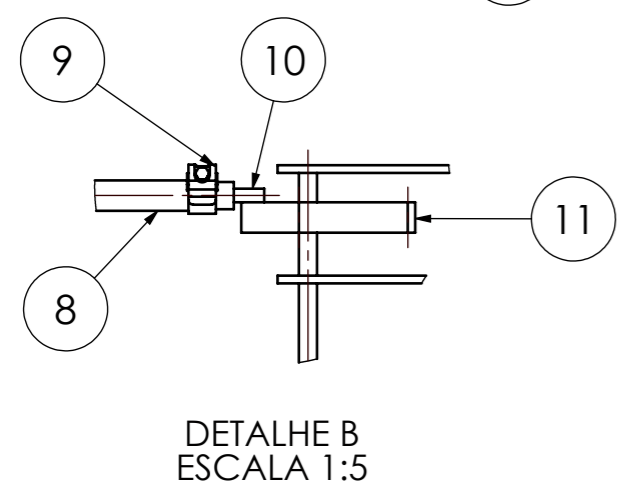
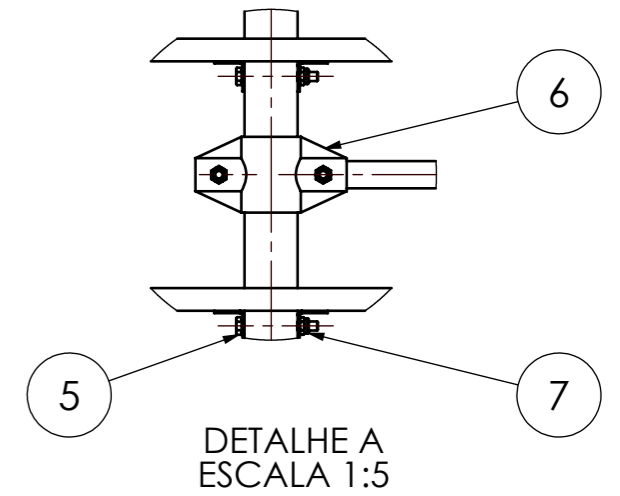
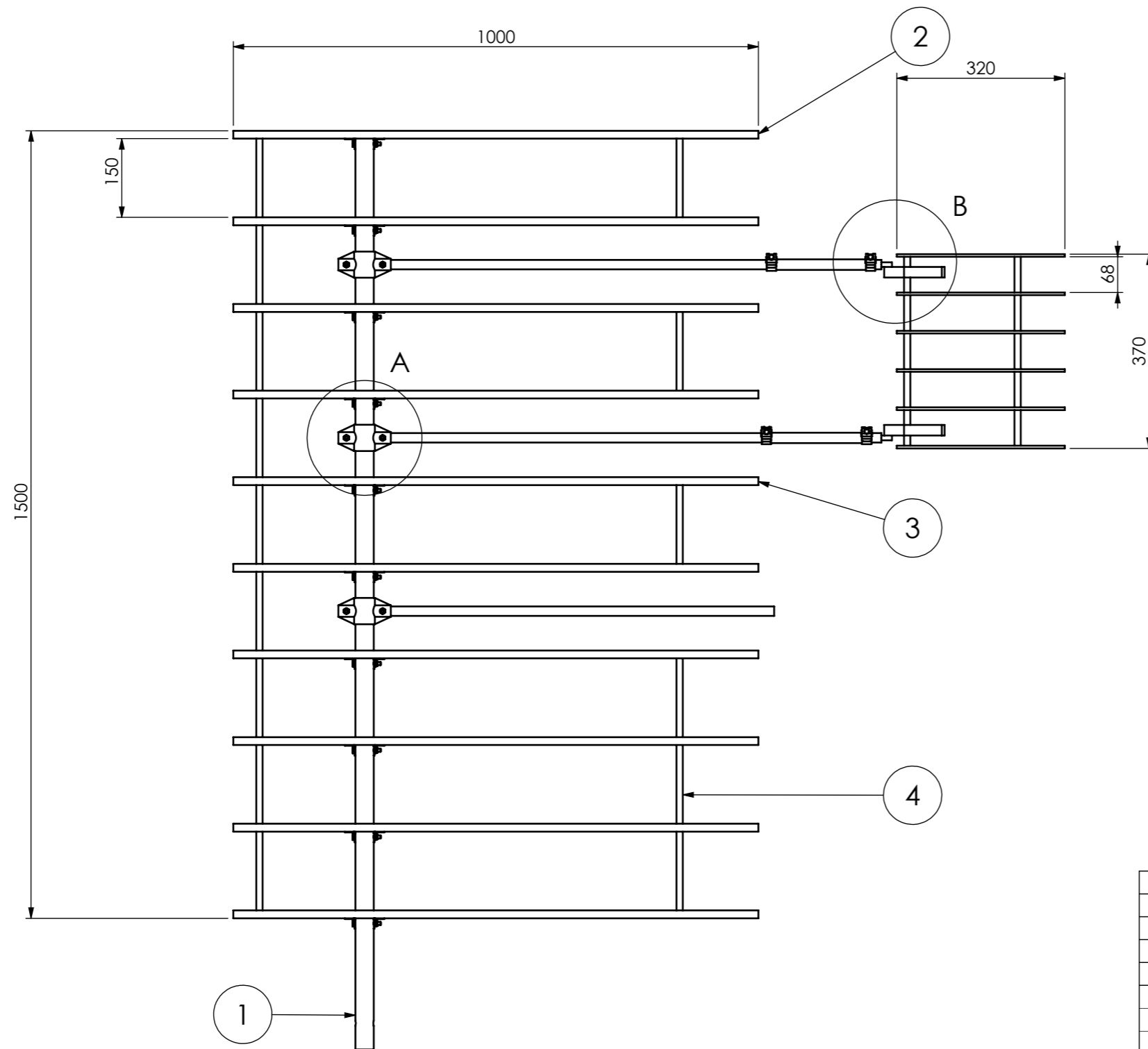


## E Desenhos de Fabrico

### E.1 Lista de desenhos

DESENHO Nº	DESIGNAÇÃO
C01	SUBCONJUNTO VELA - CAUDA
C02	SUBCONJUNTO FIXAÇÃO DO MASTRO
C03	SUBCONJUNTO CHASSI – FIXAÇÃO DO MASTRO
P01	TUBO PRINCIPAL DO MASTO
P02	CHAPA DE FIXAÇÃO DAS COSTELAS DA VELA
P03	FIXAÇÃO DOS TUBOS LATERAIS DO MASTRO
P04	COSTELAS SUPERIOR E INFERIOR DA VELA
P05	COSTELAS DA VELA
P06	COSTELAS SUPERIOR E INFERIOR DA CAUDA
P07	COSTELAS DA CAUDA
P08	FIXAÇÃO DA CAUDA
P09	FIXAÇÃO DA CAUDA – PEÇA 2
P10	CHASSI
P11	CHAPA DE SUPORTE DA FIXAÇÃO DO MASTRO
P12	SUPORTE DA MANGA DE EIXO FRENTE
P13	VEIO DE LIGAÇÃO À RODA TRASEIRA
P14	TIRANTES DE LIGAÇÃO ENTRE AS RODAS E O SERVOMOTOR
P15	MANGA DE EIXO DA FRENTE
P16	TAMPA SUPERIOR DA CAIXA DE ROLAMENTOS
P17	VEIO DE LIGAÇÃO AO MASTRO
P18	TAMPA INFERIOR DA CAIXA DE ROLAMENTOS
P19	CAIXA DE ROLAMENTOS

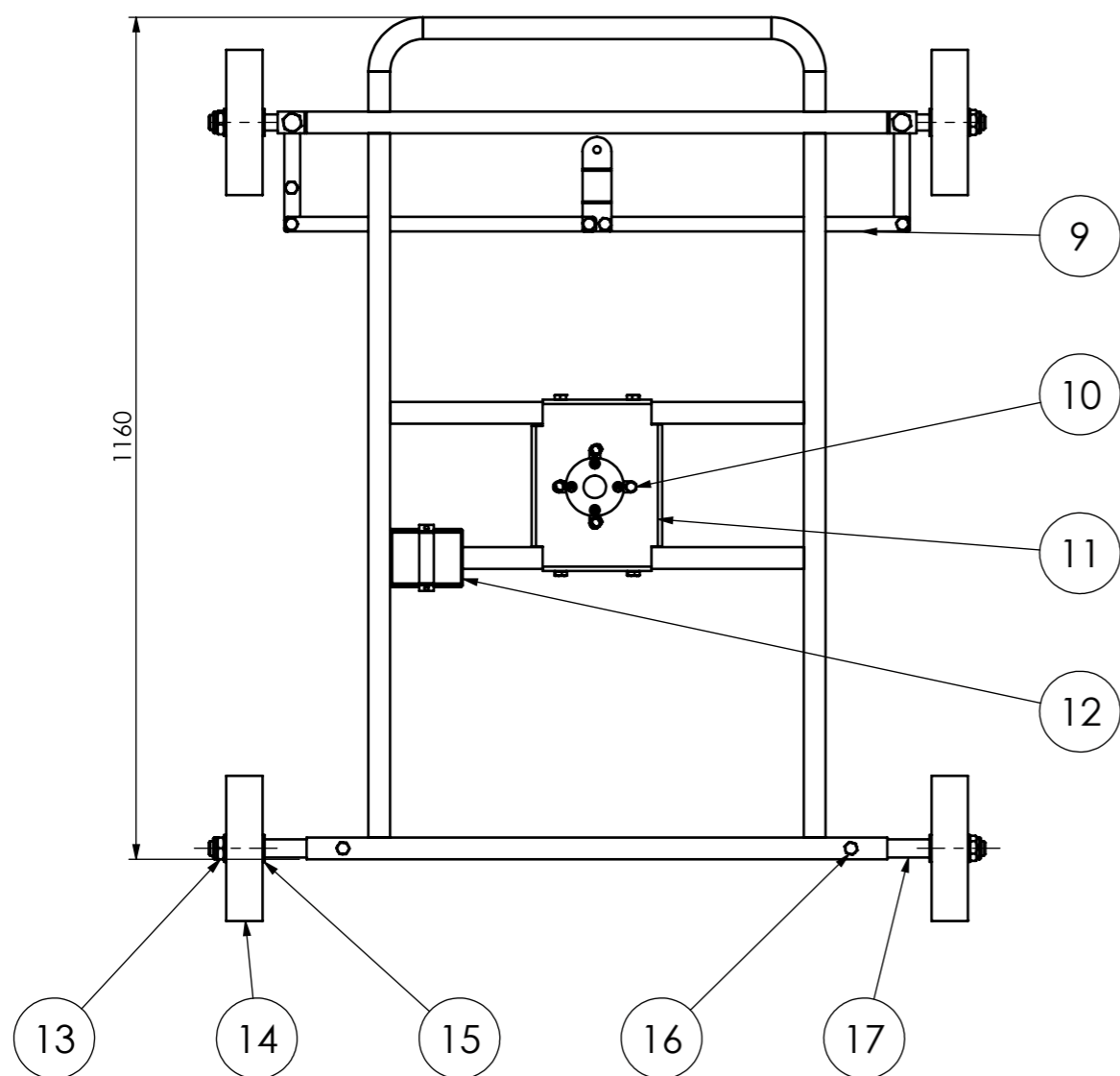
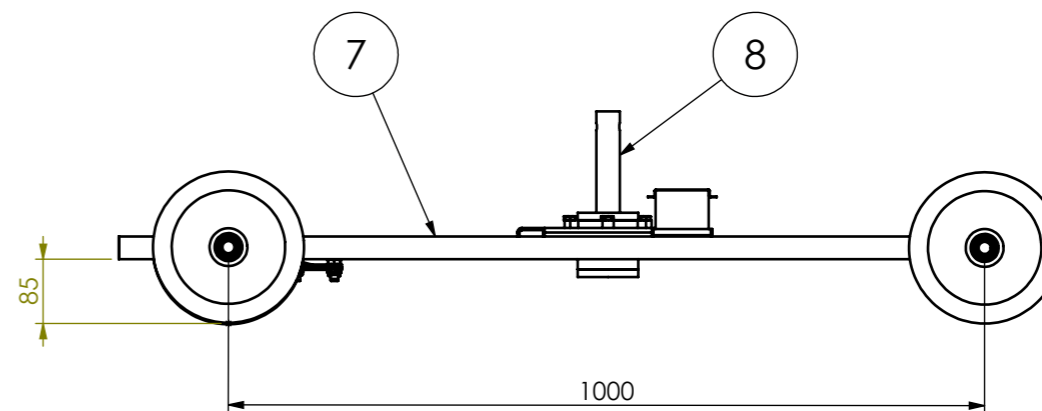
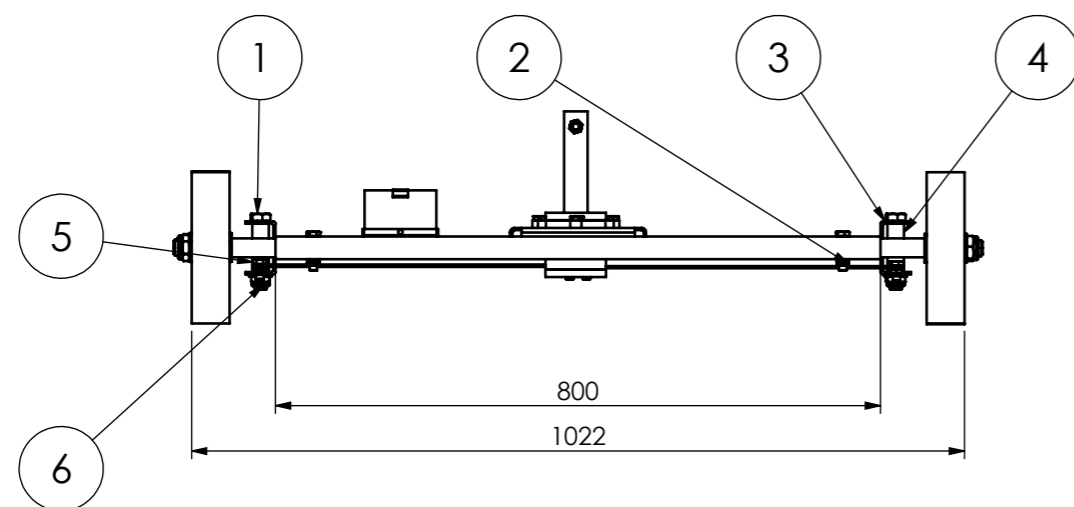
## **E.2 Desenhos**



2	FIXAÇÃO DA CAUDA	PETG	P08	11
2	FIXAÇÃO DA CAUDA - PEÇA 2	PETG	P09	10
4	ABRÇAÇADEIRAS	AÇO		9
2	TUBO PARA FIXAÇÃO DA CAUDA	PVC		8
10	PORCA ISO 10511 M6	AÇO		7
6	FIXAÇÃO DOS TUBOS LATERAIS DO MASTRO	PETG	P03	6
10	PARAFUSO ISO 4017 M6x50	AÇO		5
2	TUBOS LATERAIS DA VELA	PVC		4
8	COSTELAS DA VELA	CONTRAPLACADO DE MADEIRA	P05	3
2	COSTELAS SUPERIOR E INFERIOR DA VELA	CONTRAPLACADO DE MADEIRA	P04	2
1	MASTRO	ALUMÍNIO AW 6063	P01	1
QTD	DESIGNAÇÃO	MATERIAL	REFERÊNCIA	Nº

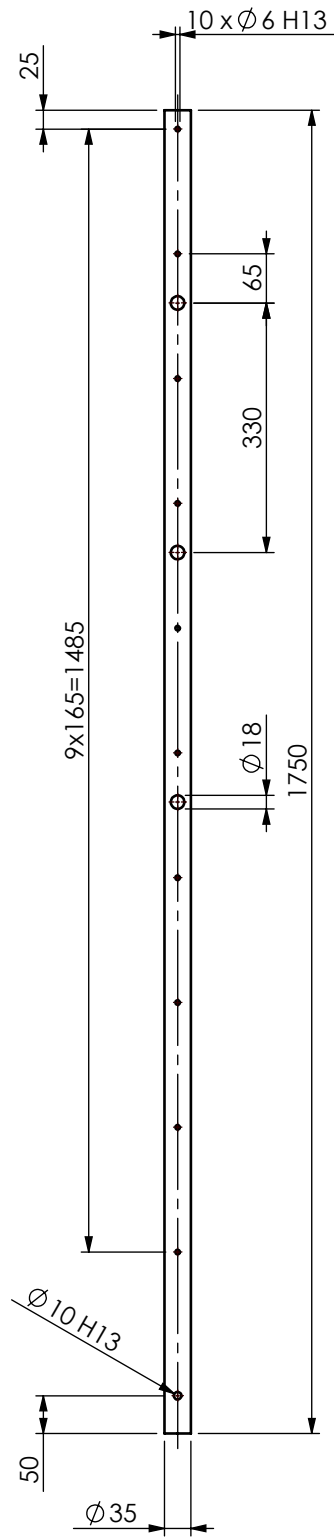
PROJECTOU				<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
DESENHOU	cdias	06-05-2024	CARLOS DIAS 1181128	
COPIOU				
VERIFICOU				
ESCALA	1:10			DESENHO Nº C01
TOLER.	SUBCONJUNTO VELA-CAUDA VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA			
				SUBSTITUI
				SUBSTITUIDO





2	VEIO DE LIGAÇÃO À RODA TRASEIRA	AÇO AISI 1045	P13	17
6	PARAFUSO ISO 4017 - M10 x 45	AÇO		16
8	ANILHA PLANA 7089 - 20	AÇO		15
4	RODA	POLIPROPILENO		14
4	PORCA ISO 10511 - M20	AÇO		13
1	CHAPA DE SUPORTE DA BATERIA	ALUMÍNIO AW 6061		12
1	CHAPA DE SUPORTE DA FIXAÇÃO DO MASTRO	ALUMÍNIO AW 6061	P11	11
4	PARAFUSO ISO 4017 - M8 x 20	AÇO		10
2	TIRANTES DE LIGAÇÃO ENTRE AS RODAS E O SERVOMOTOR	ALUMÍNIO AW 6061	P14	9
1	SUBCONJUNTO FIXAÇÃO DO MASTRO	AÇO AISI 1045	C02	8
1	CHASSI	ALUMÍNIO AW 6063	P10	7
2	PORCA ISO 10511 - M16	AÇO		6
2	PARAFUSO ISO 4017 - M10 x 20	AÇO		5
2	MANGA DE EIXO DA FRENTE	AÇO AISI 1045	P15	4
2	SUPORTE MANGA DE EIXO DA FRENTE	ALUMÍNIO AW 6061	P12	3
8	PORCA ISO 10511 - M10	AÇO		2
2	PARAFUSO ISO 8765 - M16 x 90	AÇO		1
QTD	DESIGNAÇÃO	MATERIAL	REFERÊNCIA	Nº

PROJECTOU			CARLOS DIAS 1181128	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
DESENHOU	cdias	06-05-2024		
COPIOU				
VERIFICOU				
ESCALA	1:10			DESENHO NºC03
TOLER.	SUBCONJUNTO CHASSI-FIXAÇÃO DO MASTRO VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA			
				SUBSTITUI
				SUBSTITUÍDO



ISO 2768-mK

Tubo de alumínio AW 6063 com  $\phi_{ext}=31$  mm

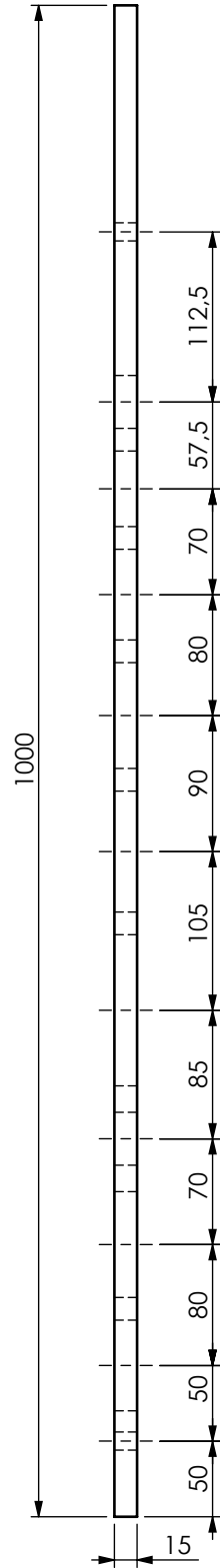
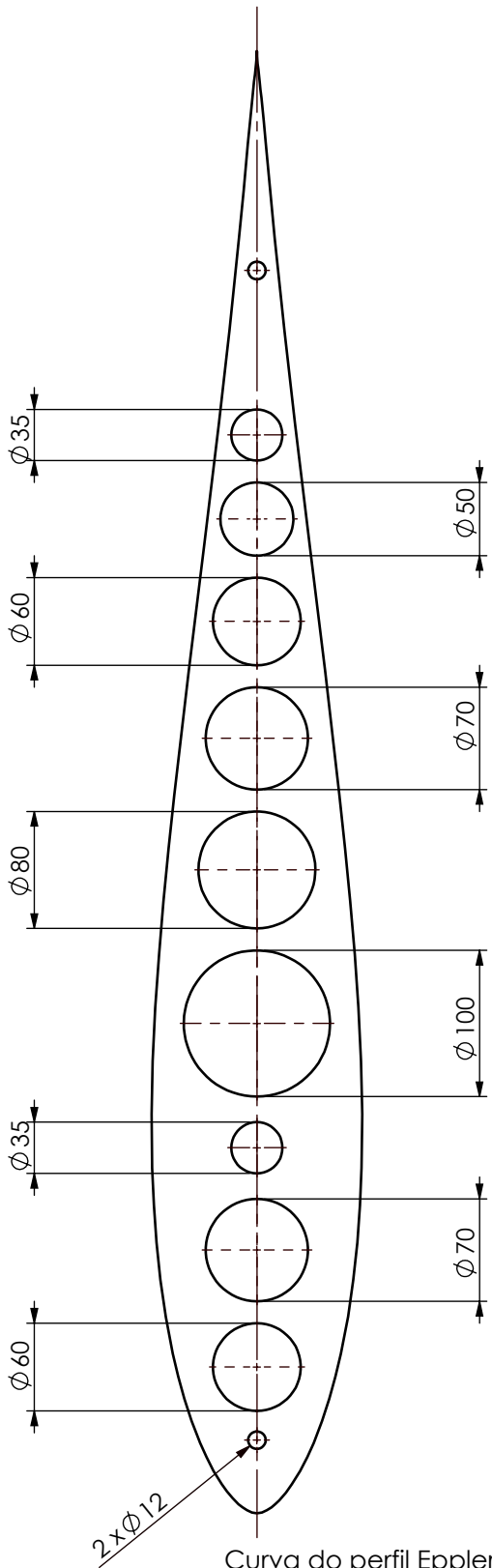
Qtd=1

PROJECTOU			CARLOS DIAS 1181128	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
DESENHOU	cdias	06-05-2024		
COPIOU				
VERIFICOU				
ESCALA	1:10			DESENHO NºP01
TOLER.	TUBO PRINCIPAL DO MASTRO VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA			
				SUBSTITUI
				SUBSTITUIDO





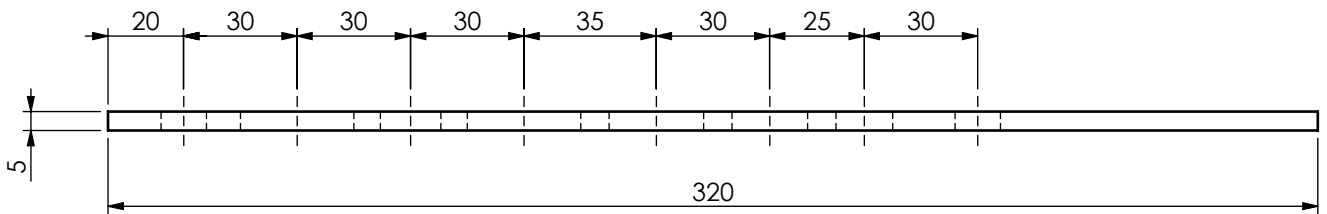
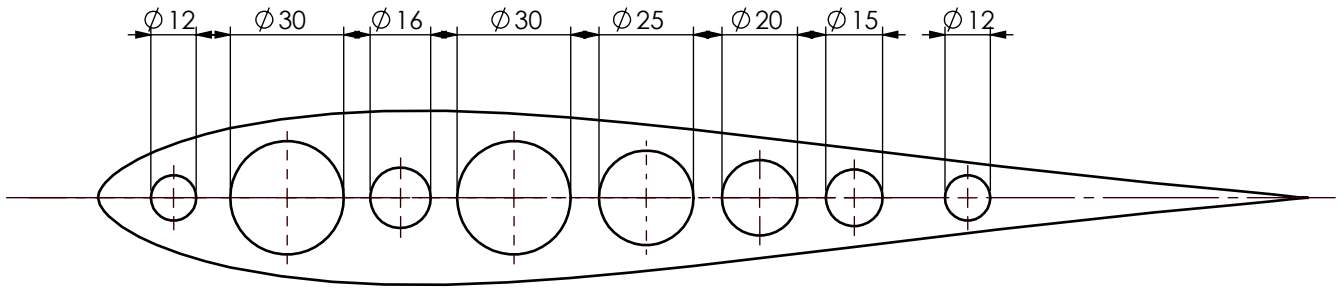




Curva do perfil Eppler E169 definida com recurso ao Airfoil Tools  
 Material:contraplacado de madeira  
 Qtd=8

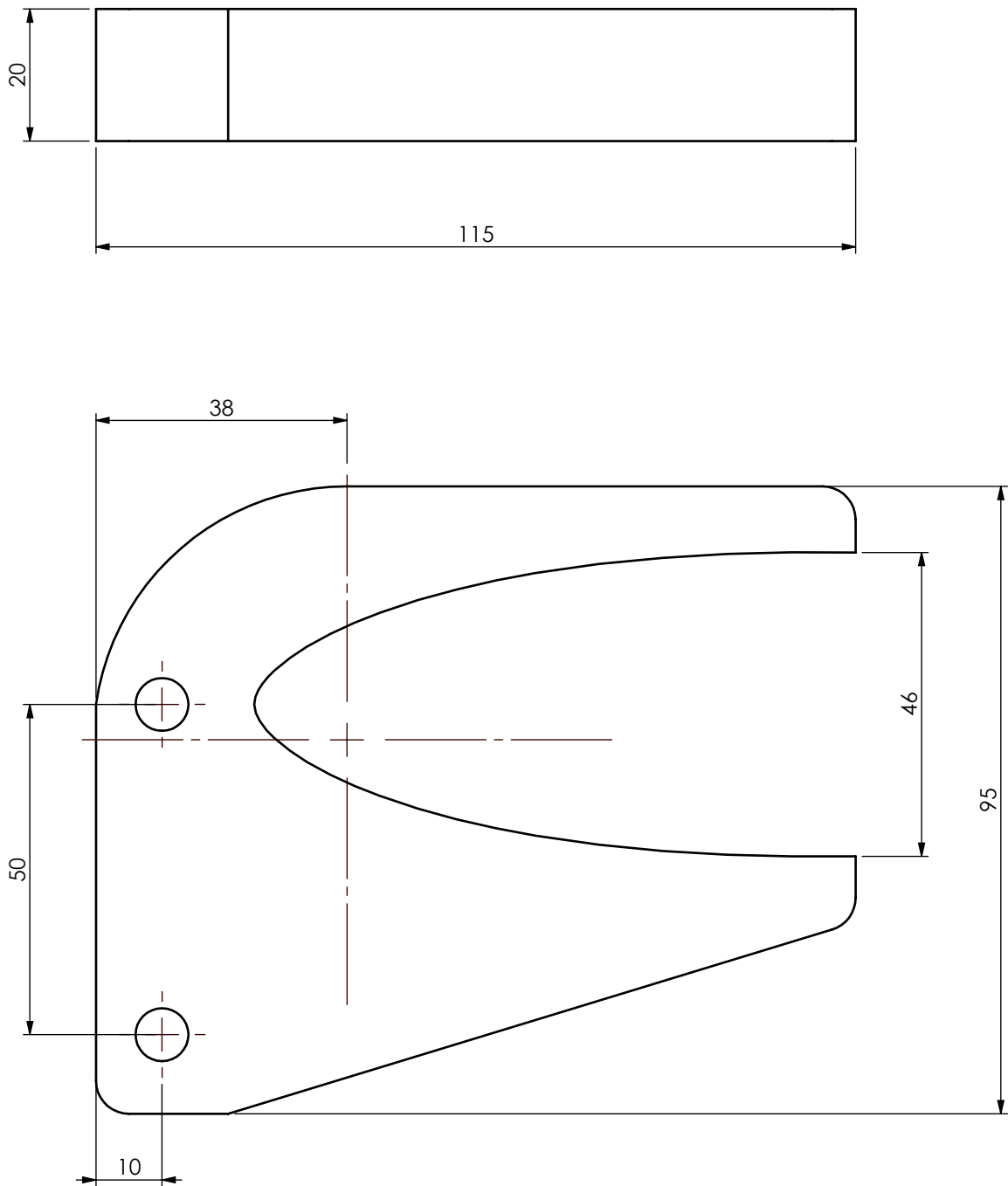
PROJECTOU			CARLOS DIAS 1181128	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO										
DESENHOU	cdias	06-05-2024												
COPIOU														
VERIFICOU														
ESCALA	1:5			DESENHO NºP05										
TOLER.	COSTELAS DA VELA VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA													
				<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>										
				SUBSTITUI										
				SUBSTITUIDO										





Curva do perfil Eppler E169 definida com recurso ao Airfoil Tools  
 Material: contraplacado de madeira  
 Qtd=4

PROJECTOU			CARLOS DIAS 1181128	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO										
DESENHOU	cdias	06-05-2024												
COPIOU														
VERIFICOU														
ESCALA	1:2			DESENHO NºP07										
TOLER.	COSTELAS DA CAUDA VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA													
				<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>										
				SUBSTITUI										
				SUBSTITUIDO										

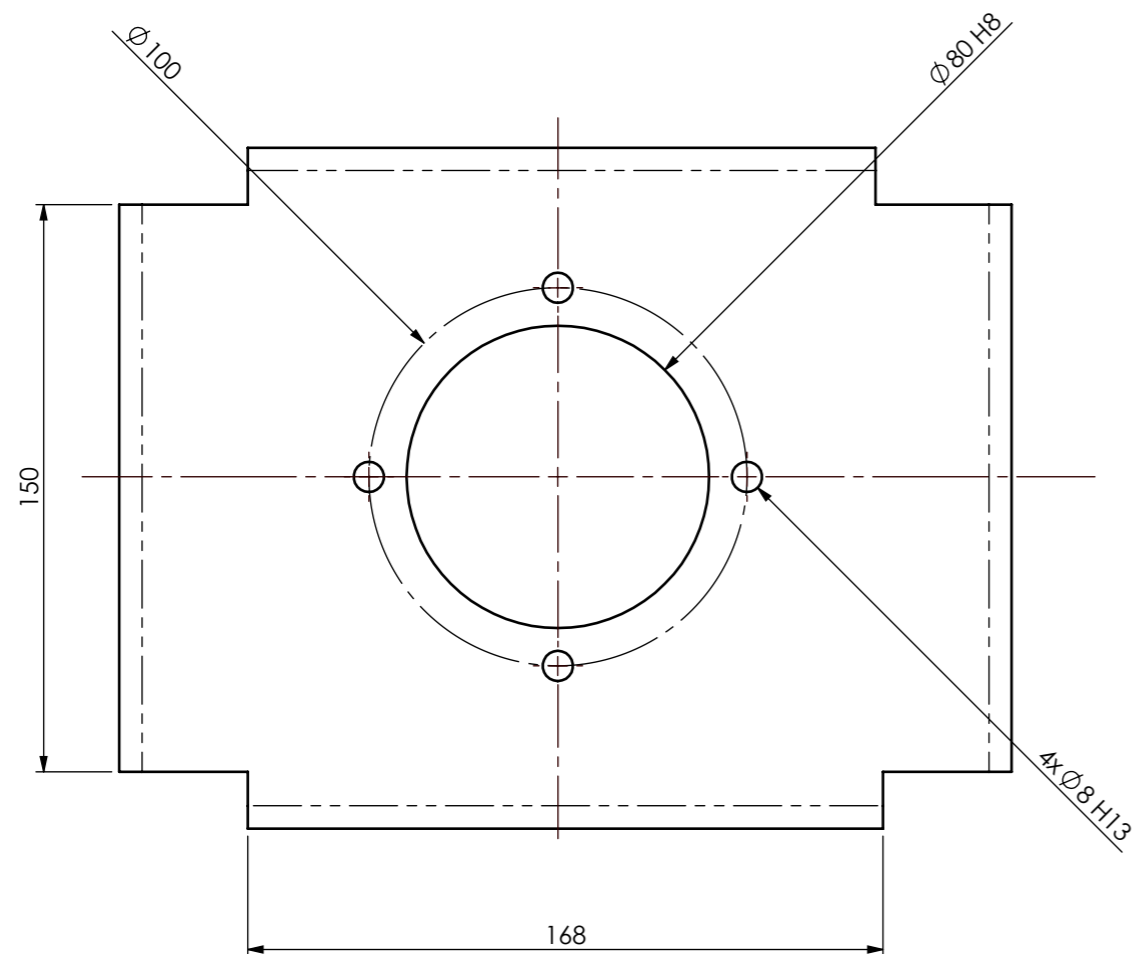
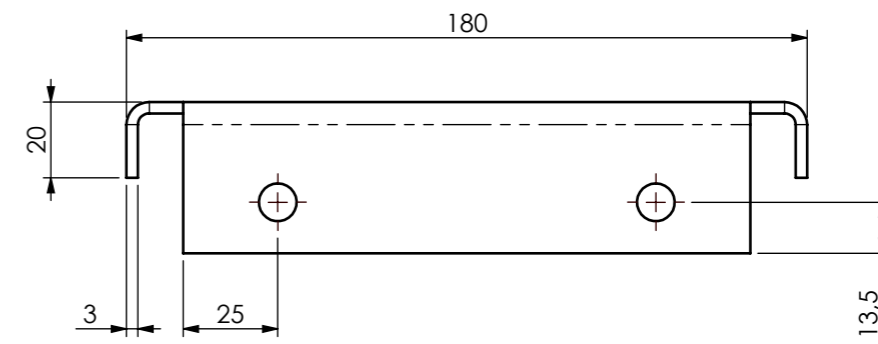
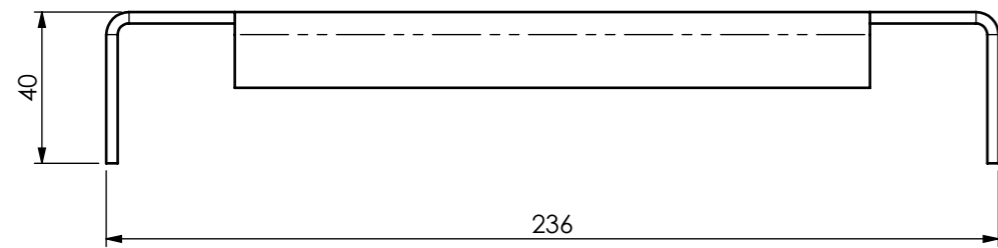


Peça obtida pelo processo de fabricação aditiva em PETG  
 Qtd=2

PROJECTOU			CARLOS DIAS 1181128	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO										
DESENHOU	cdias	06-05-2024												
COPIOU														
VERIFICOU														
ESCALA	1:2			DESENHO NºP08										
TOLER.	FIXAÇÃO DA CAUDA VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA													
				<table border="1"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>										
				SUBSTITUI										
				SUBSTITUIDO										







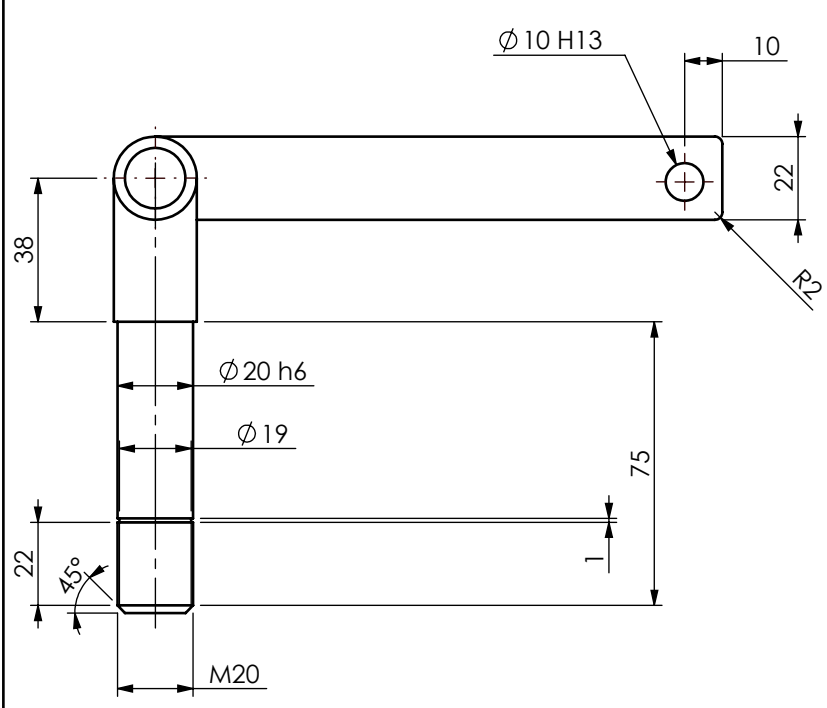
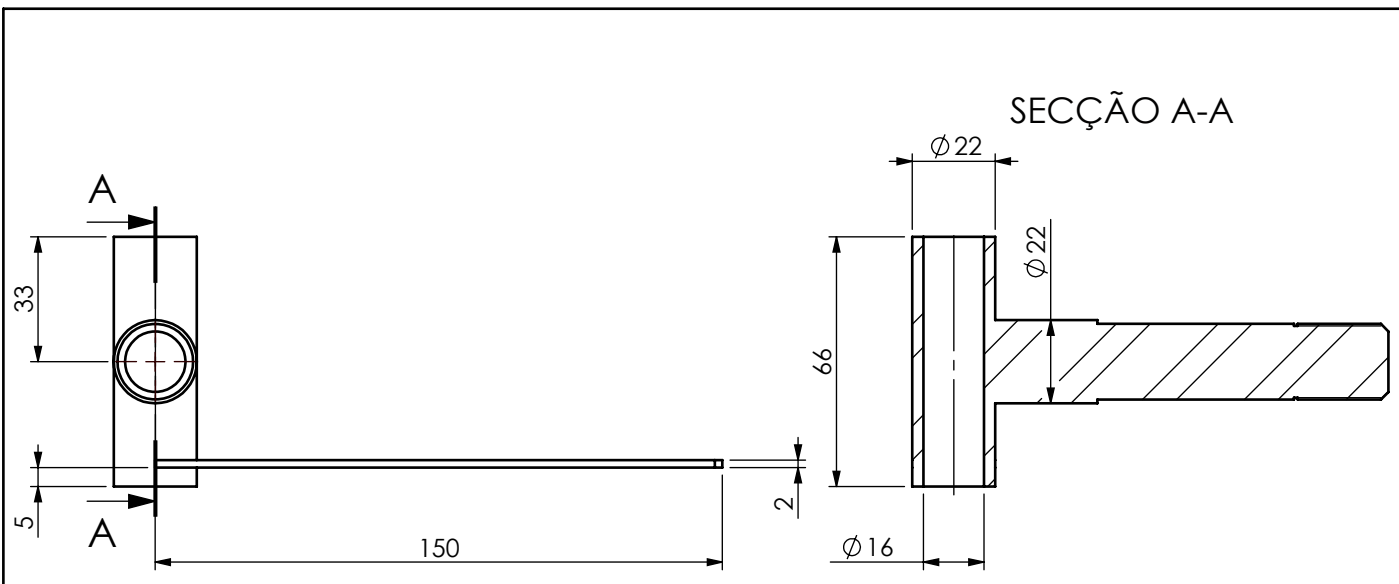
ISO 2768-mK  
 Chapa de alumínio AW 6061 com 3 mm de espessura  
 Qtd=1

PROJECTOU			CARLOS DIAS	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
DESENHOU	cdias	06-05-2024	1181128	
COPIOU				
VERIFICOU				
ESCALA	1:2	CHAPA DE SUPORTE DA FIAÇÃO DO MASTRO VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA		DESENHO NºP11
TOLER.				
				SUBSTITUI
				SUBSTITUIDO





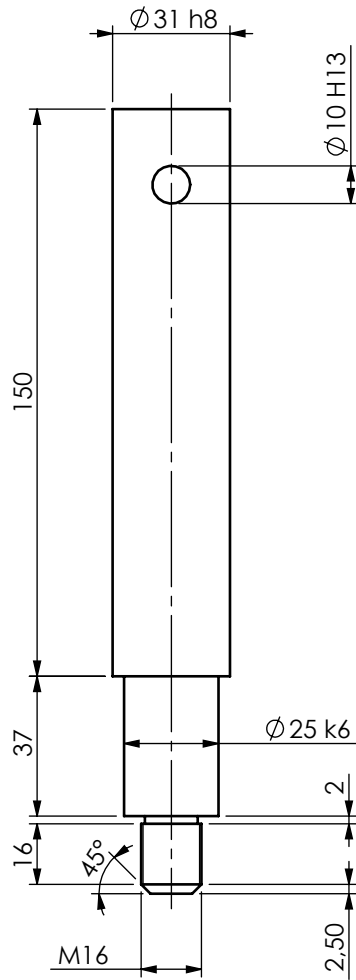




ISO2768-mK  
 Material: Aço AISI 1045  
 Qtd=2

PROJECTOU			CARLOS DIAS 1181128	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
DESENHOU	cdias	06-05-2024		
COPIOU				
VERIFICOU				
ESCALA	1:2			DESENHO NºP15
TOLER.	MANGA DE EIXO DA FRENTE VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA			
				SUBSTITUI
				SUBSTITUIDO

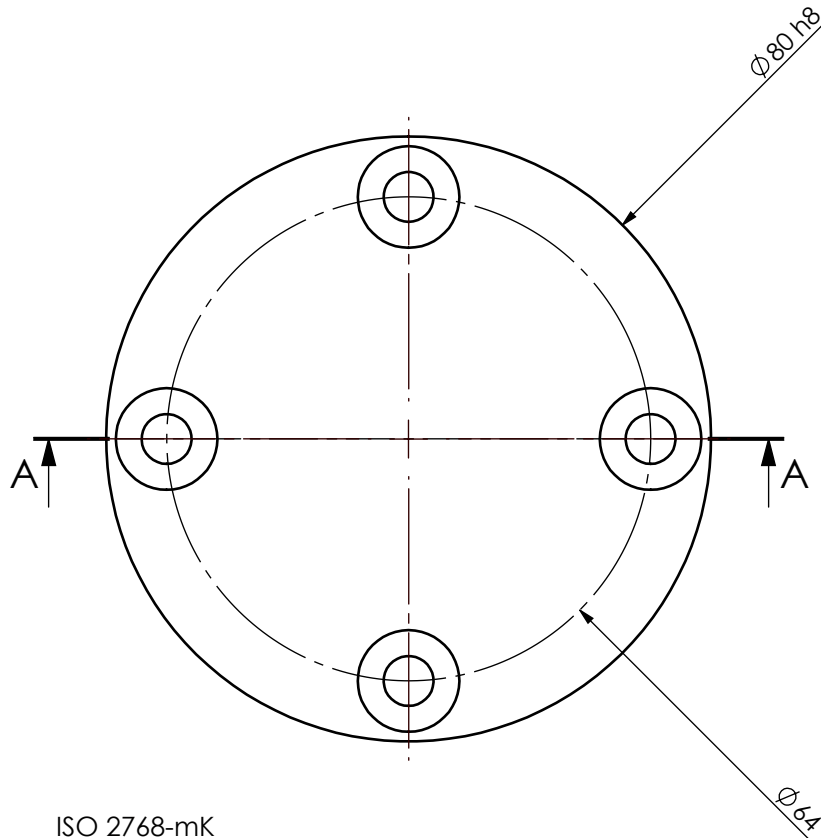
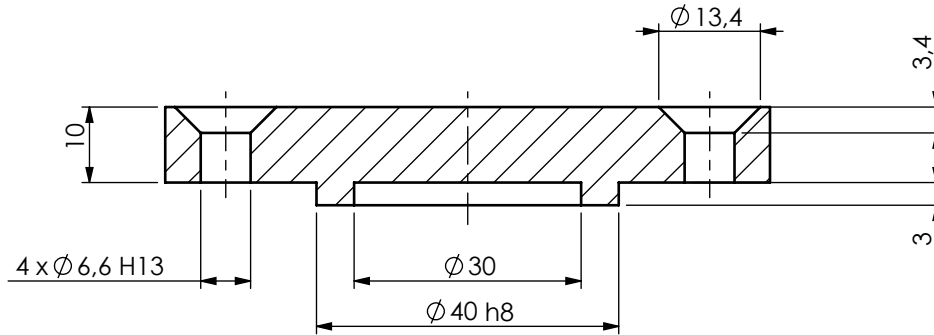




ISO 2768-mK  
 Material: Aço AISI 1045  
 Qtd=1

PROJECTOU			CARLOS DIAS 1181128	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO										
DESENHOU	cdias	06-05-2024												
COPIOU														
VERIFICOU														
ESCALA	1:2			DESENHO Nº P17										
TOLER.	VEIO DE LIGAÇÃO AO MASTRO VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA													
<table border="1" style="width:100%; height: 20px;"> <tr> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>														
SUBSTITUI														
SUBSTITUIDO														

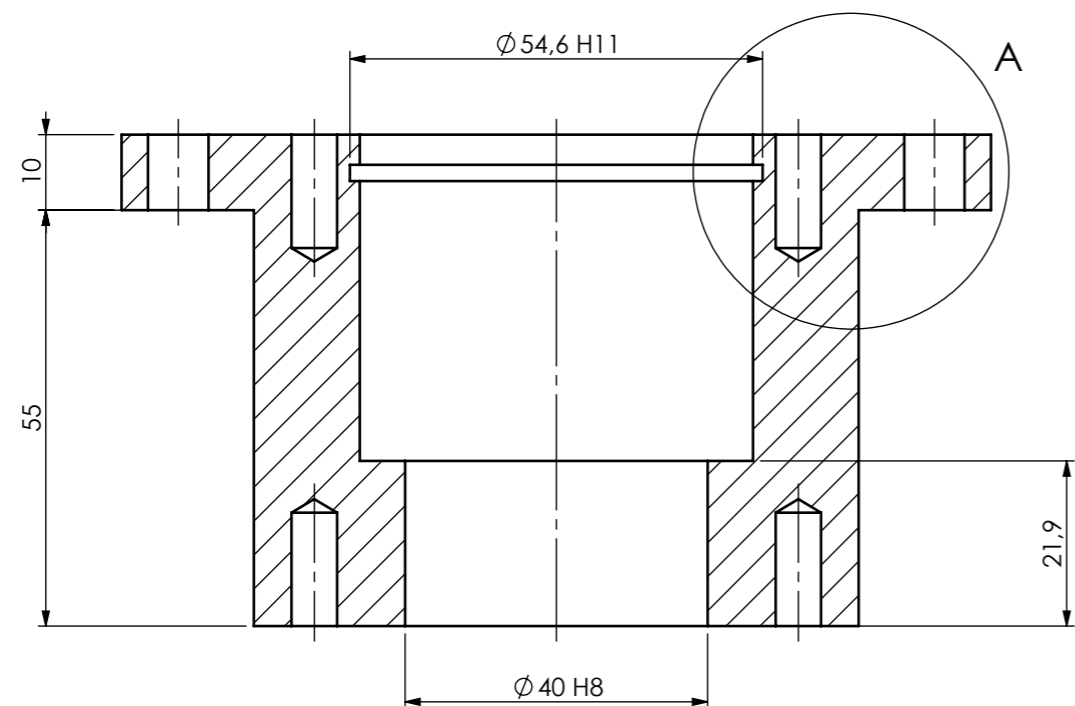
SECÇÃO A-A



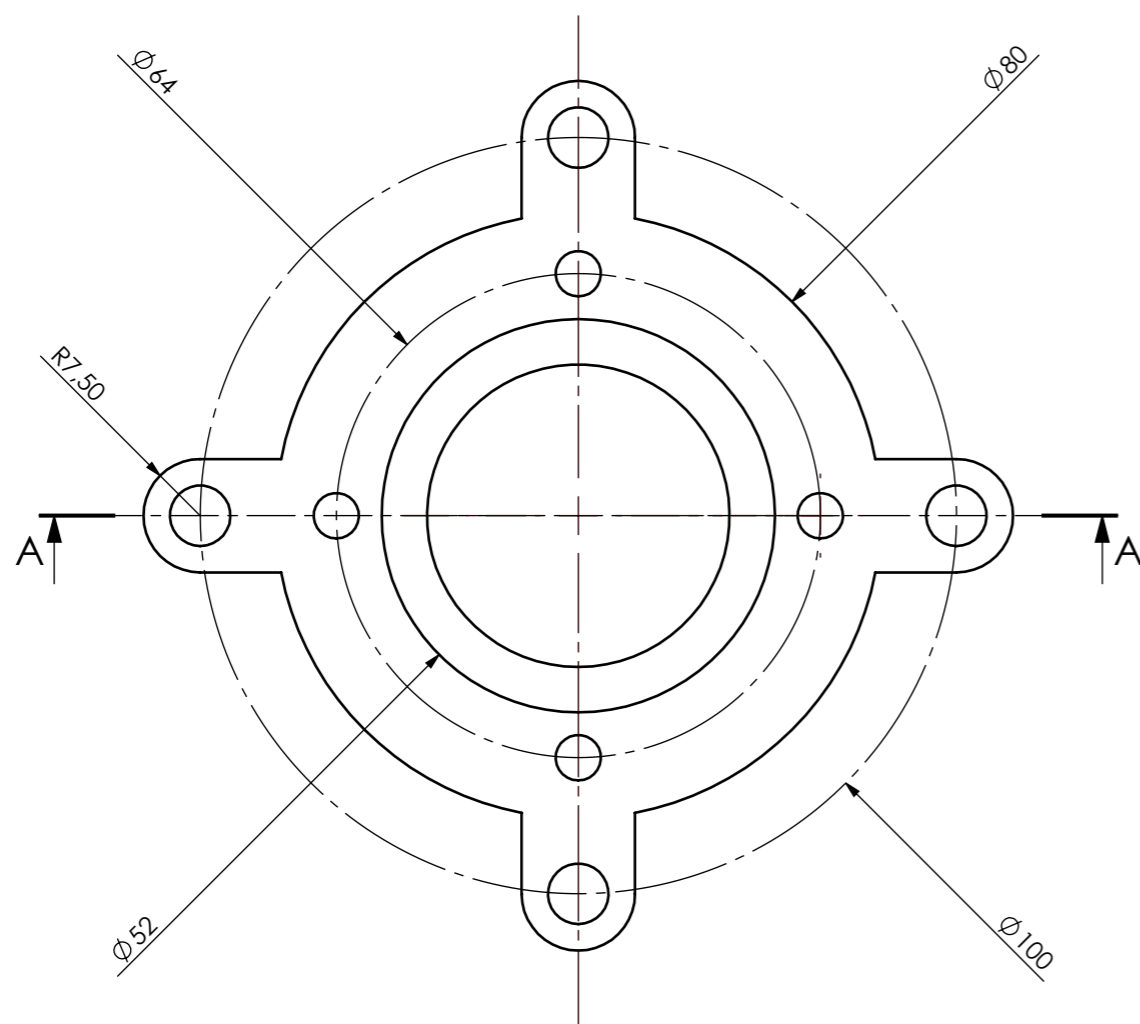
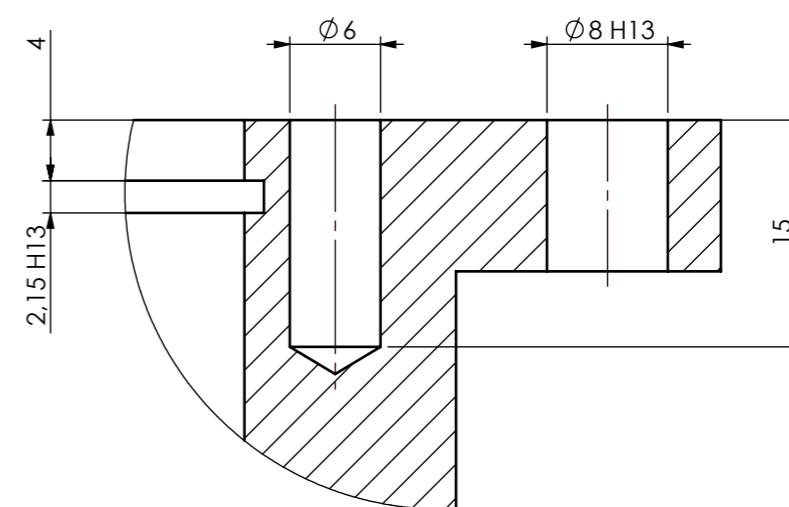
ISO 2768-mK  
 Material: Aço AISI 1045  
 Qtd=1

PROJECTOU			CARLOS DIAS 1181128	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO						
DESENHOU	cdias	06-05-2024								
COPIOU										
VERIFICOU										
ESCALA	1:1			DESENHO Nº P18						
TOLER.	TAMPA INFERIOR DA CAIXA DE ROLAMENTOS VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA									
				<table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>						
				SUBSTITUI						
				SUBSTITUIDO						

SECÇÃO A-A



DETALHE A  
ESCALA 2 : 1



ISO2768-mK  
Material: Aço AISI 1045  
Qtd=1

PROJECTOU			CARLOS DIAS	<b>ISEP</b> INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
DESENHOU	cdias	06-05-2024	1181128	
COPIOU				
VERIFICOU				
ESCALA	1:1			DESENHO Nº P19
TOLER.	CAIXA DE ROLAMENTOS VEÍCULO COM PROPULSÃO POR VELA RÍGIDA			
				SUBSTITUI
				SUBSTITUIDO